

П. С. МИХАЙЛОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МОРСКИХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СПУТНИКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

В статье исследуются возможности использования данных высокоточных морских гравиметрических съемок для коррекции глобальных моделей гравитационного поля Земли в Мировом океане. Точность современных моделей на акваториях в региональном масштабе достигается благодаря методу спутниковой альтиметрии и зависит от характеристик гравитационного поля. На градиентных структурах поля амплитуды реальных аномалий в моделях подавлены, поэтому для более эффективного применения моделей необходимо восстановить в них высокие частоты. На абиссальных структурах их основной погрешностью является высокочастотный шум. Описываются приемы коррекции полученных от моделей данных, которые позволяют повысить точность на достаточно больших площадях с привлечением ограниченного количества морских гравиметрических измерений. Приводятся также оценки результатов практического применения новой глобальной альтиметрической модели гравитационного поля Земли Sandwell and Smith v.32 в различных акваториях Мирового океана.

Ключевые слова: морская гравиметрия, глобальные модели гравитационного поля, спутниковая альтиметрия, Мировой океан.

Введение

В условиях развития спутниковых технологий, увеличения количества специальных спутниковых миссий и совершенствования методик обработки данных глобальные модели гравитационного поля Земли (ГПЗ) получают все большее пространственное разрешение и точность.

Для задач прикладной поисковой геофизики данные об аномалиях уточняются с помощью средств морской гравиметрической съемки. При этом в других случаях детальная площадная съемка зачастую является дорогостоящим и сложным мероприятием, поэтому целесообразно задействовать глобальные модели ГПЗ, с повышением точности и детальности которых расширяются и возможности более эффективного их применения, особенно там, где важно знать данные о глобальных или региональных ГПЗ [1].

Анализ характеристик конкретных моделей осложняется тем, что современная модель ГПЗ представляет собой комбинированное решение, где в разных длинах волн содержится информация от различных источников [2]. В Мировом океане ос-

Михайлов Павел Сергеевич. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (Москва); ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (Владимир).

новным средством получения данных об аномалиях гравитационного поля в глобальном масштабе служит спутниковая альтиметрия. Данные о гравитационном поле на акватории в диапазоне длин волн аномалий короче 60 км в современных моделях известны также главным образом благодаря средствам альтиметрии, хотя зависят от возможностей метода и особенностей их обработки. Отметим, что данные альтиметрии обрабатываются в том числе методами низкочастотной фильтрации и сглаживания, параметры которых определяются рядом факторов: течениями, качеством отраженного радарного сигнала, глубиной акваторий и т.д. [3]. В связи с этим практическая оценка каждой модели должна выполняться в разных акваториях и над различными геоморфологическими структурами [4].

В настоящей статье анализируется возможность применения ограниченного количества данных морских гравиметрических съемок для улучшения спутниковых моделей ГПЗ на достаточно больших площадях Мирового океана.

Проблематика использования данных морских гравиметрических съемок совместно с данными спутниковых геодезических измерений рассматривалась рядом исследователей из разных стран. В работе ИФЗ РАН [5] было показано, что глобальная спутниковая модель не содержит систематической составляющей погрешности, которая свойственна морским съемкам, например вследствие смещения нуля-пункта гравиметра. В результате были предложены и апробированы методы, предполагающие привлечение глобальной модели для контроля морских гравиметрических измерений и их коррекцию в случаях нештатной работы гравиметров [6]. На длинноволновом диапазоне сравнения такой подход имеет практическую пользу.

В диапазоне коротких волн аномалии силы тяжести (АСТ) зачастую обусловлены элементами рельефа дна акватории, которые на уровне поверхности акватории не всегда могут быть обнаружены спутниковыми средствами, в том числе альтиметрическими. Ввиду этого вопрос непосредственного объединения морских съемок высокого пространственного разрешения со спутниковыми данными является актуальным.

Эта проблема изучалась в первую очередь для получения более детальных моделей геоида. В работах [7, 8, 9] рассмотрены методы объединения альтиметрических данных с площадными морскими съемками либо нерегулярными системами профилей, а также с моделью среднего уровня моря (SSH), в частности теория систем ввода и вывода (Input-Output System Theory – IOST) и ее вариации. Этот метод позволяет комплексировать разные данные одной размерности (на одной пространственной сетке) с учетом их спектральных характеристик и известной спектральной мощности шума.

Можно также отметить работы, в которых исследуется возможность улучшения альтиметрических моделей ГПЗ за счет других способов объединения данных. Так, группа ученых из КНР выполнила оценку и комплексирование альтиметрической модели GMGA1 с данными судовой батиметрии методом полосовой фильтрации, что позволило снизить погрешность на 0,4 мГал [10]. Специалисты Национального института картографии Камеруна объединили модели Sandwell and Smith v.27 с результатами профильной гравиметрической съемки в Гвинейском заливе методом коллокации наименьших квадратов (LSC). За счет этого точность модельного поля увеличилась на 23% [11].

Особенность всех описанных методик заключается в непосредственном объединении измеренных данных со спутниковой информацией. В предлагаемой вниманию читателей статье рассматривается подход, предполагающий спектральный

анализ и коррекцию данных с учетом градиента АСТ в интересующем районе. При этом сначала глобальные спутниковые модели привлекаются для контроля морской съемки, которая после учета всех систематических погрешностей может в свою очередь использоваться для оценки модели в области средних и коротких волн (длиной до 60 км) над различными структурами дна. Спектральный анализ вдоль протяженного профиля может выявить в данных модели закономерные диапазоны длин волн с наибольшими погрешностями. Это позволит выполнить коррекцию данных модели в выявленном диапазоне длин волн: либо фильтрацию шума, либо восстановление амплитуд наиболее подавленных аномалий в модели. В результате, с одной стороны, нельзя будет восстановить в данных модели короткие волны аномалий, которые не были выявлены альтиметрическими средствами, с другой – не потребуются ни морских съемок на обширных площадях, ни густой сети профилей, о чем говорилось в упомянутых выше исследованиях. Это актуально, например, для Арктики, где количество морских съемок традиционно мало.

Детальный анализ результатов сравнения аномалий в моделях и в высокоточных съемках (на большой выборке) над градиентными структурами и над абиссальными равнинами показал разные особенности модельного ГПЗ [12]. Ввиду этого статья построена следующим образом. Сначала исследуются характеристики современной ГПЗ на различных структурах Мирового океана на примере Sandwell and Smith v.32. Затем рассматриваются способы оценки и коррекции данных моделей на сложных геоморфологических структурах Мирового океана и в абиссальных регионах. Далее подводятся итоги описанных в статье экспериментов, а в заключении сделан вывод об общих перспективах применения морских гравиметрических съемок для коррекции данных моделей ГПЗ.

Анализ характеристик модели ГПЗ Sandwell and Smith v.32

Наиболее эффективный способ получения данных о достоверности глобальных моделей ГПЗ на акваториях – сравнение их с высокоточными площадными морскими гравиметрическими съемками. Ранее в рамках анализа наиболее актуальных современных моделей были получены оценки их точности в разных акваториях и над различными геоморфологическими структурами Мирового океана [12]. Морские измерения, используемые в оценках моделей, выполнялись российскими гравиметрическими комплексами «Чекан-АМ» и «Шельф» [13, 14]. На рис. 1 показаны среднеквадратические отклонения (СКО) моделей относительно площадных морских съемок над структурами с разным по величине максимальным горизонтальным градиентом АСТ.

Сравнительные оценки новой модели семейства Sandwell and Smith v.32 [15] относительно высокоточных морских гравиметрических съемок получены впервые. Данные об АСТ представлены в виде грида с шагом по широте и долготе в 1', то есть это одна из наиболее детальных на сегодняшний день глобальных моделей. Ее данные, как и предыдущих моделей этой серии, имеют ограничения по широте $\pm 80^\circ$.

Оценки модели Sandwell and Smith v.32 относительно высокоточных площадных морских съемок на разных структурах приведены в табл. 1.

В модель Sandwell and Smith v.32 включено большое количество альтиметрических измерений таких спутников, как SARAL/Altika, Cryosat-2 и Jason-1/2 [16]. Кроме того, использован сглаживающий фильтр с меньшим окном и уменьшено влия-

ние негативных эффектов в прибрежных районах. Согласно полученным оценкам, точность этой модели выросла над всеми структурами, кроме Антарктики. Это дает основания в настоящее время считать модель Sandwell and Smith v.32 наиболее достоверной и точной на большинстве акваторий Мирового океана.

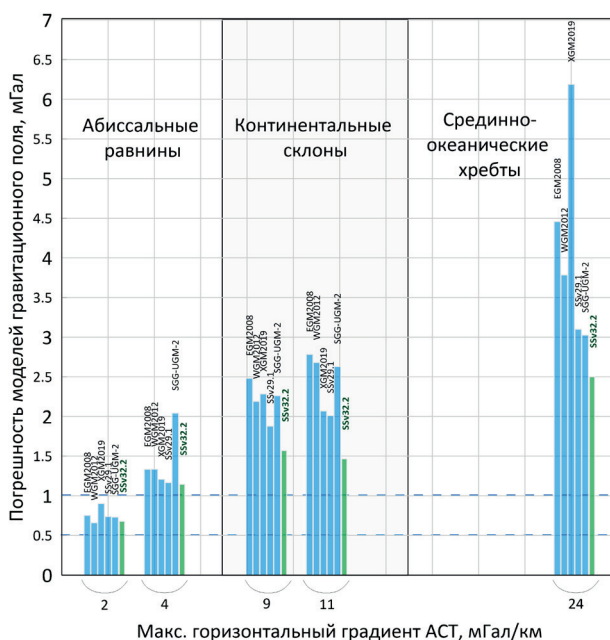


Рис. 1. Зависимость погрешностей глобальных моделей ГПЗ от горизонтального градиента поля в регионах их сравнения с инструментальными съемками. Графиком зеленого цвета обозначена новейшая модель Sandwell and Smith v.32

Таблица 1

Оценки новой глобальной модели Sandwell and Smith v.32 по результатам сравнения с морскими площадными съемками ИФЗ РАН

Полигон, структура (характеристики съемок: кол-во пересечений; СКП, мГал)	Максимальный градиент АСТ, мГал/км	Мин., мГал	Макс., мГал	СКО, мГал
Баренцево море, абиссальная равнина (262; 0.35)	2	-1.7	2,8	0,7
Индийский океан, абиссальная равнина (63; 0.42)	4	-5,6	3,0	1,1
Северный Ледовитый океан, 78° с.ш., склон котловины (21; 0.38)	8	-7,4	6,9	1,8
Атлантический океан, континентальный склон (75; 0.47)	9	-13.4	5,9	1,6
Индийский океан, континентальный склон (184; 0.38)	11	-9,6	4,3	1,5
Южный океан, 68° ю.ш., континентальный склон Антарктиды (151; 0.51)	23	-17,6	34,4	3,3
Индийский океан, Срединно-океанический хребет (125; 0.47)	24	-11,8	17,5	2,5

Из рис. 1 и табл. 1 следует, что точность современных моделей ГПЗ в Мировом океане зависит от градиента АСТ. Вместе с тем на практике случайная погрешность морской гравиметрической съемки, определяемая по внутренней сходимости съемочных профилей, как правило, не должна превышать 1 мГал, а систематическая погрешность, определяемая по результату независимого контроля, не должна превышать 0,5 мГал. Как видно по приведенным выше оценкам, имеющиеся модели пока не обладают такими точностями. В наибольшей степени все исследуемые модели удовлетворяют требованиям только в районе абиссальных равнин с градиентом поля, не превышающим 2 мГал/км.

Возможности применения данных морских гравиметрических съемок для оценки и коррекции глобальных моделей ГПЗ над градиентными структурами Мирового океана

Доля акватории Мирового океана с горизонтальным градиентом АСТ более 2 мГал/км не превышает 20% его площади [12]. При этом имеющие наибольший градиент аномалии относятся к континентальным склонам, тектоническим разломам и хребтам.

На акваториях с выраженными градиентными структурами поля в результате сглаживания альтиметрических измерений амплитуды высоких частот реальных аномалий в моделях подавляются. С учетом стандартного подхода к обработке данных спутниковой альтиметрии в рамках одной модели, который предполагает подбор параметров для достаточно большого региона, можно предположить, что у всей площади или структуры в этой модели указанные параметры одинаковые. Соответственно, данные модели на этой площади содержат общую погрешность, связанную с особенностями обработки альтиметрических измерений. Такая погрешность может быть выявлена по данным морской гравиметрии: маршрутным съемкам через интересующую площадь или отдельным рекогносцировочным профильным съемкам.

Чтобы проанализировать возможность использования ограниченного объема съемочных данных для выявления и учета погрешности данных модели о ГПЗ в градиентных районах Мирового океана, был рассмотрен участок съемки над Срединно-океаническим хребтом размером $\approx 100 \times 200$ км. Максимальный градиент аномального поля на тестовом полигоне составил 24 мГал/км, средний – 4 мГал/км.

Ранее на полигоне с участием специалистов ИФЗ РАН была выполнена высокоточная морская площадная съемка, предельная погрешность которой по внутренней сходимости в 125 точках пересечений – $\pm 0,5$ мГал. В рамках съемки были выполнены измерения на 38 профилях с межпрофильным расстоянием 7 км. Такая съемка может считаться надежным эталоном для оценки аномалий в моделях.

Для эксперимента были взяты четыре тестовых профиля съемки, их расположение на фоне изолиний АСТ по данным модели показано на рис. 2. Вдоль этих профилей для каждого пункта из каталога съемки по координатам были получены соответствующие им данные модели Sandwell and Smith v.32. Затем были определены разности между измеренными и модельными данными и выполнен их спектральный анализ. Таким образом, были найдены наиболее подавленные в результате обработки данных альтиметрии пространственные частоты реальных аномалий на каждом тестовом профиле.

Тестовые профили были выбраны так, чтобы получить представление о частотном составе погрешностей во всех частях полигона. Они проходят через разные по

величине и протяженности аномалии. На графиках зависимости амплитуд сигнала в разностях «измерения–модель» от длин волн аномалий, приведенных на рис. 3, выделен общий для всех тестовых профилей диапазон длин волн, который содержит наибольшую погрешность данных в модели – от 13 до 20 км. Ширина пространственного диапазона длин волн аномалий с общей погрешностью модели зависит от количества тестовых профилей, размера полигона и расчлененности самого поля.

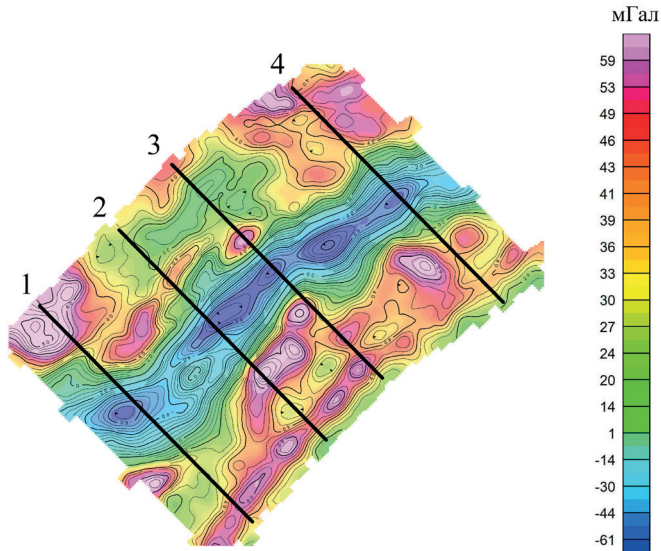


Рис. 2. АСТ по данным модели Sandwell and Smith v.32 на полигоне над Срединно-океаническим хребтом. Черными линиями показаны выбранные тестовые профили

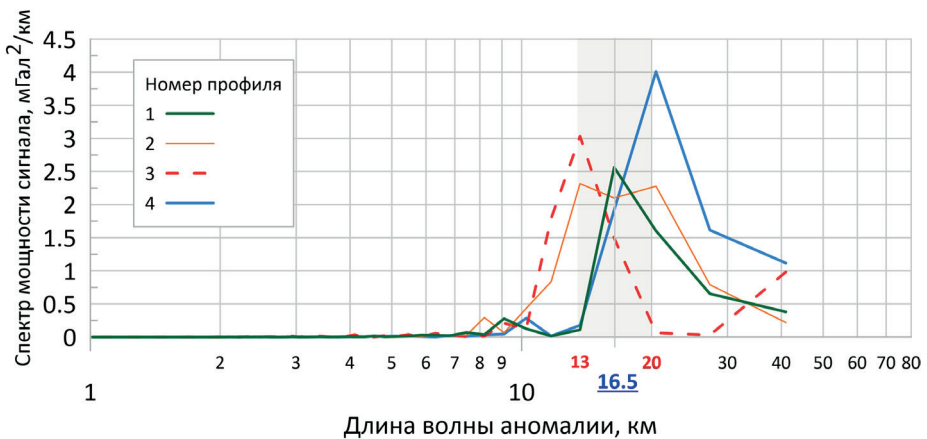


Рис. 3. Графики зависимости спектральной плотности мощности разностей «съемка–модель» по тестовым профилям от длин волн аномалий. Выделен диапазон длин волн 13–20 км с повышенной погрешностью

Далее необходимо оставить в данных модели вдоль тестовых профилей только диапазон длин волн аномалий, содержащий повышенную погрешность, а затем ввести полученные аномалии как поправки в исходное модельное поле и таким образом до некоторой степени восстановить амплитуды наиболее подавленных аномалий

в модели. Для универсального выделения аномалий в модели в определенном диапазоне длин волн целесообразно использовать метод фильтрации данных с последующим вычитанием полученного результата из исходного массива.

В описываемом примере для дальнейшего восстановления высоких частот аномалий модели выбрана средняя длина волны из определенного ранее диапазона, равная 16,5 км. Для универсального выделения пространственных частот аномалий и их восстановления было использовано звено из фильтра Баттерворта

$$L(k) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k_c}\right)^n},$$

где $L(k)$ – величина среза фильтра; k и k_c – длина волны выделяемой аномалии и заданной центральной длины волны, км (16,5 км); n – порядок фильтра и фильтра нижних частот с пространственной частотой среза 3 км для подавления остаточной коротковолновой помехи после использования фильтра Баттерворта (см. рис. 4). Эта помеха обусловлена погрешностью интерполирования данных модели на профиль морской съемки, выполненной с дискретностью в 10 с (т.е. около 50 м), что значительно выше собственного пространственного разрешения глобальной модели.

Порядок фильтра Баттерворта был подобран эмпирически так, чтобы получить минимальную СКО относительно съемки на каждом из четырех тестовых профилей. Выбор порядка фильтра для первичного выделения пространственных частот аномалий приведен в табл. 2. Амплитудно-частотная характеристика используемой комбинации фильтров показана на рис. 4.

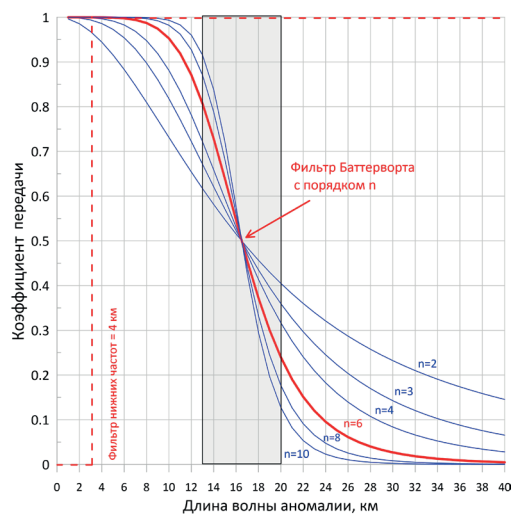


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика комбинации фильтров, примененных для выделения диапазона длин волн с повышенной погрешностью на тестовых профилях

Таблица 2

Результаты подбора параметров высокочастотной фильтрации и восстановления высоких частот на тестовых профилях и всем полигоне в районе Срединно-океанического хребта

Профиль (длина)	СКО до коррекции, мГал	СКО с разным порядком (n) фильтра Баттерворта после восстановления частот, мГал				
		n = 2	n = 4	n = 6	n = 8	n = 10
1 (150 км)	1,7	2,1	1,5	1,5	1,6	1,6
2 (150 км)	2,6	2,6	2,0	2,0	2,1	2,2
3 (150 км)	2,8	3,5	2,2	2,0	2,1	2,1
4 (150 км)	2,1	2,5	1,9	1,8	1,8	1,8
Весь полигон	2,5	2,8	2,0	1,9	2,0	2,0

Пример графиков измеренного, модельного и скорректированного модельного полей вдоль тестового профиля 2 показан на рис. 5. После определения параметров для выделения частот подавленных аномалий в модели и их частичного восстановления вдоль тестовых профилей такая же операция применяется уже ко всем модельным данным на тестовом полигоне. Затем выполняется оценка с использованием полного набора съемочных данных. В результате погрешность модели Sandwell and Smith v.32 относительно высокочастотной съемки уменьшилась с 2,5 мГал до 1,9 мГал, то есть на 24%.

Заметим, что при применении описанного подхода к данным более ранней модели – Sandwell and Smith v.29 (2019) ее погрешность уменьшалась на 40%: с 3,2 мГал до тех же 1,9 мГал.

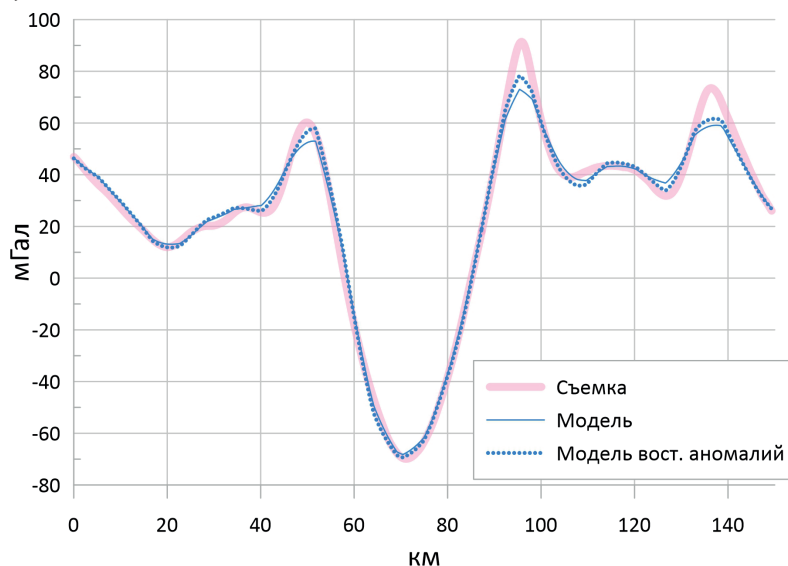


Рис. 5. Графики съемки на тестовом профиле 2 модели Sandwell and Smith v.32 до и после восстановления высоких частот

Возможности применения данных морских гравиметрических съемок для оценки и коррекции глобальных моделей ГПЗ над абиссальными равнинами в Мировом океане

На абиссальных равнинах точность альтиметрических моделей заметно выше. На структурах с горизонтальным градиентом до 4 мГал/км погрешность большинства современных моделей стабильно находится в пределах 1,5 мГал. На некоторых участках с максимальным градиентом до 2 мГал/км точность может достигать 1 мГал или даже немного лучшего значения (при этом, как показали оценки ИФЗ РАН, не более 0,7 мГал [12]).

Вместе с тем следует заметить, что в данных моделей над абиссальными структурами присутствует высокочастотный шум с амплитудой до 2 мГал [2]. Такая помеха является знакопеременной, поэтому хотя она и снижает точность определения аномалий в модели, но не заметна при оценке относительно площадных съемок. При этом она хорошо видна при построении графиков съемки и в данных модели вдоль одного профиля. Кроме того, высокочастотная помеха, в размахе достигающая 4 мГал, делает

любые трансформации модельного поля над абиссальной равниной некорректными и неэффективными при решении прямых и обратных гравиметрических задач.

Апробация приема фильтрации данных модели на градиентах поля в пределах 2 мГал/км проводилась на тестовом полигоне в Индийском океане размером $\approx 185 \times 230$ км с максимальным градиентом аномального поля 2,7 мГал/км и средним – 0,8 мГал/км. Ранее на полигоне с участием специалистов ИФЗ РАН также была выполнена высокоточная морская площадная съемка. Предельная погрешность съемки по внутренней сходимости в 63 точках пересечений составила $\pm 0,5$ мГал.

Для выделения спектра высокочастотной помехи выбрано 3 съемочных профиля длиной от 170 до 250 км, проходящих через наименее градиентные участки района. Расположение полигона и выбранных профилей относительно градиентных структур показано на рис. 6.

Вдоль этих профилей были построены спектры измеренных данных и данных модели Sandwell and Smith v.32. Определен общий пространственный диапазон шумовой помехи – от 7 до 40 км. Выделенная в данных модели полоса шума позволяет применить к ним полосовой фильтр, исключить помеху и улучшить модельные данные вдоль каждого профиля и на полигоне в целом.

Для исключения помехи был использован полосовой фильтр с дополнительным сглаживанием полученного результата низкочастотным фильтром Баттерворта 3-го порядка. Результат фильтрации высокочастотной помехи приведен в табл. 3. Погрешность модели Sandwell and Smith v.32 над абиссальной равниной относительно высокоточной съемки уменьшилась с 1,1 мГал до 0,8 мГал, или на 27%. Пространственные спектры, а также графики АСТ съемки и моделей до и после фильтрации показаны на рис. 7, а и б соответственно.

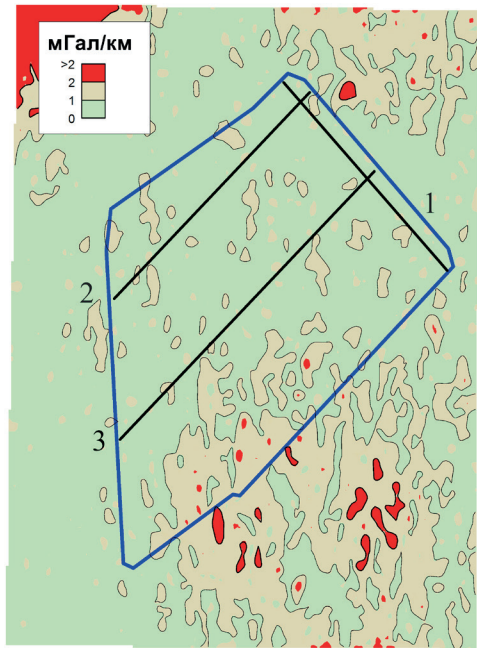


Рис. 6. Горизонтальный градиент по данным модели Sandwell and Smith v.32 в районе тестового полигона, граница обозначена синим контуром. Черными линиями помечены профили съемки, проходящие через наименее градиентные участки поля

Таблица 3

Результаты фильтрации высокочастотного шума на тестовых профилях и всем полигоне в районе абиссальной равнины

Профиль (длина)	СКО до коррекции, мГал	СКО после коррекции, мГал
1 (170 км)	0,8	0,5
2 (200 км)	0,8	0,5
3 (250 км)	0,9	0,7
<i>Весь полигон</i>	<i>1,1</i>	<i>0,8</i>

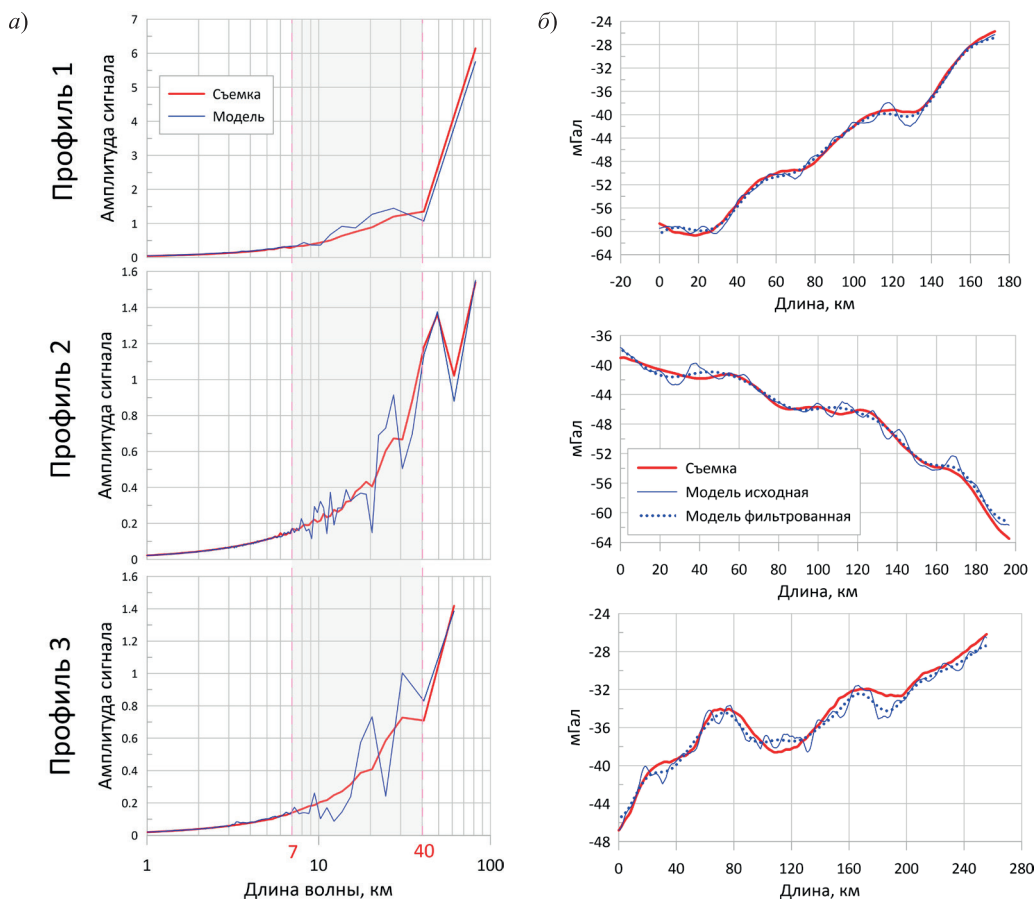


Рис. 7: а) результат спектрального анализа – графики зависимости амплитуды сигнала от длин волн вдоль тестовых профилей; б) графики изменения АСТ в данных съемки на тестовых профилях и в данных модели Sandwell and Smith v.32 до и после фильтрации высокочастотного шума

Обсуждение результатов

В результате проверки предложенных приемов использования ограниченного количества данных морских съемок для улучшения спутниковых моделей ГПЗ выявлено, что на высокоградиентном участке аномального поля возможно получить региональную модель более чем на 20% точнее оригинальных модельных данных на этом же участке.

На абиссальной равнине точность возросла на 27% процентов, что обусловлено исключением высокочастотной шумовой помехи из данных модели. Благодаря спектральному анализу на профилях, проходящих через самые спокойные области поля на тестовом полигоне, в результате фильтрации в данных модели не подавлены элементы реальных аномалий поля. Остаточные отклонения здесь являются следствием разницы в точностях методов спутниковой альтиметрии и морской гравиметрической съемки.

Положительный результат был получен с использованием ограниченного количества съемочных профилей. Их расположение объясняет логику планирования измерений для рекогносцировки и оценки модельного поля с перспективой его дальнейшего улучшения. В градиентных районах целесообразно планировать линии съемки с курсами, перпендикулярными к простираению наиболее выраженных аномалий или близкими к ним, а также пересекающими самые градиентные участки этих аномалий. В абиссальных

областях наоборот: для оценки и выделения высокочастотных помех рекогносцировочный профиль следует прокладывать через области с наименьшим предполагаемым градиентом аномального поля, априорно вычисленным, например, по данным глобальной альтиметрической модели ГПЗ.

Заключение

Многие задачи гравиметрии, такие как, например, моделирование тектоносферы [18], глобальные вопросы геодинамики [1] и др., не решаются с помощью морских гравиметрических съемок, поэтому данным глобальных моделей в таких случаях часто нет альтернативы. Тем не менее в распоряжении исследователей могут быть маршрутные съемки, выполненные в интересующем их районе. Если данные этих съемок считать надежными, они могут использоваться для оценки и определения погрешностей в моделях и их улучшения в региональных масштабах. Как показали описанные в статье эксперименты, предложенные подходы позволяют повысить точность современных моделей на 20-30%.

Вместе с тем необходимо отметить, что развитие технологии самой альтиметрии и способов ее комплексной обработки направлено на постепенное уменьшение погрешностей и шумов. Так, при создании новых версий альтиметрических моделей ГПЗ используются дополнительные наборы актуальных спутниковых данных, что позволяет получать более высокую достоверность моделей [19].

Согласно представленным оценкам, современные модели ГПЗ по своим характеристикам еще не могут заменить морские гравиметрические съемки. При этом очевидно, что с ростом точности глобальных моделей в Мировом океане будут расширяться возможности и направления их применения. При этом для их эффективного использования в настоящее время необходимо учитывать априорную информацию морских гравиметрических съемок, даже в небольшом объеме полученную в районе потенциального привлечения данных об аномалиях модельного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта 22-17-20035.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sandwell, D.T.**, *Advanced Geodynamics: The Fourier Transform Method*, Cambridge: Cambridge University Press, 2022, 284 p., doi: 10.1017/9781009024822.
2. **Barthelmes, F.**, *Global Models. Encyclopedia of Geodesy*, edited by Grafarend, E., Springer International Publishing, 2014, 1–9, doi:10.1007/978-3-319-02370-0_43-1.
3. **Andersen, O.B.**, Marine Gravity and Geoid from Satellite Altimetry. Geoid Determination – Theory and Methods, *Lecture Notes in Earth Science*, 2013, vol. 110, pp. 401–451.
4. **Бехтерев С.В., Дробышев М.Н., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н.** Погрешности моделей гравитационного поля Земли в зависимости от морфологии рельефа дна океана // *Физика Земли*. 2019. №5. С. 118–122. DOI: 10.31857/S0002-333720195118-122.
5. **Конешов В.Н., Дробышев Н.В., Железняк Л.К., Клевцов В.В., Соловьев В.Н.** Методы и проблемы изучения гравитационного поля Мирового океана // *Геофизические исследования*. 2006. №5. С. 32–54.
6. **Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н.** Использование модели гравитационного поля Земли при измерениях силы тяжести на море // *Физика Земли*. 2015. №4. С. 103–110. DOI: 10.7868/S0002333715040134.
7. **Li, J., Sideris, M.G.**, Marine gravity and geoid determination by optimal combination of satellite altimetry and shipborne gravimetry data, *Journal of Geodesy*, 1997, vol. 71, no.4, pp. 209–216, doi: 10.1007/s001900050088.
8. **Tziavos, I.N., Forsberg, R., Siders, M.G.**, Marine gravity field recovery by combining satellite altimetry and shipborne gravimetry, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 219–226.

9. Vergos, G.S., Grebenitcharsky, R.S., Sideris, M.G., Combination of Multi-Satellite Altimetry and Shipborne Gravity Data for Geoid Determination in a Coastal Region of Eastern Canada, *International Service for the Geoid (IGeS)*, Bulletin no. 12, 2002, pp. 3–17.
10. Wan, X., Hao, R., Jia, Y., Wu, X., Wang, Y., Feng, L., Global marine gravity anomalies from multi-satellite altimeter data, *Earth, Planets and Space*, 2022, vol. 74, 165, doi: 10.1186/s40623-022-01720-4.
11. Kamto, P.G., Yap, L., Nguiya, S., Kande, L.H., Kamguia, J., Evaluation of latest marine gravity field models derived from satellite altimetry over the Gulf of Guinea (Central Africa) with shipborne gravity data, *Stud. Geophys. Geod.*, 2022, vol. 66, pp. 23–37, doi:10.1007/s11200-021-0157-y.
12. Михайлов П.С., Конешов В.Н., Соловьев В.Н., Железняк Л.К. Новые результаты оценок современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля в Мировом океане // *Гироскопия и навигация*. 2022. Том 30. №4. С. 36–53. DOI: 10.17285/0869-7035.00102.
13. Евстифеев М.И., Краснов А.А., Соколов А.В., Старосельцева И.М., Элинсон Л.С., Железняк Л.К., Конешов В.Н. Гравиметрический датчик нового поколения // *Измерительная техника*. 2014. №9. С. 12–15.
14. Соколов А.В., Краснов А.А. Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // *Гироскопия и навигация*. 2015. №2 (89). С. 118–131. DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.2.117-130.
15. Sandwell, D.T., Harper, H., Tozer, B., Smith, W.H.F., Gravity field recovery from geodetic altimeter missions, *Advances in Space Research*, 2021, vol. 68, issue 2, pp.1059–1072, doi: 10.1126/science.1258213.
16. Yao Yu, Sandwell, D.T., Gille, S.T., Villas Boas, A.B., Assessment of ICESat-2 for the recovery of ocean topography, *Geophysical Journal International*, 2021, vol. 226, issue 1, pp. 456–467, doi: 10.1016/j.asr.2019.09.011.
17. Balmino, G., Vales, N., Bonvalot, S., Briais, A., Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies, *Journal of Geodesy*, 2012, no 86, pp. 499–520.
18. Рыжова Д.А., Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Бульчев А.А. Геолого-геофизическое строение тектоносферы Мозамбикского и Мадагаскарского хребтов // *Геофизические исследования*. 2021. Т. 22. № 3. С. 53–69. DOI: 10.21455/gr2021.3-4.
19. Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E., Francis, R., New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure, *Science*, 2014, vol. 346, no. 6205, pp. 65–67, doi: 10.1126/science.1258213.

Mikhailov, P.S. (Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Vladimir State University Named after Alexander and Nikolay Stoletov, Vladimir, Russia)

Use of Marine Gravimetric Survey Data for Correcting the Satellite Models of the Global Gravity Field in the World Ocean, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 3 (122), pp. 66–77.

Abstract. The article studies the possibilities of using the high-precision marine gravimetric survey data to correct the global models of the Earth's gravity field in the World Ocean. The accuracy of modern models in water areas on a regional scale is determined by the capabilities of the satellite altimetry method and depends on the gravity field characteristics. On the gradient structures of the field, the amplitudes of real anomalies are suppressed in the models; therefore, for the models to be used more efficiently, it is necessary to restore high frequencies of anomalies in these models. On the abyssal structures, the main error in models is high-frequency noise. This paper describes the techniques for correcting the data obtained from these models, which makes it possible to increase the accuracy over fairly large areas, using a limited number of marine gravimetric measurements. The paper also provides the practical assessments of the new global altimetry model of the Earth's gravity field Sandwell and Smith v32 in various regions of the World Ocean.

Key words: marine gravimetry, global gravity field models, satellite altimetry, the World Ocean.

Материал поступил 28.06.2023