

П.С. МИХАЙЛОВ, В.Н. КОНЕШОВ, В.Н. СОЛОВЬЕВ, Л.К. ЖЕЛЕЗНЯК

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК СОВРЕМЕННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ УЛЬТРАВЫСОКОСТЕПЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

С ростом точности и детальности современных глобальных моделей гравитационного поля Земли появляется больше возможностей их использования для решения региональных гравиметрических задач. При этом большее значение приобретают оценки имеющихся моделей в зависимости от региона и геоморфологии, а также способы прогнозирования достоверности данных в моделях с учетом масштаба и характера решаемой задачи. Статья посвящена новым оценкам современных моделей гравитационного поля в различных регионах Мирового океана и над различными геоморфологическими структурами. Оценки получены путем сравнения данных наиболее актуальных моделей гравитационного поля с данными высокоточных морских площадных и маршрутных съемок, выполненных во всех основных акваториях Мирового океана. Полученные результаты характеризуют модельное поле как перспективное и позволяют оценить пространственное распределение его погрешностей в Мировом океане. Предложен способ эффективного предварительного районирования модельного поля в океане. Рассмотрены особенности развития моделей гравитационного поля Земли с учетом их фактических точностей и разрешающих способностей, а также вопрос общей достоверности современных модельных данных в высокоширотной Арктике.

Ключевые слова: морская гравиметрия, ультравысокостепенные глобальные модели, спутниковая гравиметрия, оценки точности, гравитационное поле, Мировой океан.

Введение

Гравитационное поле Мирового океана считается наиболее изученным на Земле. Современные морские гравиметрические съемки обладают высоким пространственным разрешением и позволяют с достаточно высокой точностью картировать как отдельные геологические структуры, так и целые области в океане. Такие съем-

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

Конешов Вячеслав Николаевич. Доктор технических наук, руководитель научного направления, ИФЗ РАН; ВлГУ. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Соловьев Владимир Николаевич. Старший научный сотрудник, ИФЗ РАН; ВлГУ.

Железняк Леонид Кириллович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, ИФЗ РАН.

Статья по докладу на 15-й Мультиконференции по проблемам управления, 2022 г.

ки востребованы и применяются для решения научных, геологических и специальных задач, но в масштабах всего Мирового океана объем инструментальных измерений соответствующей точности неравномерен. На некоторых участках акваторий, например с известными или потенциальными залежами углеводородов, гравитационное поле Земли (ГПЗ) достаточно хорошо изучено, а в других, значительных по площади и отдаленных регионах площадная морская гравиметрическая съемка не выполнялась. Кроме того, съемки производятся разными исполнителями, для различных задач и, как следствие, не создают единого и равноточного покрытия даже в региональных масштабах за исключением некоторых областей, перспективных для добычи полезных ископаемых. В связи с этим в настоящее время все большее распространение получают ультравысококачественные глобальные модели ГПЗ, предоставляющие данные об аномалиях силы тяжести (АСТ) на все акватории Мирового океана в виде наборов сферических коэффициентов или в виде регулярных сеток (гридов) [1].

Первая ультравысококачественная глобальная модель EGM2008 [2] была представлена в апреле 2008 г. на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле в Вене. Эта модель, разработанная Национальным агентством геопространственной разведки США (NGA), содержит 2190 сферических гармоник, то есть предоставляет данные о ГПЗ по всей Земле с пространственным разрешением 5'. При вычислении модели EGM2008 использовался подход, когда спутниковая информация, полученная по данным миссии GRACE, определяет только низкостепенную составляющую модельного поля, а высокостепенное разрешение зависит от массива разнородной и разноточной гравиметрической информации, главным образом полученной методом спутниковой альтиметрии. На подобном принципе основано большинство современных высокостепенных моделей ГПЗ [3].

За последующие 12 лет, с 2008 по 2020 год, пространственное разрешение данных в глобальных моделях ГПЗ выросло в 5 раз: с 5' в EGM2008 до 1' в последней модели семейства Sandwell and Smith, презентованной осенью 2020 года [3]. С ростом разрешающей способности и общей достоверности новых моделей ГПЗ расширяется область их возможного практического использования. При этом одной из их особенностей является разная пространственная достоверность данных, что обусловлено комбинационным способом их вычисления и региональными особенностями основного источника данных в высоких частотах АСТ – спутниковой альтиметрии.

Для применения данных современных моделей ГПЗ при решении научных и практических задач актуальным становится вопрос анализа их фактической точности и пространственной разрешающей способности в различных регионах Мирового океана и над различными геоморфологическими структурами. Актуальным является также вопрос априорной оценки модельных данных с районированием модельного поля в зависимости от характера решаемых задач и особенностей гравитационного поля на исследуемой площади. Исследованию этих актуальных вопросов посвящена настоящая статья.

Практические оценки точности моделей гравитационного поля в разных регионах Мирового океана

Основным методом определения АСТ на акваториях Мирового океана в средних и высоких частотах (в пределах 60 км) в глобальном масштабе в настоящее время

является спутниковая альтиметрия. Соответственно, ее погрешности – это основные источники погрешностей данных в моделях на этих частотах, что во многом определяет географию и их применимость. Спутниковые радары-альтиметры с высокой частотой опроса и большой разрешающей способностью позволяют получить новые, более точные данные о топографии поверхности акваторий [4]. Характер и структура отраженного радиолокационного сигнала альтиметра определяются типом подстилающей поверхности, поэтому известны области с потенциально более низким качеством альтиметрических и, как следствие, гравиметрических модельных данных на акваториях – в зоне перехода «суша–море», на мелководье, в области субдукции и островных дуг, на участках с ледовым покровом (высокие широты).

Наиболее эффективный и простой способ оценки модельного поля заключается в сравнении модельных данных с высокоточными площадными морскими гравиметрическими съемками [5, 6].

В ИФЗ РАН был проведен масштабный эксперимент по сопоставлению современных моделей ГПЗ и площадных морских гравиметрических съемок, выполненных в диапазоне широт от 70° ю.ш. до 75° с.ш. над разными градиентными геологическими структурами Мирового океана. Были использованы четыре ультравысокостепенные глобальные модели ГПЗ – EGM2008, WGM2012, XGM2019, Sandwell and Smith v29.1 и SGG-UGM-2, выбор которых обусловлен как их известностью и популярностью у ряда исследователей в области наук о Земле ([7, 8] и другие), так и хронологией их появления. В результате были рассмотрены наиболее актуальные для своего времени модели и показан вклад метода спутниковой альтиметрии в повышение точности представления АСТ в модельных данных.

Выбранные модели ГПЗ имеют следующие характеристики:

- EGM2008 – широко известная глобальная сферическая модель, имеет разрешение 2190 гармоник поля, что соответствует пространственному разрешению $5'$, или ≈ 10 км;
- WGM2012 – французская модель, объединяющая EGM2008 и альтиметрическую модель DTU10; имеет пространственное разрешение $2'$ или ≈ 4 км [9];
- XMG2019 – развитие модели XMG2016, в которой данные спутниковых миссий GRACE и GOCE были объединены с большим объемом морских гравиметрических съемок. В XGM2019 наземные данные были дополнены аномалиями, вычисленными на суше из топографии по модели рельефа EARTH2014, а на океанах – по спутниковой альтиметрии, взятой из модели DTU13. Модель XMG2019 посчитана в модификациях с 760, 2190 и 5540 гармониками поля, в настоящей работе рассмотрена модификация, содержащая 2190 коэффициентов [10];
- Sandwell and Smith v29.1 (2020) – американская модель, содержащая данные об аномалиях ГПЗ, полученных на океанах из альтиметрических решений миссий Envisat, CryoSat-2, Jason-1 и др., а над сушей – из модели EGM2008; имеет пространственное разрешение $1'$, или ≈ 2 км [11];
- SGG-UGM-2 (2020) – китайская глобальная модель, второе поколение модели SGG-UGM (2018); построена по улучшенным за счет спутникового нивелирования данным EGM2008 на континентах, данным спутниковой градиентометрии (GRACE) и морских гравиметрических съемок; представлена в виде набора коэффициентов разложения до 2190 степени ($5' \times 5'$) [12].

Статистические оценки глобальных моделей по результатам сравнения с площадными морскими гравиметрическими съемками

Полигон	Широта полигона	Макс. градиент АСТ (мГал/км)	Модель	Разность АСТ (мГал)			
				Мин.	Макс.	Среднее	СКО
Восточная часть Баренцева моря	75° с.ш.	2	EGM2008	-2,4	2,8	0,5	0,8
			WGM2012	-1,9	2,7	0,6	0,7
			XGM2019	-3,6	2,3	-0,5	0,9
			SSv29.1	-2,8	2,3	0,0*	0,7
			SGG-UGM-2	-3,3	1,6	-0,8	0,7
Бенгальский залив, Индийский океан	15° с.ш.	4	EGM2008	-6,8	5,4	-1,4	1,3
			WGM2012	-6,3	5,3	-1,4	1,3
			XGM2019	-6,9	2,8	-1,7	1,2
			SSv29.1	-6,0	3,9	-1,4	1,2
			SGG-UGM-2	-7,9	4,6	-1,5	2,0
Северный Ледовитый океан	78° с.ш.	8	EGM2008	-7,8	12,7	-0,6	3,1
			WGM2012	-8,0	12,5	-0,8	2,7
			XGM2019	-7,1	11,8	-1,1	2,5
			SSv29.1	-8,1	5,5	0,0*	1,9
			SGG-UGM-2	-7,0	8,2	-0,7	1,9
Континентальный склон Канады, Атлантический океан	46° с.ш.	9	EGM2008	-21,3	8,9	-2,2	2,5
			WGM2012	-20,3	10,0	-2,1	2,2
			XGM2019	-21,0	8,8	-2,2	2,3
			SSv29.1	-14,2	7,8	-2,2	1,9
			SGG-UGM-2	-19,2	7,3	-2,2	2,3
Континентальный склон Австралии, Индийский океан	39° ю.ш.	10	EGM2008	-13,2	10,3	-1,8	2,8
			WGM2012	-12,9	8,0	-1,7	2,7
			XGM2019	-12,2	8,1	-2,1	2,1
			SSv29.1	-8,5	5,0	-1,3	2,0
			SGG-UGM-2	-11,4	6,1	-2,0	2,6
Континентальный склон Антарктиды, море Беллингаузена	68° ю.ш.	23	EGM2008	-17,0	33,2	0,7	4,5
			WGM2012	-17,6	34,0	0,8	3,8
			XGM2019	-22,6	32,7	-0,1	6,2
			SSv29.1	-21,1	34,5	-0,2	2,9
			SGG-UGM-2	-17,5	34,7	1,5	3,0
Срединно-океанический хребет, Индийский океан	26° с.ш.	24	EGM2008	-17,9	33,5	-0,1	5,5
			WGM2012	-17,3	28,3	-0,4	4,3
			XGM2019	-16,8	31,7	-0,3	5,1
			SSv29.1	-12,3	20,4	-0,5	3,2
			SGG-UGM-2	-19,6	25,8	-0,7	3,9

*Примечание. Средний уровень съемки, относительно модели равный 0,0, означает, что уровень съемки приведен к модели SSv29.1, поскольку для данной площадной съемки отсутствует известное опорное значение.

Сравнительные оценки этих моделей с площадными морскими гравиметрическими съемками, характеризующимися среднеквадратической погрешностью (СКП) определения АСТ не более 0,5 мГал, на разных широтах и разных геоморфологических структурах приведены в табл. 1. Жирным шрифтом в таблице выделены модели, показывающие наилучшую достоверность на каждом оценочном морском полигоне.

Из табл. 1 видно, что при низких градиентах поля все сравниваемые модели показывают близкую точность относительно инструментальной съемки. Тем не менее с ростом величины градиента и сложности поля расхождение по точности между моделями ГПЗ увеличивается и на сложной структуре, например Срединно-океаническом хребте, достигает 20-30% и более. Показано также, что наиболее точной и достоверной глобальной моделью гравитационного поля на большинстве акваторий в настоящее время является Sandwell and Smith v29.1. Отдельно надо отметить неожиданно плохую достоверность данных XGM2019 в антарктическом регионе.

Кроме того, было выявлено, что погрешности современных глобальных моделей ГПЗ практически на всех океанических акваториях зависят в большей степени от величины горизонтального градиента самого аномального поля, а не от широты. Полный горизонтальный градиент поля в рамках данного исследования вычислялся как результирующая горизонтальных производных поля АСТ по направлению координатных осей:

$$\nabla f = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\left(\frac{df}{dx}\right)^2$ – вторая производная поля АСТ по оси x (юг – север);

$\left(\frac{df}{dy}\right)^2$ – вторая производная поля АСТ по оси y (запад – восток).

Так как основной массив модельных данных на коротких частотах (с шагом менее 30 км) получен методом спутниковой альтиметрии, рост СКП моделей на градиентных участках поля является следствием особенностей этого метода и его обработки. Погрешность определения АСТ методом спутниковой альтиметрии можно разделить на суммарную погрешность единичного измерения и погрешности их последующей обработки. Согласно [13], погрешность одного альтиметрического измерения включает следующие составляющие:

$$e = e_{\text{orbit}} + e_{\text{tides}} + e_{\text{range}} + e_{\text{retrack}} + e_{\text{environment}} + e_{\text{noise}}, \quad (2)$$

где e_{orbit} – погрешность определения эфемерид спутников; e_{range} – погрешность дальности; e_{retrack} – погрешность схождения повторных измерений; e_{tides} – погрешность приливного эффекта; $e_{\text{environment}}$ – погрешность из-за наличия морского льда или берега; e_{noise} – дополнительный шум измерений.

Первая группа погрешностей (e_{orbit} , e_{range} , e_{retrack}) определяет глобальную точность метода, а вторая (e_{tides} , $e_{\text{environment}}$, e_{noise}) обуславливает его региональную неравноточность и пространственные ограничения.

Один из основных источников погрешностей, возникающих в процессе обработки альтиметрических данных, – параметры фильтрации [13]. В альтиметрических

измерениях присутствует шум, вызванный рядом факторов. Его сглаживание осуществляется с помощью специального адаптивного фильтра, в котором используется эмпирический параметр, настраиваемый по локальным характеристикам поля. Глобально параметр фильтрации варьируется по ширине окна от 5 до 16 км и определяет разрешение получаемых в итоге данных. При этом его максимальное значение применяется там, где белый шум в измерениях априорно выше: области севернее 75° с.ш., прибрежные и градиентные зоны. Фильтрация подавляет высокочастотные составляющие модельных АСТ и снижает достоверность данных. На больших градиентах АСТ такой эффект проявляется в большей степени.

С повышением инструментальной точности альтиметрического метода и с ростом количества повторных альтиметрических измерений сокращаются амплитуды шумов в получаемых данных о поверхности акваторий, что позволяет уменьшить окно фильтрации, следовательно, увеличивается точность модельных данных, особенно в градиентных районах. Последнее утверждение подтверждено данными, приведенными в табл. 1: на более высоких градиентах поля точность новых моделей ГПЗ, содержащих больший объем новых альтиметрических измерений, по сравнению с более ранними моделями существенно возрастает.

Еще одним характерным примером роста качества и достоверности альтиметрической информации в новых моделях ГПЗ является восточная часть Черного моря. Этот регион традиционно считается сложным для спутниковых измерений АСТ в силу того, что в области крутого континентального склона влияние так называемого берегового эффекта здесь усиливается распределением значительных аномалообразующих масс Кавказских гор [14].

Среднеквадратическое отклонение (СКО) данных EGM2008 относительно данных морской гравиметрической съемки составляет $\pm 11,9$ мГал с максимальными отклонениями от $-93,9$ до $+31,4$ мГал. Более современная модель Sandwell and Smith v29.1 имеет следующие оценочные характеристики: СКО $\pm 3,7$ мГал и максимальные отклонения от $-25,4$ до $+16,7$ мГал. Карты отклонения аномалий силы тяжести EGM2008 и Sandwell and Smith v29.1 от съемок в восточной части Черного моря показаны на рис. 1.

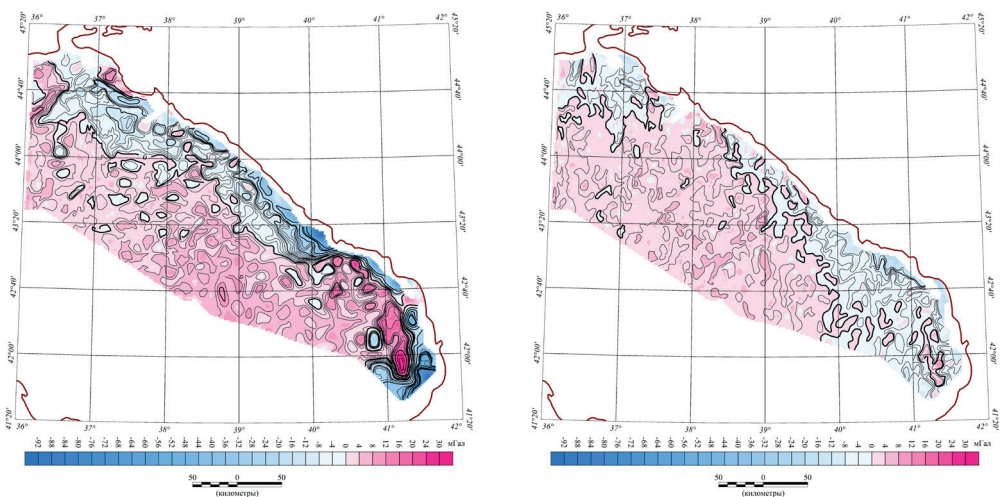


Рис. 1. Карты отклонений АСТ, полученные по данным моделей EGM2008 (слева) и Sandwell and Smith v29.1 (справа), относительно данных морских гравиметрических съемок в восточной части Черного моря

Оценки глобальных моделей в высоких широтах

В настоящее время возрастает научный и экономический интерес к полярным областям Земли. Особенно это касается Арктического региона, где в условиях интенсификации хозяйственной деятельности получение высокоточной информации об аномальном гравитационном поле на акваториях Северного Ледовитого океана снова приобретает актуальность. При этом Арктический регион, особенно в самых высоких широтах, остается недостаточно хорошо изучен в гравиметрическом отношении [15].

При проведении морских гравиметрических съемок в Арктике имеется ряд существенных специфических отличий от аналогичных работ на большинстве акваторий Мирового океана. Среди них – ограничения в маневрировании, длительный отрыв от береговых опорных пунктов, сложности навигационного обеспечения, использование полярных проекций для представления и анализа результатов и др. При этом современные требования к точности и надежности измерений диктуют необходимость развития технологий съемок, в том числе с учетом особенностей арктического региона.

В таких условиях данные глобальных моделей востребованы в качестве априорной информации о параметрах ГПЗ и как источник данных для построения мелко-масштабных региональных карт АСТ. Поскольку выполнение площадной морской гравиметрической съемки в виде регулярной сети съемочных профилей в высоких широтах и приполюсных районах Земли весьма затруднительно, важной задачей является оценка точности и пространственной разрешающей способности таких моделей. Для решения этой задачи совместно с модельными данными анализировались данные морских гравиметрических высокоширотных съёмочных профилей, полученных в разное время с использованием российских морских гравиметров «Чекан-АМ» и «Шельф-Э» [16, 17, 18].

Отметим, что метод спутниковой альтиметрии имеет повышенные погрешности при определении топографии океана, закрытого льдом и непосредственно над полюсами, поэтому в моделях, построенных по данным главным образом альтиметрии, самые высокоширотные области Земли не представлены. Например, модель Sandwell and Smith имеет ограничение по широте $\pm 80,7^\circ$. Поэтому оценки для широт выше 81° в настоящем исследовании даны только для моделей EGM2008, WGM2012 и SGG-UGM-2. Оценки получены на субширотных и на субмеридиональных профилях. Схема высокоширотных профилей, на которых выполнены сравнения с модельными данными, показана на рис. 2.

Результаты оценок по профилям приведены в табл. 2. Жирным шриф-

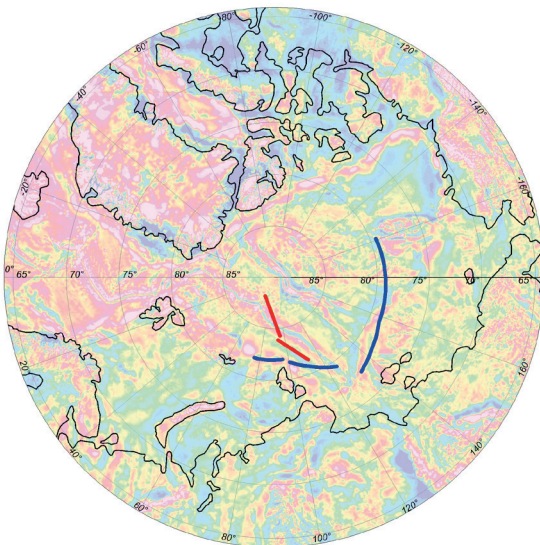


Рис. 2. Схема расположения субширотных (синие) и субмеридиональных (красные) высокоширотных профилей для оценки глобальных моделей ГПЗ в приполярной Арктике. На фоне представлено модельное поле EGM2008

том в табл. 2 также выделены модели, показывающие наилучшую достоверность на каждом полярном профиле. До широты 81° наибольшую достоверность демонстрируют модели ГПЗ Sandwell and Smith v29.1 (как и на большинстве акваторий), XGM2019 в варианте разложения в 1259 коэффициентов и новая китайская модель ГПЗ SGG-UGM-2. СКО этих моделей находятся в пределах 3 мГал. В более высоких широтах, при отсутствии данных модели Sandwell and Smith v29.1, лучшую точность продемонстрировала французская глобальная модель WGM2012, которая на акваториях содержит данные альтиметрии из модели DTU10. Новая китайская модель в высоких широтах SGG-UGM-2 показала точность на уровне модели EGM2008.

Кроме того, необходимо отметить, что из сравнения табл. 1 и 2 следует, что в настоящее время в высоких широтах те же модели на одинаковых градиентах АСТ имеют большие погрешности, чем на остальных акваториях.

Таблица 2

Оценки глобальных моделей по результатам сравнения с высокоширотными профилями

Профиль морской гравиметрической съемки	Широта и протяженность профиля	Макс. градиент поля на профиле (мГал/км)	Модель	Разность АСТ (мГал)			
				Мин.	Макс.	Среднее	СКО
Субширотный полярный профиль	77°-79° с.ш. 1500 км	3	EGM2008	-20,5	9,2	-1,5	4,1
			WGM2012	-17,4	7,4	-1,5	3,3
			XGM2019	-11,1	5,7	-1,4	2,7
			SSv29.1	-10,7	7,7	-1,7	3,0
			SGG-UGM-2	-13,8	7,0	-1,3	2,6
Субширотный полярный профиль	79°-82° с.ш. 820 км	3	EGM2008	-19,2	16,8	0,8	5,9
			WGM2012	-15,1	12,9	-0,2	3,9
			XGM2019	-12,4	13,8	0,3	4,8
			SGG-UGM-2	-19,8	18,0	0,5	5,8
Субмеридиональные полярные профили	81°-88° с.ш. 850 км	5	EGM2008	-27,0	36,9	0,8	7,2
			WGM2012	-25,6	29,9	0,1	6,3
			XGM2019	-24,2	33,4	1,6	7,7
			SGG-UGM-2	-28,4	33,6	1,1	7,1

Из анализа высокоширотных данных можно сделать вывод, что в Мировом океане даже самые современные модели наименее достоверны в полярных областях Северного Ледовитого океана, закрытых постоянным паковым льдом. Следовательно, задача высокоточного определения параметров ГПЗ в высокоширотной Арктике должна, как и прежде, решаться с использованием методов морской и аэрогравиметрической съемки. При этом на новом этапе развития методов изучения ГПЗ актуальной стано-

вится задача создания алгоритма комплексирования различных средств и методов измерения параметров поля. В качестве перспективного решения авторами настоящей статьи разрабатывается новая методика, в основе которой лежит объединение данных постоянно совершенствующихся глобальных моделей с результатами прямых инструментальных измерений, в первую очередь морских, которые являются здесь эталоном точности и разрешающей способности. Подобная методика может быть применима в любом регионе Земли, но именно в Арктике представляется крайне актуальной. Проведение маршрутных и, по возможности, площадных съемок в рамках научных экспедиций на судах ледокольного типа, а также развитие методических приемов для выполнения гравиметрических наблюдений в условиях дрейфа в период вмораживания специальных судов в приполюсных районах откроют новые возможности для уточнения параметров ГПЗ в высоких широтах и коррекции модельных данных.

Возможности районирования современных моделей

Основной интерес в практических задачах вызывает высокочастотная составляющая ГПЗ, которая в глобальных моделях на акваториях Мирового океана определяется разрешением и точностью метода спутниковой альтиметрии, поэтому неизбежно возникает проблема выявления области применимости модельных данных. Для этого представляется целесообразной разработка способа априорного нахождения районов с разной достоверностью модельных АСТ.

Из представленных выше результатов следует, что точность глобальных моделей зависит в первую очередь от градиентной составляющей самого поля. Таким образом, выполнено априорное районирование модельных данных по величине горизонтального градиента АСТ. Получено общее представление об ожидаемых областях с повышенной погрешностью модельных АСТ, обусловленной особенностями обработки спутниковой альтиметрии. Для определения соотношения более и менее градиентных областей в общеземном масштабе вычислен полный горизонтальный градиент поля Мирового океана по данным модели WGM2012. Выбор этой модели обусловлен ее высоким разрешением, глобальным охватом и наличием готового решения в виде грида с шагом географических координат $2'$.

В качестве критерия границы градиентных областей, содержащих повышенные альтиметрические погрешности, выбрано значение градиента 2 мГал/км. Такая величина согласно экспериментальным результатам, представленным выше в табл. 1, разделяет модельное поле на области с вероятной погрешностью представления реальных аномалий в пределах 1 мГал (по СКО) и с более высокой ожидаемой погрешностью модельных АСТ. В соответствии с принятыми в РФ рекомендациями по выполнению морской гравиметрической съемки масштаб отчетной гравиметрической карты устанавливается с учетом максимальных градиентов АСТ, встречающихся в пределах района работ. Так, на градиентах АСТ свыше 2 мГал/км выполняется наиболее детальная съемка с масштабом отчетной карты $1:50000$, сечением изолиний в 2 мГал и СКП аномалий в 1 мГал. То есть такое районирование в глобальном масштабе показывает области, в которых для получения данных об АСТ соответствующей точности все еще требуется выполнять морские гравиметрические съемки.

Глобальное распределение горизонтального градиента АСТ в Мировом океане показано на рис. 3.

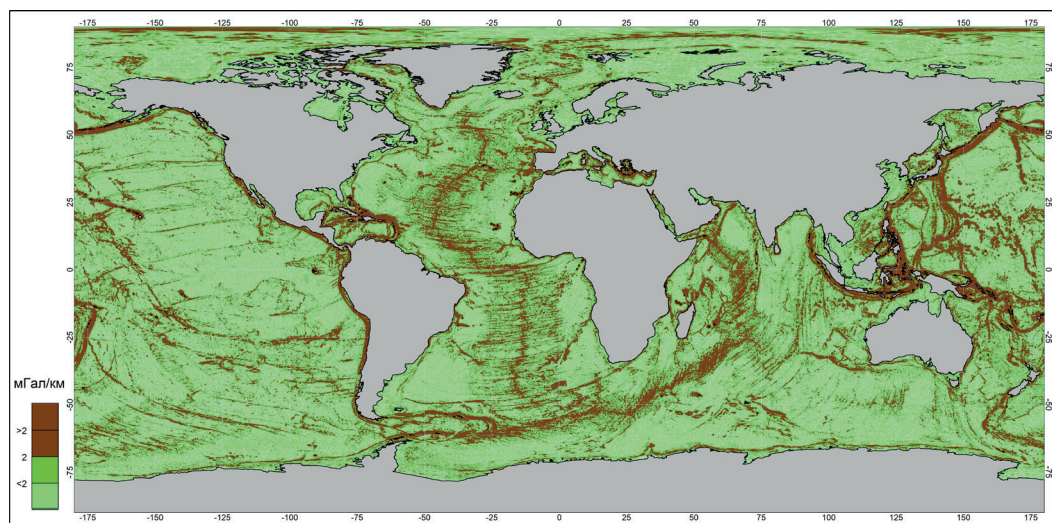


Рис. 3. Горизонтальный градиент АСТ Мирового океана по данным глобальной модели WGM2012. Здесь и далее на подобных рисунках цветовая шкала демонстрирует разделение градиентного поля на области ниже (светло-зеленые оттенки) и выше (темно-коричневые оттенки) 2 МГал/км

Такое районирование, осуществленное по отдельным акваториям, показывает приоритетные области для выполнения площадных съемок и позволяет определить количественное соотношение их площадей с размерами самих акваторий. Как видно из рис. 3, области высоких градиентов АСТ относятся к границам континентальных склонов, тектоническим разломам и зонам субдукции.

Для более наглядного представления целесообразно вычислить площадь градиентных зон в процентном соотношении. Полученные по разным акваториям результаты приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты районирования градиентного аномального поля по данным глобальной модели WGM2012

Акватория	Площадь градиентных зон относительно всей площади, не более, %
Атлантический океан	24
Индийский океан	21
Тихий (Южный) океан	19
Северный Ледовитый океан	11
Мировой океан	19

Согласно полученным данным, гравитационное поле в Арктике наиболее спокойно с точки зрения структуры и градиента АСТ. Основные аномальные поля, потенциально содержащие повышенные погрешности соответствуют трансполярным хребтам: Ломоносова, Менделеева, Альфа. При этом значительные площади здесь образуют абиссальные равнины. Карта градиента аномального поля Северного Ледовитого океана показана на рис. 4. Вместе с тем, как уже было сказано в предыдущем разделе,

спутниковые альтиметрические данные содержат в высоких широтах повышенные погрешности. Кроме того, объективные географические сложности проведения инструментальных съемок делают этот регион Мирового океана гравиметрически самым малоизученным, даже априорно.

Кроме того, карта градиентов на рис. 4 показывает информационные возможности аномалий гравитационного поля в акватории в Арктике для перспективных навига-

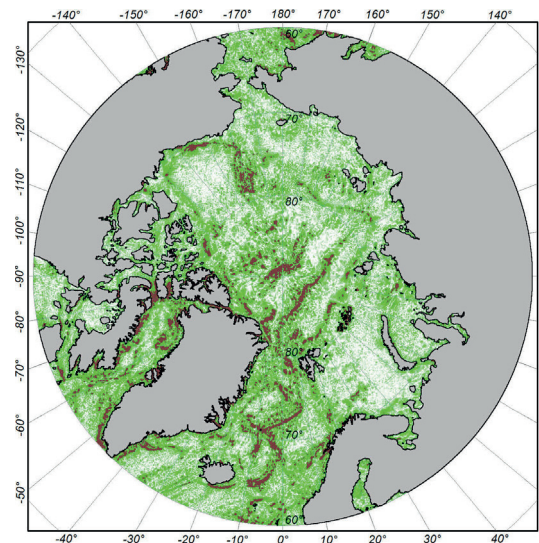


Рис. 4. Горизонтальный градиент АСТ Северного Ледовитого океана по данным глобальной модели WGM2012. Светло-коричневым обозначены области поля с величиной градиента 2 мГал/км и выше; зеленым цветом – области поля с величиной градиента менее 2 мГал/км; белым – области поля с величиной градиента близкой к 0

ционных задач. Малое количество градиентных областей, аномалии которых могут быть пространственными ориентирами, и ограничения современных спутниковых глобальных методов определения здесь параметров ГПЗ делают этот регион достаточно сложным для уточнения местоположения по АСТ. По этой причине с учетом стратегического положения Арктики актуальными являются увеличение площади покрытия региона морскими и аэрогравиметрическими съемками и развитие средств и методов инструментальных высокоточных и детальных гравиметрических измерений в высоких широтах.

В других акваториях размеры градиентных областей практически одинаковы. Общая же их площадь относительно всего Мирового океана составляет не более **19%**.

Глобальные оценки модельных данных с использованием протяженных маршрутных съемок

Для проверки предложенного способа глобального районирования модельного ГПЗ в Мировом океане использованы протяженные гравиметрические маршрутные съемки, выполненные в разное время во всех акваториях, открытых для свободного мореплавания. Благодаря полученным оценкам была рассмотрена возможность применения для априорных оценочных задач не только площадных, но и маршрутных съемок. Маршрутные съемки обладают меньшим потенциалом для получения оценочной аналитической информации по сравнению с площадными, но в масштабах акваторий целых океанов могут служить инструментом для оценки как точности представления АСТ в современных моделях ГПЗ, так и технологии районирования модельных полей по градиенту модельных же АСТ.

Для сравнения с маршрутными инструментальными измерениями взяты данные глобальной модели Sandwell and Smith v29.1 как наиболее достоверной на большинстве акваторий (см. табл. 1). Рассмотрены данные на 166 профилях протяженностью от 100 км и более. Результаты анализа более 40 тысяч погонных километров маршрутных измерений по акваториям представлены в табл. 4.

Оценки глобальных моделей по результатам сравнения с морскими маршрутными гравиметрическими съемками

Акватория	Общая протяженность маршрутных профилей, км	Средний градиент АСТ по маршруту съемки, мГал/км	СКО, мГал
Северная часть Атлантического океана	7000	2,6	2,4
Западная часть Атлантического океана	3500	2,1	1,8
Южная часть Атлантического океана	2000	1,2	1,6
Восточная часть Атлантического океана	14000	1,7	1,8
Тихий океан (Южный океан)	10000	1,4	2,7
Индийский океан	12000	1,6	2,2
	48500	1,8	2,1

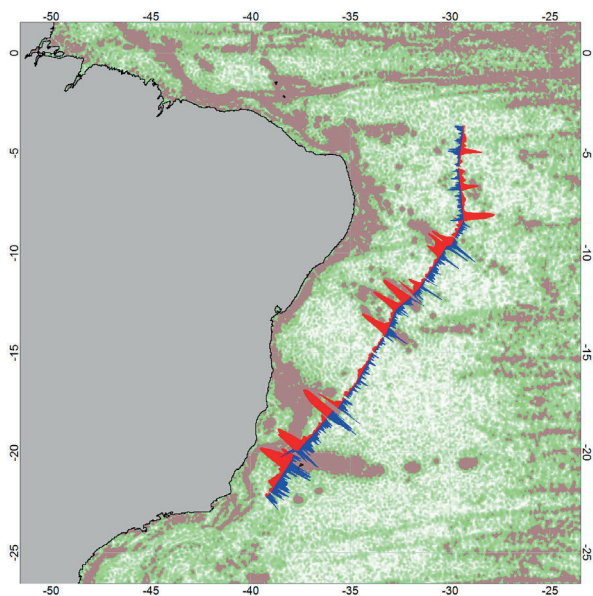


Рис. 5. Графики горизонтального градиента АСТ (красный график, мГал/км) и отклонений съемочных данных от модели Sandwell and Smith v.29.1 (синий график, мГал) вдоль маршрутного профиля над градиентными и абиссальными структурами. Светло-коричневым обозначены области поля с величиной градиента 2 мГал/км и выше; зеленым цветом – области поля с величиной градиента менее 2 мГал/км; белым – области поля с величиной градиента близкой к 0. Карта градиентов вычислена по данным модели WGM2012

На рис. 5 показан характерный пример движения научного судна вдоль побережья Бразилии над градиентными и абиссальными структурами поля с гравиметром на борту. Красным графиком вдоль линии обозначено изменение градиента аномального поля (в мГал/м), синим – отклонение от модели (в мГал) вдоль съемочного профиля. Шум модельных данных возрастает практически пропорционально увеличению градиента АСТ.

На рис. 6 приведен график значений градиента поля вдоль всех маршрутных профилей и соответствующий им график СКО АСТ модели Sandwell and Smith v29.1 для каждого маршрутного профиля.

Значение вычисленного коэффициента корреляции между изменением среднего градиента поля по каждому профилю и изменением СКО модельной АСТ составило **0,6**, следовательно, подтверждается наличие взаимосвязи между точностью представления АСТ в современных

альтиметрических моделях ГПЗ и вариациями градиента АСТ вдоль профиля маршрутной гравиметрической съемки. Кроме того, дополнительно продемонстрирована эффективность априорного районирования модельного поля по величине градиента.

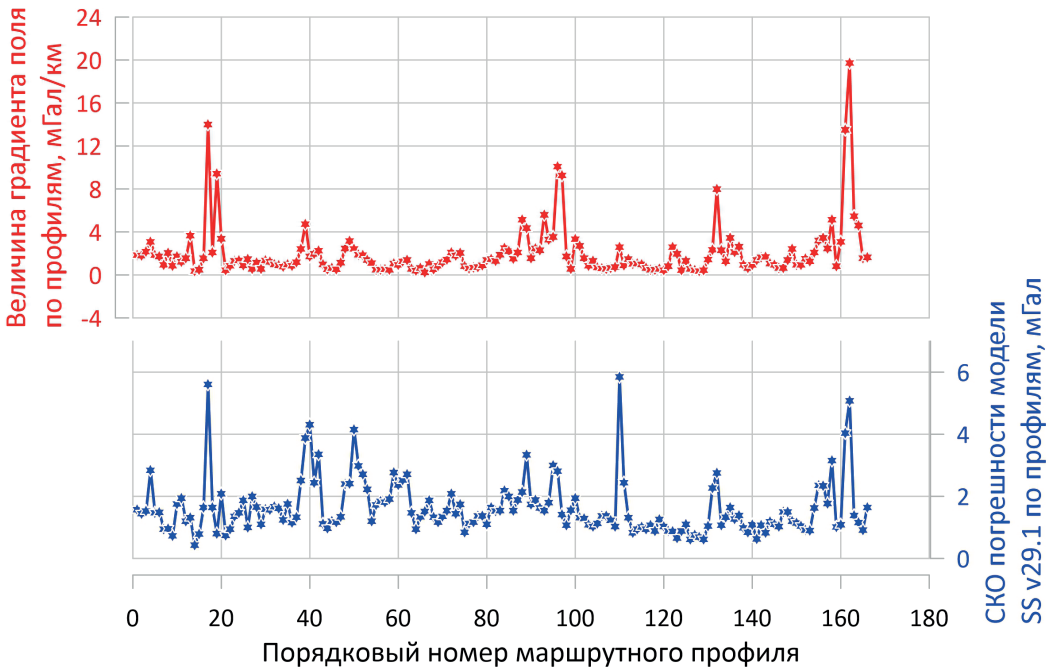


Рис. 6. Графики изменения градиента и SKO модельных АСТ Sandwell and Smith v29.1 по 166 протяженным маршрутным профилям в основных акваториях Мирового океана

Для изучения ГПЗ высокоградиентных регионов Мирового океана все еще необходимо выполнение морских или аэрогравиметрических инструментальных съемок. Тем не менее рост точности и детальности априорных спутниковых данных создает условия для увеличения межгалсового расстояния съемочной сети в менее градиентных акваториях по АСТ. А методы комплексирования данных в перспективе позволят свести роль инструментальных измерений к рекогносцировочным и оценочным в задачах коррекции спутниковых модельных данных на больших площадях.

Особенности модельного гравитационного поля в зависимости от геоморфологии Мирового океана

В районах с разной геоморфологией глобальные модели характеризуются различными погрешностями, в связи с этим отдельно рассмотрена структура аномального поля современных моделей по типам районов.

В результате выполненных оценок выявлено, что в абиссальных областях с относительно спокойным полем в моделях EGM2008 и WGM2012 присутствует высокочастотный шум с амплитудой от 1 до 3 мГал и периодом около 20 км. Такая же помеха, но с периодом около 15 км присутствует и в более новой модели Sandwell and Smith v29.1. На рис. 7 показаны графики съемочных и модельных данных в абиссальной области океана.

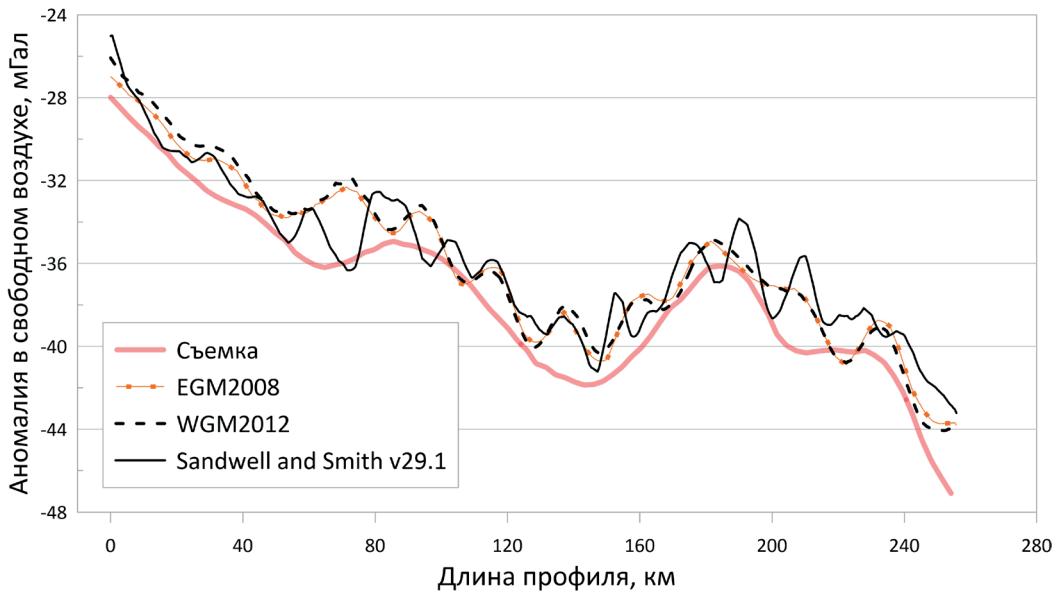


Рис. 7. Графики данных морской гравиметрической съемки и моделей ГПЗ в абиссальной области (Индийский океан)

Для выделения области этого шума был выполнен спектральный анализ инструментальных и модельных данных (модель Sandwell and Smith v29.1). При этом были выбраны две характерные абиссальные области с минимальным градиентом аномального гравитационного поля: в Индийском (Бенгальский залив) и Атлантическом океане (вблизи побережья Бразилии).

На рис. 8 показаны графики зависимостей амплитуды АСТ на морских гравиметрических профилях и в соответствующих им модельных данных от длины волны АСТ. На графиках хорошо видна область длин волн аномалий с шумом модельных данных: от 9 до 30 км, но максимальная амплитуда шума модели в обоих регионах находится в диапазоне от 15 до 20 км.

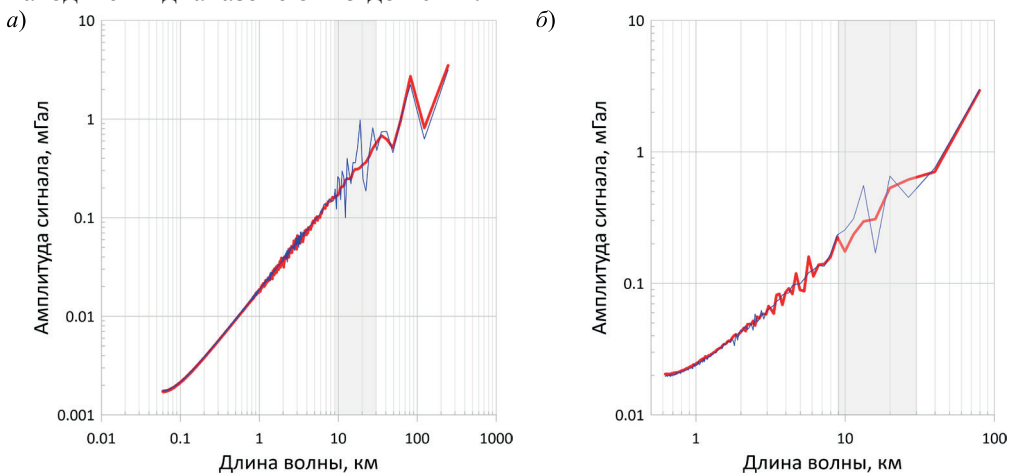


Рис. 8. Графики зависимости амплитуды сигнала в инструментальных данных (красная линия) и модельных данных Sandwell and Smith v29.1 (синяя линия) от длины волны АСТ в Индийском (а) и Атлантическом океане (б). Серой областью обозначен один и тот же диапазон длин волн от 9 до 30 км

Полученный на основе информации из разных океанов результат предполагает наличие с большой вероятностью высокочастотного шума в модельных данных и в остальных абиссальных областях Мирового океана. Это можно использовать для анализа модельных данных в определенном диапазоне длин волн и исключения периодической помехи в этом диапазоне, например методами фильтрации данных.

Иначе выглядит проблема применения модельных аномалий в градиентных районах: амплитуды высоких частот реальных аномалий в моделях подавлены. Несмотря на то что каждая последующая модель содержит больший набор входящих альтиметрических данных и, соответственно, лучше описывает локальные аномалии, чтобы на практике эффективно воспользоваться значениями модельных аномалий в этих областях, необходимо дополнительное восстановление их амплитуд и высоких частот.

На рис. 9 показаны графики съемочных и модельных данных в градиентной области Срединно-океанического хребта.

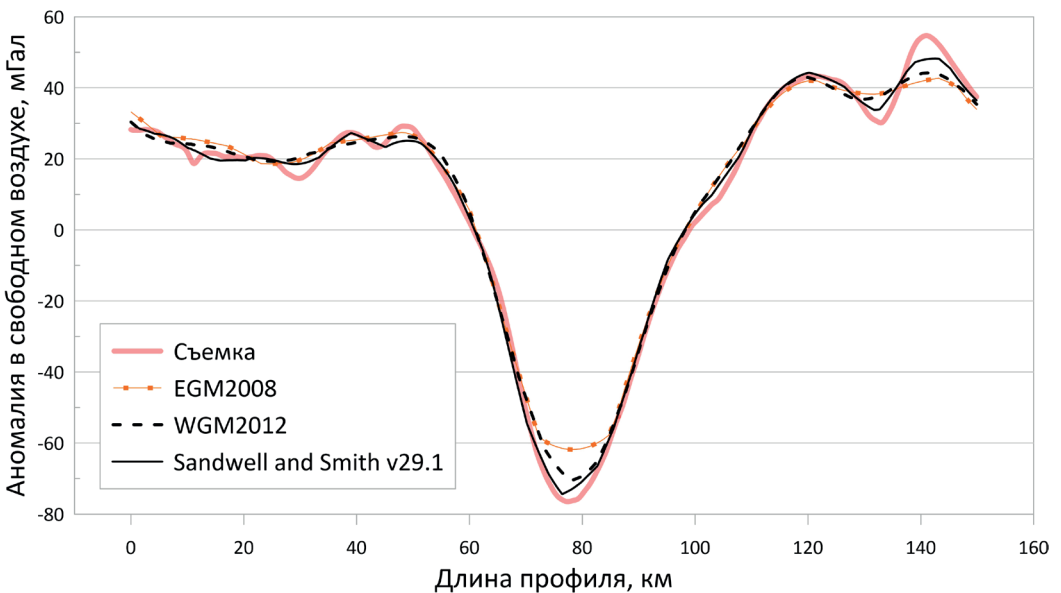


Рис. 9. Графики АСТ по данным морской гравиметрической съемки и моделей ГПЗ в градиентной области (Срединно-океанический хребет, Индийский океан)

Основная сложность при прогнозировании величины рассматриваемой погрешности заключается в самой ее природе, которая обусловлена особенностями обработки массива альтиметрической информации. Параметры фильтрации шума в альтиметрических данных выбираются априорно в зависимости от физико-географических особенностей конкретного региона, в первую очередь вариаций уровня моря, предварительно определенных по данным многолетних спутниковых наблюдений. Таким образом, увеличение параметра окна фильтрации зависит не только от топографии дна океана, но и от океанографических факторов, связанных, например, с глобальными системами течений. При этом наиболее градиентные аномалии в большей степени связаны именно с геоморфологией и рельефом дна океана. Дополнительная фильтрация выполняется и для регионов, постоянно или периодически закрытых льдом [19].

В настоящее время в связи со сложной цепочкой вычислений и большим объемом разнородной входящей информации при вычислении альтиметрии для определения и оценки фактических погрешностей в градиентных областях глобальных моделей ГПЗ целесообразно применять апостериорную информацию. Наибольшие погрешности модельных данных в Мировом океане находятся именно в таких областях, поэтому планирование региональных инструментальных съемок или так называемых рекогносцировочных галсов должно выполняться с учетом расположения и направлений простирающихся градиентных аномалий. Предлагается для этих задач использовать рассмотренное выше априорное районирование по модельным данным.

Обсуждение результатов

В результате выполненных исследований получена объективная картина фактических точностных характеристик современных глобальных ультравысокоточных моделей ГПЗ. Ориентируясь на представленные данные, можно прогнозировать достоверность рассмотренных моделей в различных акваториях Мирового океана. Конечно, точность модельных данных зависит от большого количества факторов, поэтому настоящие оценки более актуальны для районов открытого океана с небольшими и закономерными вариациями высоты топографической поверхности моря. В областях с градиентом поля менее 2 мГал/км СКО современных моделей находится в пределах 1 мГал, на наиболее градиентных структурах СКО составляет 3 мГал и более.

Точность глобальных моделей ГПЗ в Арктике значительно ниже. На структурах с похожим градиентом поля в высоких широтах ожидается, что точность модельных данных в несколько раз хуже, чем в свободных от льда акваториях.

При этом все еще существует тренд на повышение точности и достоверности новых глобальных моделей. Для потенциального пользователя интерес представляют коротковолновые аномалии, и, соответственно, практическое развитие спутникового метода получения глобальных данных об аномалиях ГПЗ связано с развитием альтиметрии и методов ее обработки.

Отдельным вопросом является методология практического использования модельных данных. Относительно высокоточных морских съемок выявлено, что на разных структурах поля модель содержит погрешности разного характера. Следовательно, необходимы *разные* методические подходы к работе с такой информацией. Наиболее перспективной является идея дополнительного разделения модельного поля уже в рамках отдельного полигона и его дополнительных трансформаций – подавления шума в абиссальных и восстановления высокой частоты аномалий в градиентных зонах.

Заключение

Современная глобальная модель гравитационного поля Земли – это важный и уже хорошо известный специалистам источник данных об АСТ.

Именно на акваториях Мирового океана благодаря спутниковой альтиметрии имеющиеся модели достоверны и их применение наиболее перспективно. Показанный рост точности глобальных моделей ГПЗ позволяет привлекать их к решению ре-

гиональных практических задач, при этом экономическая целесообразность использования моделей вместо инструментальных съемок не вызывает сомнений. Тем не менее большое значение приобретают методически правильные оценки модельных данных перед их дальнейшим применением, выполняемые с учетом характера, масштаба решаемых задач и структуры гравитационного поля на исследуемой площади.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Ince, E.S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., Schuh, H., ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans, *Earth System Science Data*, 2019, no.11, pp. 647–674, doi:10.5194/essd-11-647-2019.
2. Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, iss. B4, B04406, doi:10.1029/2011JB008916.
3. Михайлов П.С., Конешов В.Н., Погорелов В.В., Спесивцев А.А., Соловьев В.Н., Железняк Л.К. Высокостепенные модели гравитационного поля Земли: история развития, оценка перспективности и разрешающей способности // Наука и технологические разработки. 2020. Том 99. № 4. С. 5–33.
4. Garcia, E.S., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Retracking CryoSat-2, Envisat and Sentinel-6/Jason-CS-1 radar altimetry waveforms for improved gravity field recovery, *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 196, no. 3, pp. 1402–1422, doi: 10.1093/gji/ggt469.
5. Конешов В.Н., Михайлов П.С., Железняк Л.К., Соловьев В.Н. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. 2021. Том 22. №1. С. 40–53. DOI: 10.21455/std2020.4-1.
6. Lee, D, Acharya, T.D., Comparison of complete bouguer anomalies from satellite marine gravity models with shipborne gravity data in East Sea, Korea, *Journal of Marine Science and Technology*, 2017, vol.25, no.6. pp. 625–632, doi: 10.6119/JMST-017-1226-01.
7. Рыжова Д.А., Коснырева М.В., Дубинин Е.П., Булычев 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.
8. Bai, Y., Li, M., Wu, S., Dong, D., Gui, Z., Sheng, J., Wang, Z., Upper mantle density modelling for large-scale Moho gravity inversion: case study on the Atlantic Ocean, *Geophysical Journal International*, 2019, vol. 216, issue 3, pp. 2134–2147, doi: 10.1093/gji/ggz003.
9. 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.
10. Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., Oikonomidou, X., The combined global gravity field model XGM2019e, *Journal of Geodesy*, 2020, vol. 94, Article number: 66, doi: 10.1007/s00190-020-01398-0.
11. 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.
12. Wei Liang, Jiancheng Li, Xinyu Xu, Shengjun Zhang, Yongqi Zhao, A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008, *Research Geodesy and Survey Engineering*, 2020, vol. 6, issue 8, pp. 860–878.
13. Andersen, O.B., Marine Gravity and Geoid from Satellite Altimetry. Geoid Determination – Theory and Methods, *Lecture Notes in Earth Science*, Springer, 2013, vol. 110, pp. 401–451.
14. Дробышев Н.В., Железняк Л.К., Клевцов В.В., Конешов В.Н., Соловьев В.Н. Методы и проблемы изучения гравитационного поля океана // Геофизические исследования. 2006. №5. С. 32–52.
15. Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Погорелов В.В., Соловьев В.Н., Афанасьева Л.В. Изученность гравитационного поля Арктики – состояние и перспективы // Физика Земли. 2016. №3. С. 113–122. DOI: 10.7868/S0002333716030054.
16. Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А. Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №4. С. 162–180. DOI: 10.17285/0869-7035.0018.

17. Соколов А.В., Краснов А.А., Конешов В.Н., Глазко В.В. Первая высокоточная морская гравиметрическая съемка в районе Северного полюса Земли // Физика Земли. 2016. №2. С. 109–113. DOI: 10.7868/S0002333716020125.
 18. 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.
 19. Andersen, O.B., Knudsen, P., Berry, P.A.M., The DNSC08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry, *Journal of Geodesy*, 2010, vol. 84, no. 3, pp. 191–199, doi:10.1007/s00190-009-0355-9.
-

Mikhailov, P.S., Koneshov, V.N., Solov'ev, V.N. (Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov, Vladimir, Russia), Zheleznyak, L.K. (Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences) New Results of Estimation of Modern Global Ultrahigh-Degree Models of the Earth's Gravity Field in the World Ocean, *Гироскопия и Навигация*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 36–53.

Abstract. With the increase in accuracy and resolution of modern global models of the Earth's gravity field, more opportunities have appeared to use them in solving the regional gravimetric problems. At the same time, the estimates of existing models depending on the region and geomorphology, as well as methods for predicting the reliability of data in models, taking into account the scale and nature of the problem being solved, become more important. The article is devoted to new estimates of modern models of the gravity field in various regions of the World Ocean and over various geomorphological structures. The estimates were obtained by comparing the data of the most relevant models of the gravity field with the data of high-precision marine areal and route surveys carried out in all major areas of the World Ocean. Based on the results, the model field is promising and it is possible to estimate the spatial distribution of model field errors in the World Ocean. A method for efficient preliminary zoning of a model field in the ocean is proposed. The features of the development of the Earth's gravity field models are considered, taking into account their actual accuracy and resolution, as well as the issue of general reliability of modern model data in the high-latitude Arctic.

Key words: marine gravimetry, ultrahigh-degree global models, satellite gravimetry, accuracy estimates, gravity field, World Ocean.

Материал поступил 12.12.2022