

УДК 550.831.015: 550.831.23: 519.654

СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ УЛЬТРАВЫСОКОСТЕПЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2019 г. В.Н. Конешов, В.Б. Непоклонов, В.Н. Соловьёв, Л.К. Железняк

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

Представлены экспериментальные результаты оценки величин высокочастотных помех в современных ультравысокостепенных моделях гравитационного поля Земли. При оценке погрешностей выполнено сравнение значений аномалий силы тяжести, вычисленных по современным ультравысокостепенным моделям в тестовых районах Мирового океана. Значения аномалий, вычисленные по моделям, сравнивались с контрольными данными морских гравиметрических съемок. Проведен анализ и интерпретация полученных оценок погрешностей ультравысокостепенных моделей.

Судя по экспериментальным данным, полученным в рамках выполненного исследования, сравнительные оценки значений аномалий моделей гравитационного поля Земли позволяют говорить о том, что модели EGM2008, EIGEN-6C4 и GECO практически совпадают или близки по вычисленным значениям аномалий. В статье предложены практические рекомендации по использованию ультравысокостепенных моделей.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, модель, сферические гармоники, аномалии силы тяжести (АСТ), сравнительные исследования, точность, морская гравиметрическая съемка, Берингово море, Бенгальский залив.

Введение

В последние годы наблюдается заметный прогресс в области создания глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) высокой точности и пространственного разрешения. С одной стороны, это стало следствием общего улучшения гравиметрической изученности земного шара как на суше, так и в Мировом океане, а, с другой, связано с осуществлением новых космических проектов в области изучения ГПЗ – GRACE, GOCE, LAGEOS. Космические проекты обеспечили не только высокий уровень точности определения характеристик гравитационного поля Земли, но и выход на новый уровень изучения его временных вариаций в планетарных масштабах. В результате детализации высокоточных спутниковых моделей геопотенциала с использованием данных сухопутных, морских и аэрогравиметрических съемок, а также спутниковой альтиметрии Мирового океана созданы новые глобальные комбинированные модели гравитационного поля Земли в виде сферических гармоник геопотенциала, в том числе ультравысокостепенные модели.

Первой в ряду ультравысокостепенных моделей стала созданная в 2008 г. американская модель EGM2008, использующая сферические гармоники до 2190-й степени, что теоретически обеспечивает весьма высокое пространственное разрешение этой модели – около 9 км (по длинам полуволн геоида). Благодаря своим точностным характеристикам и разрешающей способности модель EGM2008 нашла широкое применение при анализе и обработке материалов гравиметрических съемок. Недавно к ней добавились две аналогичные ультравысокостепенные модели – это европейские модели EIGEN-6C4 (2014 г.) и GECO (2015 г.). При внешнем сходстве названные модели в той

или иной мере различаются между собой как по составу исходной информации, так и по методикам их обработки. В связи с этим интерес представляют сравнительные исследования разных моделей и анализ получаемых при этом результатов. Подобные исследования важны с точки зрения мониторинга гравиметрической изученности земного шара в классе глобальных моделей ГПЗ и своевременного внесения изменений в практику обработки гравиметрической информации при появлении моделей с улучшенными характеристиками по точности и пространственному разрешению.

В ряде работ, опубликованных ранее (см., например, [Конешов, Непоклонов, Соловьёв, 2014; Канушин и др., 2015; Современные..., 2017]), приведены сравнительные оценки моделей EGM2008, EIGEN-6C4, полученные по различным методикам. В частности, сопоставлены оценки статистических характеристик модельных значений высот геоида и аномалий силы тяжести в разных регионах земного шара, включая Арктику и Антарктику, а также оценки расхождений моделей с разными видами контрольных данных. Однако в большинстве случаев эти оценки ограничиваются районами суши, т.е. не учитывается то, что в настоящее время возрастает актуальность задач, связанных с необходимостью повышения точности и детальности определения характеристик аномального ГПЗ в Мировом океане, в том числе для целей навигации [Современные..., 2017]. На сегодняшний день особый интерес вызывают сравнительные оценки моделей ультравысокостепенных моделей ГПЗ в районах Мирового океана, что послужило предпосылкой для проведения представленных в данной работе исследований. Среди факторов, определяющих новизну полученных результатов, следует отметить выбор тестовых районов и использование в качестве контрольных данных новых материалов отечественных морских гравиметрических съемок. Также к особенностям проведенных исследований можно отнести то, что в них наравне с уже апробированными моделями EGM2008, EIGEN-6C4 представлена более новая модель GECO.

Постановка задач, материалы и методики исследований

Сравнительные исследования современных глобальных ультравысокостепенных моделей ГПЗ проводились на примере названных выше моделей EGM2008, EIGEN-6C4 и GECO.

Модель EGM2008 [Pavlis et al., 2012; Конешов и др., 2013; Современные..., 2017] создана при ведущей роли Национального агентства геопространственной разведки США (*National Geospatial-Intelligence Agency, NGA*) на замену модели EGM96 до 360-й степени, которая использовалась в качестве модели ГПЗ, обеспечивавшей поддержку общеземной геоцентрической системы координат WGS-84. Целью создания этой модели было доведение точности определения высот геоида до уровня СКП 0.15 м, в несколько раз превышающего точностные характеристики модели EGM96. Низкочастотная часть формировалась на базе использования новой на тот период спутниковой модели геопотенциала ITG-GRACE03S до 180-й степени (2007 г.), полученной на основе измерительной информации со спутников GRACE. Высокочастотная составляющая ГПЗ уточнялась за счет существенного обновления и дополнения исходных АСТ по трапециям 5'×5' и методического повышения точности их обработки. Для модернизации каталога средних аномалий силы тяжести по трапециям 5'×5' были использованы, в частности, ранее недоступные данные на территории России, основанные на гравиметрических картах масштаба 1:1000000, данные Европейского, Азиатского, Арктического и других международных гравиметрических проектов. Кроме этого, использовались уточненные значения АСТ в Мировом океане, полученные при обработке данных спутниковой альтиметрии с использованием улучшенной модели динамической топографии

морской поверхности. В итоге, по сравнению с предшествующими моделями гравиметрическая изученность Земли по трапециям $5' \times 5'$ была повышена с 65 % до ~90 %. Не обеспеченными исходной гравиметрической информацией остались только Антарктида и отдельные территории Африки и Южной Америки. Эти районы были заполнены с использованием статистического прогноза и базовой спутниковой модели геопотенциала. Повышению точности обработки исходных АСТ способствовало привлечение глобальной цифровой модели рельефа $30'' \times 30''$.

Модель EIGEN-6C4 [Förste et al., 2014; Канушин и др., 2015] является совместной разработкой Потсдамского исследовательского центра наук о Земле (GFZ, Германия) и Исследовательской группы по космической геодезии Национального космического агентства Франции (GRGS). В качестве исходной информации использовались спутниковые модели геопотенциала, полученные по лазерным траекторным наблюдениям спутников LAGEOS за период с 1985 по 2010 г. (до 30-й степени), межспутниковым измерениям GRACE за период с 2003 по 2012 г. (до 130-й степени) и данным спутниковой градиентометрии GOCE (до 235-й степени). Также был использован массив альтиметрических высот геоида в Мировом океане, сформированный по данным модели DTU12; массив высот геоида на суше, вычисленных по модели EGM2008, усеченной до 370-й степени. Путем их уравнивания были определены гармонические коэффициенты до 370-й степени. Затем с использованием детальной информации в виде глобального массива АСТ, сформированного по данным модели DTU10, путем блочно-диагонального гармонического анализа были определены гармонические коэффициенты более высоких значений степени разложения (до 2190-й).

Модель GECO [Gilardoni, Reguzzoni, Sampietro, 2016] получена специалистами Миланского политехнического института в сотрудничестве с компанией CReD. Целью её создания было уточнение модели EGM2008 в диапазоне низких и средних частот с использованием данных спутниковой градиентометрии. Исходной информацией при этом служили:

- полный набор гармонических коэффициентов модели EGM2008 с оценками точности (стандартные отклонения погрешностей);
- “грид” стандартных отклонений погрешностей высот геоида, вычисленных по модели EGM2008;
- глобальная модель ГПЗ в виде сферических гармоник геопотенциала TIM R5 до 280-й степени, полученная по данным спутниковой градиентометрии GOCE.

В процессе создания модели вычислены два глобальных массива высот геоида на сферической сетке с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ – один по модели EGM2008 до 359-й степени, другой по модели TIM R5 до 250-й степени. Вычисленные массивы были объединены по методу наименьших квадратов. Далее путем анализа объединенного массива были получены гармонические коэффициенты модели GECO до 359-й степени, а коэффициенты более высоких степеней (от 360 до 2190-й) напрямую заимствовались из состава модели EGM2008.

Основная задача представляемого в статье исследования состояла в сравнении значений АСТ, вычисленных по каждой из трех исследуемых моделей, между собой (первый этап) и с контрольными данными морских гравиметрических съемок в тестовых районах акватории Мирового океана (второй этап), а также в анализе и интерпретации полученных расхождений и в разработке практических рекомендаций.

Методика исследований учитывала опыт проведения аналогичных работ в нашей стране и за рубежом, среди которых следует отметить представленные в [Конешов и др., 2013; Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014; Современные..., 2017]. В этих работах проведено сравнительное исследование современных глобальных ультравысокостепенных моделей ГПЗ EGM2008 до 2190-й степени разложения, EIGEN-6C2 и EIGEN-6C3

до 1949-й степени разложения и их погрешностей, а также выполнено их сравнение с результатами аэрогравиметрических измерений при трансконтинентальных перелетах от Архангельска до Петропавловска-Камчатского.

Авторами работы [Канушин и др., 2015] проведен спектральный анализ с использованием гармонических коэффициентов современных глобальных моделей геопотенциала, в том числе и ультравысокостепенных моделей EGM2008 и EIGEN-6C4, в результате которого получены оценки разрешающей способности и точностные характеристики моделей. Выполнено тестирование моделей путем сравнения модельных данных с результатами независимых наземных наблюдений на территории Новосибирской области (17 пунктов опорной гравиметрической сети II класса). Для модели EGM2008 полученные расхождения характеризуются средним значением 1.38 мГал и стандартным отклонением 4.06 мГал; для модели EIGEN-6C4 – средним значением 1.42 мГал и стандартным отклонением 3.96 мГал.

В работе [Маркович, 2015] представлена оценка точности ультравысокостепенных моделей EGM2008 и EIGEN-6C4 по разностям приращений АСТ, вычисленных для девяти геодезических пунктов Полоцкого геодинамического профиля. Средние разности модельных значений и гравиметрических измерений составили –0.53 мГал для модели EIGEN-6C4 и –0.52 мГал для модели EGM2008; среднеквадратическая погрешность для обеих моделей – 2.65 мГал. Это соответствует стандартному отклонению 3.75 мГал.

Как было отмечено выше, новизна представляемого в настоящей статье исследования обусловлена составом сопоставляемых моделей, выбором тестовых районов, использованием для контроля модельных данных новой гравиметрической информации, полученной российскими исследователями по результатам площадных морских гравиметрических съемок, выполненных с высокими точностью и разрешением.

На первом этапе в качестве тестового района Мирового океана была выбрана акватория Берингова моря, на втором – Бенгальского залива. Такой выбор для первого этапа определялся тем, что имеющий довольно большие размеры район Берингова моря по степени изученности тонкой структуры ГПЗ уступает многим другим районам акватории Мирового океана, характеризуясь при этом достаточно сложным распределением гравитационных аномалий (рис. 1). Анализ поведения моделей гравитационного поля в подобных районах особенно интересен с точки зрения прогностических возможностей восстановления гравитационных аномалий в условиях неполной гравиметрической изученности.

Выбор тестового района для второго этапа определялся не только наличием исходной гравиметрической информации, но и тем, что выбранный район дает возможность исследовать способность разных моделей ГПЗ к адекватному воспроизведению гравитационных аномалий в зонах континентального склона, его подножия и медленно погружающейся абиссальной котловины.

При проведении исследований модельные значения АСТ в свободном воздухе вычислялись по формуле

$$\Delta g(\varphi, \lambda, r) = \frac{fM}{r^2} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r}\right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda),$$

где a – большая полуось общего земного эллипсоида; φ, λ, r – сферические геоцентрические координаты точки (широта, долгота, радиус-вектор); fM – произведение гравитационной постоянной на массу Земли; \bar{P}_{nm} – нормированные присоединенные функции Лежандра; $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ – нормированные коэффициенты разложения возмущающего потенциала по сферическим функциям; N – предел суммирования (предельное значение степени учитываемых сферических гармоник).

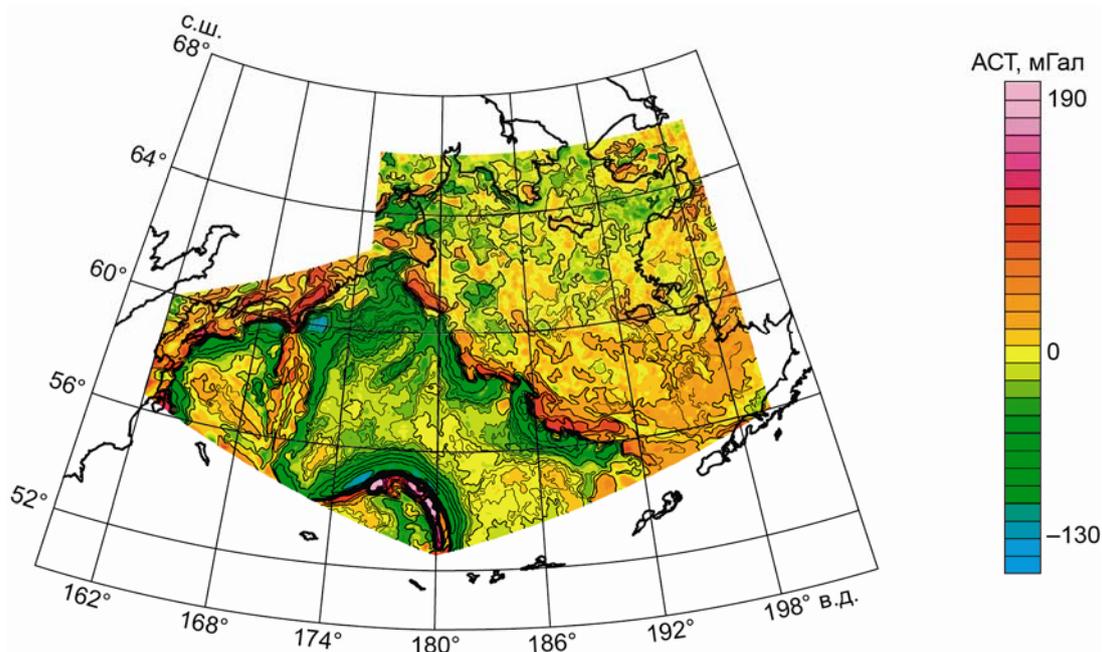


Рис. 1. Район Берингова моря. Карта аномалий силы тяжести, построенная по данным модели EGM2008 до 2190-й степени. Сечение изолиний – 5 мГал

Fig. 1. The Bering Sea area. The map of the gravity anomalies according to the EGM2008 model to the 2190th degree. Contour interval is 5 mGal

Расчеты по приведенной выше формуле выполнялись с использованием специальной программы гармонического синтеза геопотенциала и его трансформант, разработанной в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), которая позволяет вычислять АСТ и другие характеристики аномального поля на различных высотах в отдельных пунктах профиля или на заданной высоте в узлах “грида”. В последнем случае используется эффективный алгоритм быстрого преобразования Фурье. Также программа позволяет вычислять точечные и усредненные значения моделируемых параметров ГПЗ.

Задача первого этапа состояла в сравнении условно принимаемой за эталон ультравысокостепенной модели EGM2008 с аналогичными более поздними моделями EIGEN-6C4 и GECO, которые, в отличие от EGM2008, созданы с использованием данных спутниковой градиентометрии GOCE, и в выборе по результатам сравнения модели с оптимальными характеристиками по точности и надежности.

В задачу второго этапа входило сравнение исследуемых моделей с новыми данными морских гравиметрических съемок, выполненных ИФЗ РАН на акватории Бенгальского залива.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе по каждой из трех моделей – EGM2008, EIGEN-6C4, GECO – в одних и тех же точках тестового района Берингова моря, соответствующих узлам регулярной сетки меридианов и параллелей, с шагом 0.5' (5501637 узлов) были вычислены значения АСТ в свободном воздухе на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84 в международной гравиметрической системе IGSN 1971. Расхождения между результатами вычислений по разным моделям в виде карт показаны на рис. 2–4.

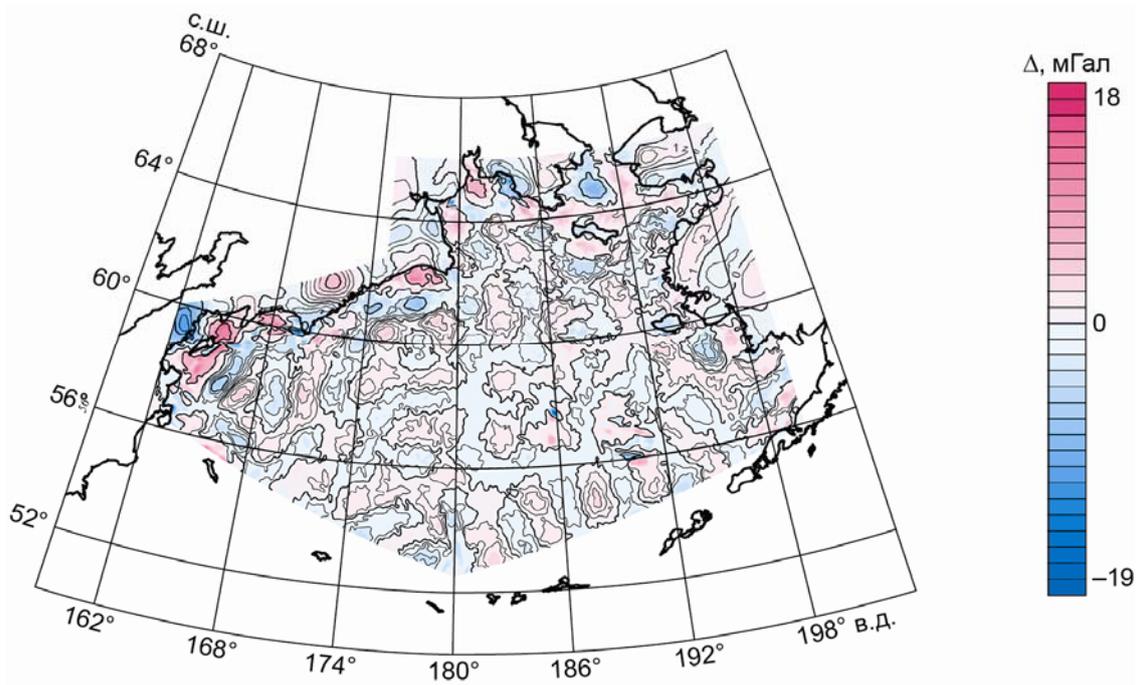


Рис. 2. Район Берингова моря. Карта разности значений аномалий силы тяжести, рассчитанных по моделям EGM2008 и EIGEN-6C4. Сечение изолиний – 1 мГал

Fig. 2. The Bering Sea area. The map of difference between the gravity anomalies calculated by the EGM2008 and EIGEN-6C4 models. Contour interval is 1 mGal

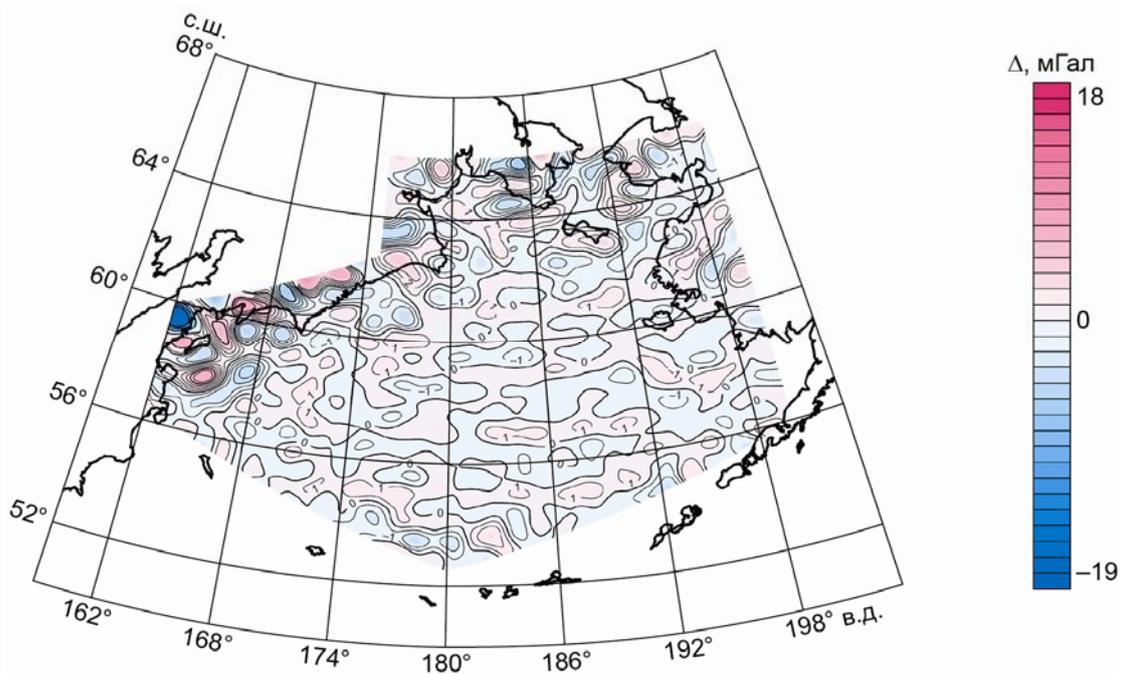


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для моделей EGM2008 и GECO. Сечение изолиний – 1 мГал

Fig. 3. The same as in Fig. 2 for the EGM2008 and GECO models. Contour interval is 1 mGal

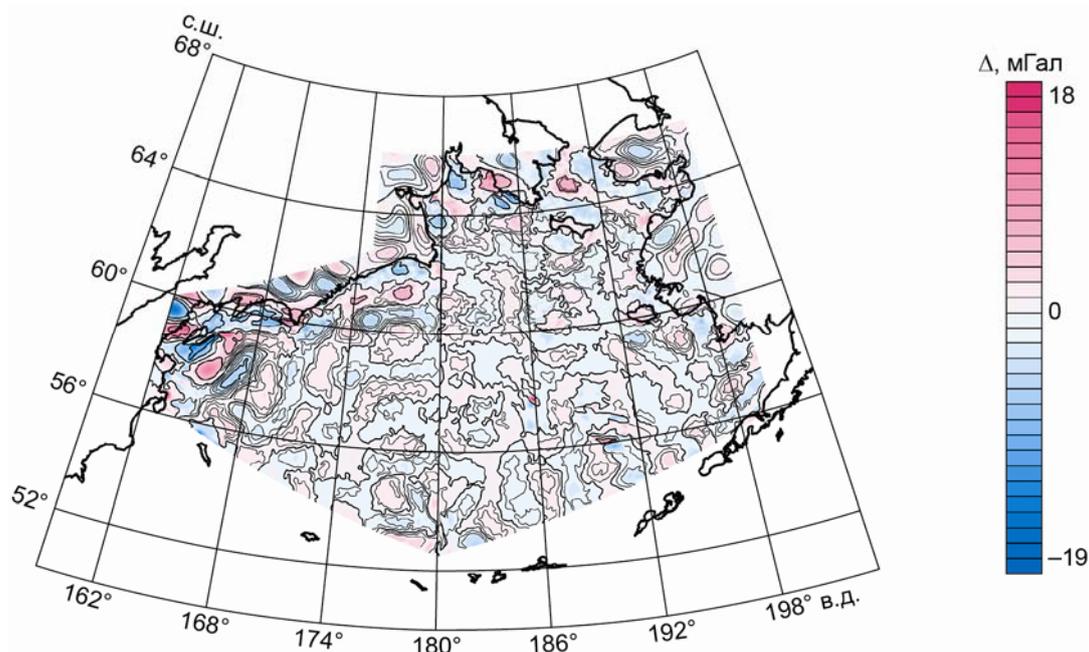


Рис. 4. То же, что на рис. 2 для моделей EIGEN-6C4 и GECO. Сечение изолиний – 1 мГал

Fig. 4. The same as in Fig. 2 for the EIGEN-6C4 and GECO models. Contour interval is 1 mGal

Статистические характеристики расхождений между модельными значениями АСТ в узловых точках приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики расхождений между тремя рассматриваемыми моделями

Статистики расхождений	Сравниваемые модели		
	EGM2008–EIGEN-6C4	EGM2008–GECO	EIGEN-6C4–GECO
Среднее значение, мГал	–0.03	–0.02	0.00
Стандартное отклонение, мГал	2.10	1.69	2.19
Минимальное значение, мГал	–19	–27	–16
Максимальное значение, мГал	15	10	18

Приведенные графические и числовые оценки трех моделей свидетельствуют, что на акватории Берингова моря современные ультравысокостепенные модели ГПЗ близки между собой. Систематическая составляющая расхождений между исследуемыми моделями по АСТ в данном регионе в абсолютных значениях не превышает 0.03 мГал; для случайной составляющей характерны стандартные отклонения на уровне 2 мГал. Выявленные расхождения отражают специфику моделей, связанную с различиями исходной информации и методов ее обработки.

Различия между ранее созданной моделью EGM2008 и более поздними EIGEN-6C4 и GECO, в первую очередь, отражают вклад новых данных о ГПЗ, полученных в результате реализации проекта GOCE. Наиболее близка к модели EGM2008 модель GECO, поскольку в ее составе высока степень использования данных модели EGM2008. Результаты сравнения моделей EGM2008 и GECO с моделью EIGEN-6C4 в районах Мирового океана в определенной мере также характеризуют вклад новых (по отношению

к модели EGM2008) данных спутниковой альтиметрии, реализованных в составе исходной информации при выводе модели EIGEN-6C4. При этом на картах расхождений между моделями (см. рис. 2, 4) заметна не вполне реалистичная картина изрезанности изолиний. С учетом результатов ранее выполненных исследований модели EGM2008 эту изрезанность можно связать с наличием искусственной шумовой составляющей высокостепенных гармоник модели EIGEN-6C4, что приводит к появлению эффекта “гранулированности” выходных данных модели в диапазоне высоких частот.

На втором этапе сравнивались значения АСТ, вычисленные по моделям EGM2008, EIGEN-6C4 и GECO, с аномалиями, измеренными морским гравиметрическим комплексом “Шельф-Э” [Краснов, Соколов, Элинсон, 2014] в акватории Бенгальского залива. Карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе для рассматриваемого района и результаты сопоставления данных цифровой гравиметрической карты и модельных значений АСТ приведены на рис. 5.

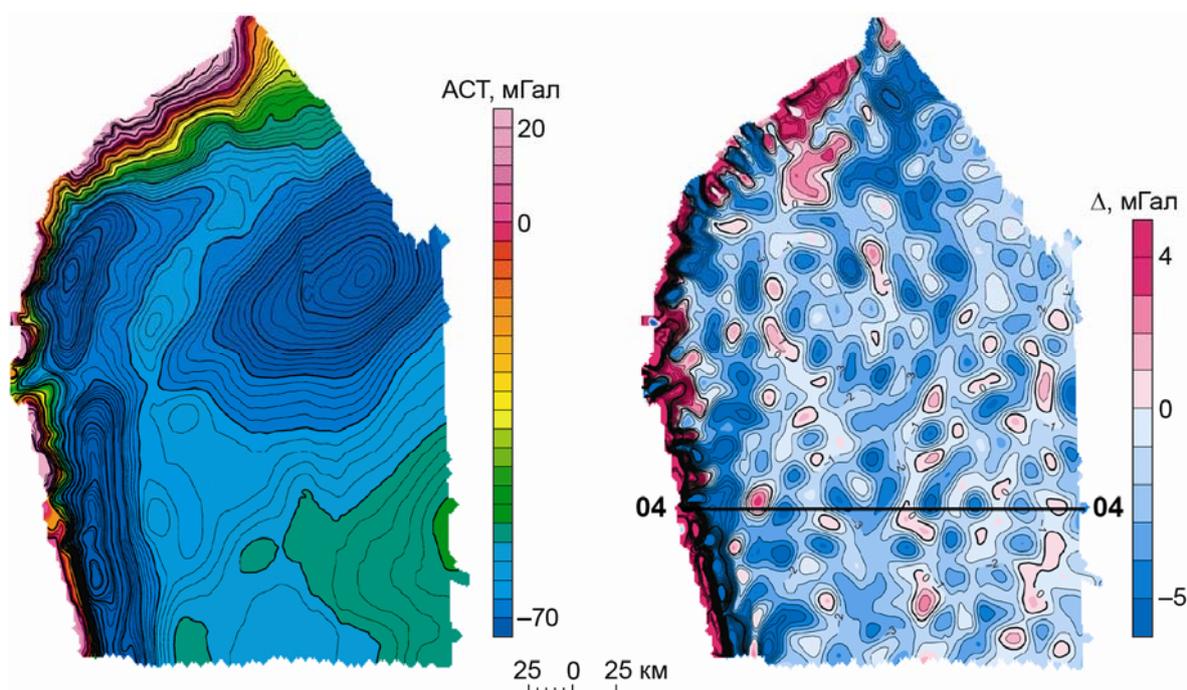


Рис. 5. Район Бенгальского залива. *Слева:* карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе. Сечение изолиний – 2 мГал. *Справа:* площадное распределение отклонений цифровой гравиметрической карты от модельных значений АСТ, вычисленных по модели EGM2008. Сечение изолиний – 1 мГал. Утолщенная линия – положение съемочного профиля 04–04, вдоль которого построены графики измеренных и модельных значений АСТ

Fig. 5. Bay of Bengal. (Left) the map of free-air gravity anomalies; contour interval is 2 mGal. (Right) the areal distribution of deviations of the digital gravimetric map from model gravity anomalies calculated from the EGM2008 model; contour interval is 1 mGal. The thick line is the profile 04–04, along which the graphs of measured and model gravity anomalies are plotted

Гравиметрическая съемка была выполнена на площади 65455 км² по меридиональным профилям при расстоянии между ними в зависимости от глубины моря от 1.5 до 4 км. Значения систематической погрешности съемки и случайной погрешности единичного измерения, определяемые по невязкам в точках пересечения профилей, оценивались как 0.23 и 0.30 мГал соответственно. После стандартного уравнивания съемки случайная погрешность единичного измерения составила 0.16 мГал.

Таким образом, с учетом густоты сети профилей выполненная в акватории Бенгальского залива съемка соответствует масштабу 1:200000. Отчетный каталог содержит 736345 пунктов с шагом между ними ~30 м.

Статистические характеристики расхождений измеренных и модельных значений АСТ приведены в табл. 2, 3, первая из которых составлена по результатам сравнения вычисленных в узлах равномерной сетки модельных значений АСТ со значениями, измеренными в пунктах гравиметрического каталога (число точек сравнения 736345). Табл. 3 содержит результаты сравнения тех же модельных значений АСТ с цифровой гравиметрической картой, полученной путем пересчета измеренных значений АСТ в узлы равномерной сетки с шагом 1 км (65455 точек сравнения).

В таблицах представлены четыре варианта сравнения данных гравиметрической съемки с модельными значениями АСТ. В варианте 1 использованы значения АСТ, вычисленные по модели EGM2008 на равномерной сетке меридианов и параллелей с шагом 2.5' (эти данные на протяжении последних лет применяются ИФЗ РАН для оперативного внешнего контроля погрешностей гравиметрических съемок); в вариантах 2–4 – значения АСТ, вычисленные на такой же сетке с шагом 0.5' по моделям EGM2008 (2), GECO (3), EIGEN-6C4 (4).

Таблица 2. Статистические характеристики отклонений данных гравиметрической съемки от модельных значений АСТ

Статистики отклонений	Вариант сравнения			
	1	2	3	4
Среднее значение, мГал	-1.50	-1.47	-1.60	-2.18
Стандартное отклонение, мГал	4.76	4.65	4.72	4.94
Минимальное значение, мГал	-25.24	-24.58	-27.45	-32.04
Максимальное значение, мГал	41.87	41.30	38.86	32.30

Таблица 3. Статистические характеристики отклонений цифровой гравиметрической карты от модельных значений АСТ

Статистики отклонений	Вариант сравнения			
	1	2	3	4
Среднее значение, мГал	-1.67	-1.65	-1.56	-1.93
Стандартное отклонение, мГал	4.37	4.27	4.41	4.72
Минимальное значение, мГал	-25.60	-24.88	-27.42	-31.86
Максимальное значение, мГал	39.70	39.14	36.74	30.00

Приведенные в таблицах сравнительные оценки показывают, что в целом результаты гравиметрической съемки, представленные как в виде измеренных значений АСТ в гравиметрических пунктах, так и в виде значений АСТ, пересчитанных из гравиметрических пунктов в узлы регулярной сетки, наиболее близки к данным модели EGM2008. Особенно хорошо это видно при дискретизации с шагом 0.5', уменьшающим влияние погрешности интерполяции.

Детальное представление о площадном распределении погрешностей модели EGM2008 в тестовом районе дает рис. 5, справа, где графически показаны отклонения цифровой гравиметрической карты от модельных значений АСТ.

В рамках сравнительных исследований представляет интерес рассмотрение не только площадного распределения анализируемых характеристик, но и графиков, построенных по измеренным и модельным значениям АСТ. Ранее такой методический прием оценки гравиметрических съемок использовался в [Конешов, Непоклонов, Соловьёв, 2014]. Авторами настоящей работы аналогичное сравнение выполнено по линии съемочного профиля 04–04, положение которого утолщенной прямой показано на рис. 5, *справа*; графики, построенные по линии профиля, приведены на рис. 6.

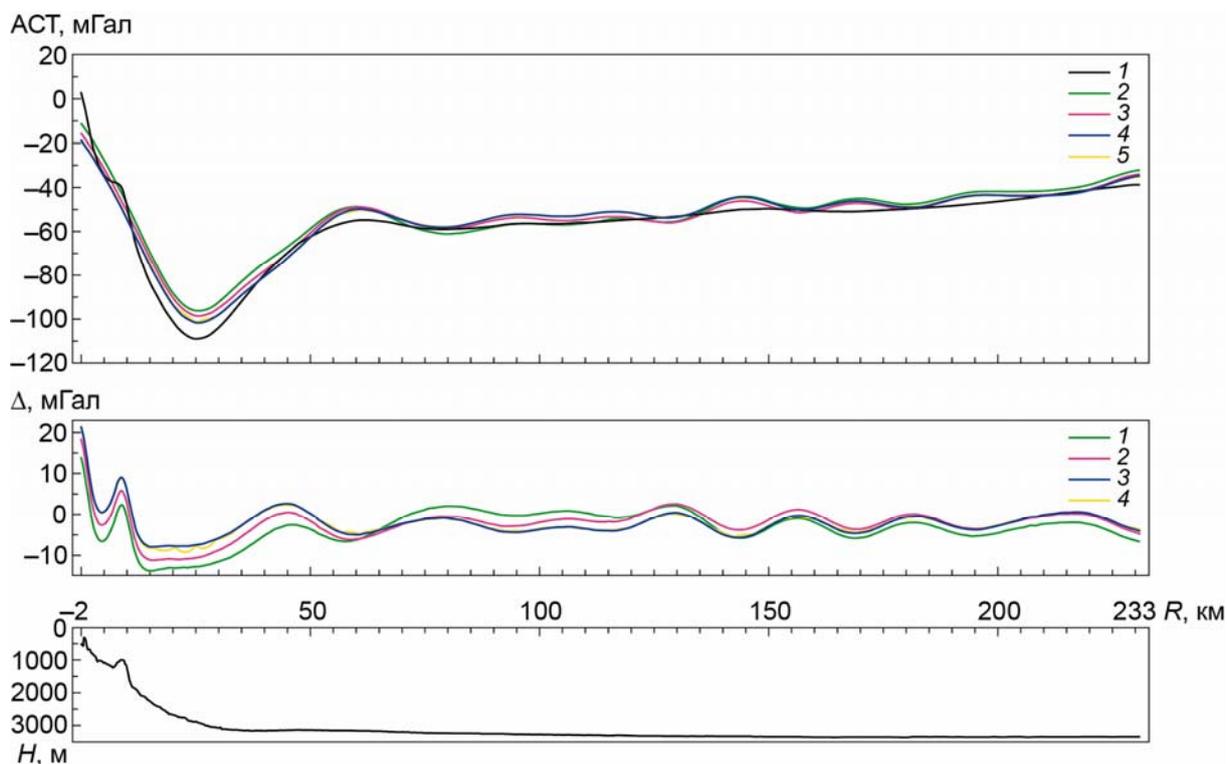


Рис. 6. Район Бенгальского залива. Графики измеренных и модельных АСТ и разностей, построенные по линии профиля 04–04. *Вверху:* кривая 1 – график измеренных АСТ; 2–4 – графики АСТ по данным трех разных моделей на сетке с шагом 0.5': EIGEN-6C4 (2), GECO (3), EGM2008 (4); 5 – график АСТ по данным модели EGM2008 на сетке с шагом 2.5'; *по центру:* кривые 1–3 – графики разностей между измеренными и модельными АСТ на сетке с шагом 0.5' для EIGEN-6C4 (1), GECO (2), EGM2008 (3); 4 – то же на сетке с шагом 2.5' для модели EGM2008 (4); *внизу:* рельеф морского дна, H , м – глубина моря

Fig. 6. Bay of Bengal. Graphs of measured and modeled gravity anomalies and its differences for profile 04–04 (see Fig. 5). (Top) Graph of measured gravity anomalies (1); graphs of gravity anomalies for three different models on the grid with a step of 0.5': EIGEN-6C4 (2), GECO (3), EGM2008 (4); graph of gravity anomaly for EGM2008 on the grid with a step of 2.5' (5). (Middle) Graphs of differences between measured and model gravity anomalies on the grid with a step of 0.5' for EIGEN-6C4 (1), GECO (2), EGM2008 (3); the same on the grid with a step of 2.5' for EIGEN-6C4 (4). (Bottom) The topography of seabed (H , м – the depth of the sea)

Выбранный профиль 04–04 проходит над континентальным склоном, его подножием и плавно погружающейся абиссальной долиной. На верхнем фрагменте рис. 6 приведено сопоставление графика измеренных АСТ и графиков АСТ по данным трех моделей – EIGEN-6C4, GECO, EGM2008 – на сетке с шагом 0.5' и 2.5' (для модели

EGM2008). На среднем фрагменте сопоставлены графики разностей между измеренными и модельными АСТ для тех же моделей; на нижнем показан график глубин моря на исследуемой акватории. Общий вид графиков показывает, что на выбранном профиле все исследуемые модели в целом хорошо согласуются между собой. При этом можно отметить следующие особенности поведения модельных значений АСТ.

В зоне относительно ровного рельефа морского дна при глубинах более 3000 м и соответственно ровного поля для всех моделей наблюдаются ложные аномалии с периодом около 25 км и амплитудой ~5 мГал. В зоне континентального склона и его подножия все модели “срезают” измеренные АСТ.

Вероятно, отмеченные особенности в той или иной степени отражают специфику данных спутниковой альтиметрии, использованных при создании моделей, в том числе наличие высокочастотных шумов и ухудшение точностных характеристик в прибрежных районах. Наиболее близкой к измеренным АСТ в исследуемом районе оказалась модель EGM2008.

Результаты проведенного сравнительного исследования показывают, что не только на суше, но и на акватории Мирового океана современные ультравысокостепенные модели гравитационного поля Земли близки между собой в части восстановления аномалий силы тяжести, что согласуется с оценками, полученными в других работах.

Иными словами, на сегодняшний день по отношению к модели EGM2008 более поздние ультравысокостепенные модели ГПЗ существенных улучшений в плане точности определения АСТ не имеют, что указывает на возможность сохранения существующей практики использования модели EGM2008 для внешнего контроля результатов гравиметрических съемок. При этом для уменьшения погрешности интерполяции в районах повышенной аномальности возможен переход к использованию более густых (с шагом 0.5–1') сеток модельных значений АСТ.

Заключение

На основании проведенных исследований и полученных результатов могут быть сделаны следующие основные выводы.

1. Реализация в рамках проектов GRACE и GOCE новых методов космической геодезии, обеспечивающих существенное повышение точности определения планетарного гравитационного поля Земли в диапазоне длинных и средних волн, и общее улучшение гравиметрической изученности континентов и акваторий Мирового океана способствовали переходу к созданию нового поколения глобальных моделей ГПЗ в виде сферических гармоник геопотенциала – так называемых ультравысокостепенных моделей, обладающих повышенной точностью и пространственным разрешением.

2. В числе существующих моделей данного класса наиболее детальными на сегодняшний день являются модели до 2190-й степени, ведущее положение среди которых по области применения на протяжении последнего десятилетия занимает модель EGM2008, в связи с отсутствием отечественных аналогов используемая в нашей стране для анализа и контроля результатов гравиметрических съемок. Появление новых моделей ГПЗ в виде сферических гармоник до 2190-й степени, таких как, созданные в отличие от EGM2008 с использованием данных низкоорбитальной спутниковой гравитационной градиентометрии, обуславливает необходимость проведения мониторинга точностных возможностей ультравысокостепенных моделей ГПЗ в районах текущих и перспективных гравиметрических работ.

3. Судя по результатам предшествующих работ и новым экспериментальным данным, полученным в рамках представленного в статье исследования, сравнительные оценки ультравысокостепенных моделей ГПЗ позволяют говорить о том, что модели EGM2008, EIGEN-6C4 и GECO близки по своим выходным данным в части АСТ. Вследствие этого отсутствуют веские основания для отказа от использования модели EGM2008 до 2190-й степени при оперативной обработке материалов крупномасштабных гравиметрических съемок в пользу какого-либо другого известного аналога. Тем не менее, представляется целесообразным продолжение мониторинговых исследований глобальных моделей ГПЗ, относящихся к категории моделей повышенной точности и пространственного разрешения, с охватом новых районов земного шара и использованием получаемой при этом новой информации.

Литература

- Канушин В.Ф., Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарева А.М., Косарев Н.С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 270 с.
- Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Новый аэроморской гравиметр серии “Чекан” // Гироскопия и навигация. 2014. № 1. С.26–34.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Соловьёв В.Н. Сравнение глобальных моделей аномалий гравитационного поля Земли с аэрогравиметрическими измерениями при трансконтинентальном перелете // Гироскопия и навигация. 2014. № 2. С.86–94.
- Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Сермягин Р.А., Лидовская Е.А. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С.107–118.
- Маркович К.И. Анализ новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по геодезическим и гравиметрическим данным применительно к Полоцкому геодинамическому профилю // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство, прикладные науки, геодезия. 2015. № 8. С.190–193.
- Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. СПб.: ГНЦ РФ АО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 2017. 389 с.
- Förste Christoph, Bruinsma Sean L., Abrikosov Oleg, Lemoine Jean-Michel, Marty Jean Charles, Flechtner Frank, Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. EIGEN-6C4. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // [Электронный ресурс] URL <http://icgem.gfz-potsdam.de/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>. 2014.
- Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008 // *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2016. V. 60. P.228–247. doi: 10.1007/s11200-015-1114-4
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *JGR Solid Earth*. 2012. V. 117. Issue B4 [Электронный ресурс]. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JB008916>

Сведения об авторах

КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

НЕПОКЛОНОВ Виктор Борисович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: vbnep@mail.ru

СОЛОВЬЁВ Владимир Николаевич – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: solovyevvladimir318@mail.ru

ЖЕЛЕЗНЯК Леонид Кириллович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(496) 256-13-07. E-mail: zlkledovo@yandex.ru

COMPARISON OF MODERN GLOBAL ULTRA-HIGH-GRADE MODELS OF THE EARTH GRAVITATIONAL FIELD

V.N. Koneshov, V.B. Nepoklonov, V.N. Solovjev, L.K. Jeleznjak

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The experimental results of the high-frequency noise evaluation in modern ultrahigh-grade models of the gravitational field of the Earth are presented. In estimating the errors, a comparison of the values of the gravity anomalies was made calculated using modern ultrahigh-grade models in the test regions of the World Ocean. In addition, the values of anomalies calculated by the models were compared with the control data of marine gravimetric surveys. The analysis and interpretation of the obtained estimates of errors of ultrahigh-grade models were carried out. Judging by the experimental data obtained in the framework of the study, comparative estimates of anomalies of the gravitational field models of the Earth, suggest that the EGM2008, EIGEN-6C4 and GECO models are almost the same or close in the calculated anomalies. The article suggests practical recommendations for the use of ultrahigh-degree models.

Keywords: gravitational field of the Earth, model, spherical harmonics, gravity anomalies, comparative studies, accuracy, sea gravimetric survey, Bering Sea, Bay of Bengal.

References

- Förste Christoph, Bruinsma Sean L., Abrikosov Oleg, Lemoine Jean-Michel, Marty Jean Charles, Flechtner Frank, Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. EIGEN-6C4. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. URL <http://icgem.gfz-potsdam.de/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>. 2014.
- Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2016, vol. 60, pp. 228-247, doi: 10.1007/s11200-015-1114-4
- Kanushkin V.F., Karpik A.P., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Kosareva A.M., Kosarev N.S. *The study of modern global models of the gravitational field of the Earth*. Novosibirsk, SGUG and T, 2015, 270 p.
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Lidovskaya E.A., Sermyagin R.A., Modern Global Earth's Gravity Field Models and their Errors, *Gyroscopy and Navigation*, 2013, vol. 4, no. 5, pp. 147-155.
- Koneshov V.N., Nepoklonov V.B., Solov'ev V.N., Comparison of Global Earth's Gravity Field Models with Aerogravimetric Data Obtained during a Transcontinental Flight, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 231-238.
- Krasnov A.A., Sokolov A.V., Elinson L.S., A New Air-Sea Shelf Gravimeter of the Chekan Series, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 131-137.

- Marcovitch K.I., Analysis of the latest global gravitational model of the Earth EIGEN-6C4 according to geodetic and gravimetric data in relation to the Polotsk geodynamic profile, in *Herald of Polotsk State University. Series F. Construction, applied sciences, geodesy*, 2015, no. 8, pp. 190-193.
- Modern methods and means of measuring the parameters of the gravitational field of the Earth. SPb, GNC RF AO "Koncern "CNEE "Electropribor", 2017, 389 p.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *JGR Solid Earth*, 2012, vol. 117, iss. B4. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JB008916>