

А. П. КАРПИК, В. Ф. КАНУШИН, И. Г. ГАНАГИНА, Д. Н. ГОЛДОБИН, Е. М. МАЗУРОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО КОСМИЧЕСКИМ МИССИЯМ CHAMP, GRACE И GOCE

В статье приведены результаты исследования спектральных характеристик современных глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим гравиметрическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE. Выполнена оценка разрешающей способности при заданной точности.

Ключевые слова: спектральные характеристики, космические гравиметрические миссии CHAMP, GRACE и GOCE, разрешающая способность, точность, сравнительный анализ.

Введение

Исследование моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) является актуальной задачей в связи с быстро развивающимися технологиями и методами изучения окружающего пространства для решения научных и практических задач в различных отраслях знаний, включая науки о Земле. В последние годы достигнуты большие успехи в области совершенствования и разработки новых средств и методов космической геодезии, использования их для определения параметров фигуры и гравитационного поля Земли, а также для исследования геодинамических и океанологических явлений. На современном этапе более строго ставится задача высокоточного изучения тонкой структуры гравитационного поля, позволяющая создавать детальные высокоточные цифровые модели дериват гравитационного поля и морской топографической поверхности. Детальное изучение аномального гравитационного поля позволяет исследовать и моделировать силы, являющиеся причинами различных геодинамических процессов, расширяет возможности разведки месторождений полезных ископаемых и разработки высокоточной навигации.

Карпик Александр Петрович. Доктор технических профессор, ректор ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (г. Новосибирск).

Канушин Вадим Федорович. Кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Ганагина Ирина Геннадьевна. Кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой физической геодезии и дистанционного зондирования ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Голдобин Денис Николаевич. Инженер кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Мазурова Елена Михайловна. Доктор технических наук, профессор кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Традиционной формой описания моделей глобального гравитационного поля Земли является разложение геопотенциала в ряд Фурье по системе сферических функций геоцентрических координат – геоцентрического радиус-вектора r , широты φ и долготы λ в виде

$$V = \frac{fM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (1)$$

где fM – геоцентрическая гравитационная постоянная; a_e – экваториальный радиус Земли; C_{nm} и S_{nm} – безразмерные гармонические коэффициенты геопотенциала степени n и порядка m ; P_{nm} – присоединенные функции Лежандра.

Разложение в ряд (1) представляет собой спектральное разложение структуры ГПЗ по волнам длиной $360^\circ/n$, что соответствует разрешению в пространстве

$$\Delta = \frac{180^\circ}{n}.$$

С шестидесятых годов прошлого столетия доминировали динамические методы космической геодезии по абсолютным определениям гармонических коэффициентов геопотенциала. В тот период были созданы чисто спутниковым методом достаточно надежные модели гравитационного поля Земли: SE-1, SE-3 – модели Смитсоновского астрономического института (США), GEM-1, GEM-3, GEM-5, GEM-7 и GEM-9 – модели Центра космических полетов им. Годдарда (США) [10]. Исследования созданных моделей показали, что чисто спутниковые выводы гармонических коэффициентов при полном их наборе целесообразны для степени $n \leq 10$.

Технические достижения в области космических исследований в последнее время стимулировали существенный прогресс в изучении гравитационного поля Земли. Для решения современных задач геодезии, геофизики, океанографии, геодинамики и других наук, которые используют данные о ГПЗ, необходимо иметь глобальные модели гравитационного поля в виде (1), ограниченные степенью и порядком $n = m > 200$ и, следовательно, достигнуть пространственное разрешение менее 100 км. Такие модели должны обеспечивать точность определения аномалий силы тяжести в пределах 2-3 мГал, погрешности при определении высот геоида в пределах 2-3 см [7, 11].

Новые космические гравиметрические миссии, основанные на межспутниковых измерениях, спутниковой альтиметрии и градиентометрии, позволяют изучать аномальный геопотенциал с высокой точностью и с высоким пространственным разрешением, а также изучать его временные вариации [1].

По результатам космических гравиметрических миссий зарубежные специалисты создали ряд моделей гравитационного поля Земли с высокой пространственной разрешающей способностью и улучшенными точностными характеристиками гармонических коэффициентов геопотенциала C_{nm} и S_{nm} [12].

Модель гравитационного поля Земли без оценки ее точности имеет ограниченную ценность. Поэтому актуальны достоверные оценки точности и их вариаций с изменением длины волны.

В научной литературе имеется достаточное количество публикаций, посвященных современным глобальным моделям гравитационного поля по результатам различных космических миссий, их анализу с применением наземной информации [1, 2, 3, 6, 8, 9].

Целью данного исследования являются оценка разрешающей способности современных глобальных моделей гравитационного поля, полученных по результатам измерений космических гравиметрических миссий CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) и GOCE (Global Ocean Circulation Experiment), и их сравнение.

Данная информация о разрешающей способности и точности глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) может служить руководством для проектирования будущих исследований геопотенциала.

Постановка и решение задачи

Космические гравиметрические миссии CHAMP, GRACE и GOCE основаны на межспутниковых измерениях и градиентометрии.

В проекте CHAMP реализована система «спутник – спутник» SST-HL, один из которых «высокий», другой «низкий». Реализация данного проекта возложена на Научно-исследовательский центр Потсдама (GeoForschungZentrum Potsdam (Германия)).

Система «спутник – спутник» SST-LL, в которой оба спутника «низкие», реализована в проекте GRACE. Это совместный проект Американского национального управления по аэронавтике и космонавтике (NASA) и Немецкого центра авиационных и космических полетов (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR).

Проект GOCE – совместный проект многолетней работы исследователей и инженеров из 45 европейских компаний (Европейское космическое агентство – ESA – European Space Agency) – предназначен для исследования гравитационного поля Земли в целях уточнения гармонических коэффициентов для степеней 100–250, определения формы земного геоида с точностью 1–2 см и аномалий гравитационного поля с точностью порядка 1 мГал. Для этого на спутнике установлен градиентометр, который выполняет измерение гравитационного поля с высочайшей точностью. Точность измерений обеспечивают шесть чувствительных акселерометров, способных почувствовать отклонение в силе притяжения в одну десятиллионную от нормального уровня. Помимо градиентометра GOCE оснащен навигационным прибором, принимающим сигналы GPS для точного позиционирования аппарата над поверхностью Земли, а лазерный отражатель позволяет с высокой точностью отслеживать движение спутника с помощью наземных лазеров.

В режиме «высокий – низкий» системы «спутник–спутник» определяются координаты местоположения и скорость или ускорение спутника. При этом основным объектом измерений является гравитационное ускорение. Трехмерное ускорение соответствует ускорению силы тяжести. Математически это выражается первыми производными гравитационного потенциала. В режиме «низкий – низкий» системы «спутник – спутник» измеряются расстояния между спутниками, скорость изменения или разности ускорения между двумя спутниками, движущимися по одной и той же низкой орбите. Разности ускорения между двумя спутниками математически выражаются разностями производных гравитационного потенциала на длинном базисе. Результатом спутниковой градиентометрии являются разности трехмерного ускорения, относящиеся к очень короткому базису. Градиенту ускорения соответствует градиент компонентов си-

лы тяжести. Математически это выражается вторыми производными гравитационного потенциала.

Особенностью изучения гравитационного поля спутниковыми методами является преобразование результатов измерений со спутниковых высот на земную поверхность, что приводит к увеличению неизбежных погрешностей измерений, обусловленных ослаблением гравитационного поля с высотой. Этот эффект минимизируется при использовании орбиты настолько низкой, насколько это возможно, и измерении вторых производных потенциала как изменений силы тяжести.

В табл. 1 представлена основная информация по глобальным моделям геопотенциала, созданным по результатам космических миссий.

Т а б л и ц а 1

№	Модель	Год публикации	Степень N_0	Миссия
1	EIGEN-CHAMP05S	2010	150	S(CHAMP)
2	GO_CONS_GCF_2_SPW_R1	2010	210	S(GOCE)
3	GO_CONS_GCF_2_SPW_R2	2011	240	S(GOCE)
4	GO_CONS_GCF_2_TIM_R1	2010	224	S(GOCE)
5	GO_CONS_GCF_2_TIM_R2	2011	250	S(GOCE)
6	GO_CONS_GCF_2_TIM_R3	2011	250	S(GOCE)
7	GO_CONS_GCF_2_TIM_R4	2013	250	S(GOCE)
8	GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	2014	280	S(GOCE)
9	GOCO01S	2010	224	S(GOCE,GRACE)
10	GOGRA04S	2014	230	S(GOCE,GRACE)
11	ITG-Goce02	2013	240	S(GOCE)
12	JYY_GOCE02S	2013	230	S(GOCE)
13	JYY_GOCE04S	2014	230	S(GOCE)
14	ULux_CHAMP2013s	2013	120	S(CHAMP)

Исследуемые модели геопотенциала Земли доступны на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе Потсдам (ICGEM), который является одним из шести центров Международной гравитационной полевой службы Международной ассоциации геодезии [<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>].

В настоящее время ICGEM содержит более 150 моделей, и все они доступны в виде нормированных коэффициентов сферических гармоник в стандартном формате, который был принят Европейским космическим агентством в качестве официального формата данных проекта GOCE.

Для оценки разрешающей способности рассматриваемых в настоящей работе современных глобальных моделей ГПЗ, полученных по результатам космических гравиметрических миссий, используется информация, которая содержится в коэффициентах C_{nm} и S_{nm} разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям (1). Для этого, преобразовав уравнение (1), перейдем к математическим ожиданиям. Так как сферические функции ортогональны, то в результате получим

$$D_{N_0} = \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2), \quad (2)$$

где N_0 – максимальная степень модели; $\bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ – нормированные безразмерные гармонические коэффициенты модели геопотенциала.

Совокупность степенных дисперсий (3) составляет спектр гравитационного поля в предположении его изотропности [4]

$$D_n = \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2) \quad (3)$$

где $n = 2 \dots N_0$.

Используя гармонические коэффициенты $\bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ исследуемых моделей из формул (2) и (3), получим погрешность аппроксимации гравитационного потенциала рядом (1), ограниченного степенью N :

$$\delta_N^2 = D_{N_0} - \sum_{n=2}^N D_n, \quad (4)$$

где $N = 2 \dots N_0 - 1$.

Предельное для рассматриваемой модели геопотенциала значение N -степени разложения в ряд (1) может быть выбрано в зависимости от величины дисперсии δ_N в предположении отсутствия помех. Чем меньшее значение δ_N необходимо достичь, тем больше должно быть N [3].

Для определения зависимости погрешности $\delta \Delta g_N$ аппроксимации аномалий силы тяжести Δg от степени разложения N представим Δg в виде ограниченного ряда Фурье по системе сферических функций

$$\Delta g = \gamma \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi), \quad (5)$$

где $\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$; γ – нормальное значение силы тяжести; $\bar{C}_{nm}^0$ – гармонические коэффициенты нормального потенциала притяжения.

Сферические степенные дисперсии Δg выражаются через коэффициенты $\Delta \bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ следующим образом:

$$D_{\Delta g_n} = \gamma^2 (n-1)^2 \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2). \quad (6)$$

Результаты вычисления погрешностей аппроксимации $\delta \Delta g$ для исследуемых глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям, с учетом формулы (5) представлены на рис. 1.

Для определения зависимости погрешностей аппроксимации $\delta \zeta_N$ высот квазигеоида ζ от степени разложения N представим ζ в виде ограниченного ряда Фурье по системе сферических функций.

$$\zeta = R \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi), \quad (7)$$

где R – средний радиус Земли.

Сферическая степенная дисперсия высот квазигеоида ζ определяется выражением

$$D_{\zeta_n} = R^2 \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2). \quad (8)$$

Результаты вычисления погрешностей аппроксимации $\delta\zeta_N$ для исследуемых глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям, с учетом формулы (7) представлены на рис. 2.

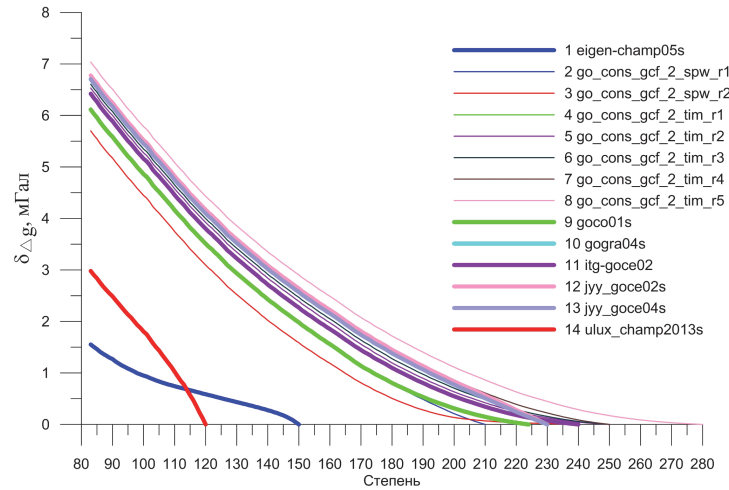


Рис. 1. Зависимость погрешности аппроксимации аномалий силы тяжести от степени N , ограничивающей ряд (5) (1–14 – номера модели геопотенциала по табл. 1)

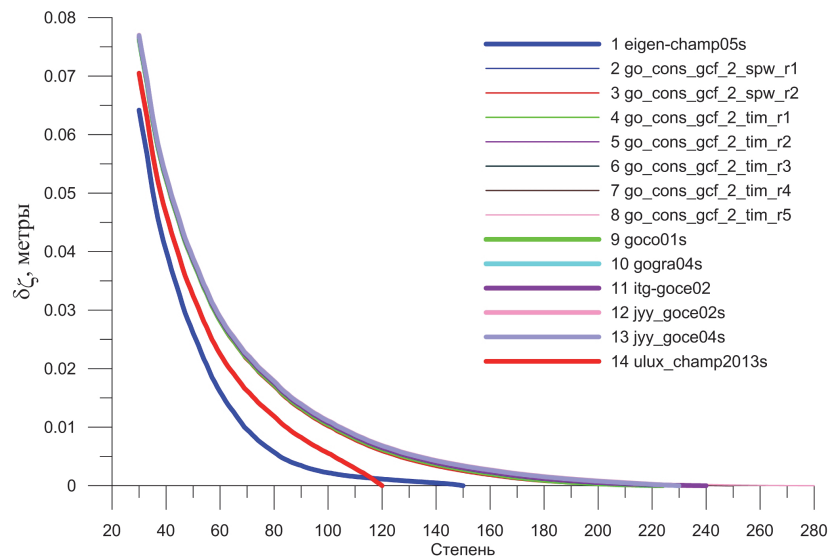


Рис. 2. Зависимость погрешности аппроксимации высот квазигеоида от степени N , ограничивающей ряд (7)

Из рис. 1 и 2 видно, что погрешности аппроксимации аномалий силы тяжести и погрешности аппроксимации высот квазигеоида убывают с увеличением степени N . Причем погрешности аппроксимации $\delta\Delta g$ аномалий силы тяжести убывают медленнее, чем погрешности аппроксимации $\delta\zeta$.

Для вычисления относительных погрешностей гармонических коэффициен-

тов $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ исследуемых моделей геопотенциала от степени N разложения ряда (1) получена формула

$$d_n = \frac{\sum_{m=2}^n (\sigma \bar{C}_{nm}^2 + \sigma \bar{S}_{nm}^2)}{\sum_{m=2}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2)}, \quad (9)$$

где $\sigma \bar{C}_{nm}$ и $\sigma \bar{S}_{nm}$ – погрешности определения коэффициентов $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ соответственно.

На рис. 3 представлены графики зависимости относительных погрешностей d_n определения коэффициентов $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$, вычисленных по формуле (9).

На вертикальной оси отложена логарифмическая шкала относительных погрешностей d_n . Значение, равное 1, соответствует погрешности, равной абсолютным значениям гармонических коэффициентов.

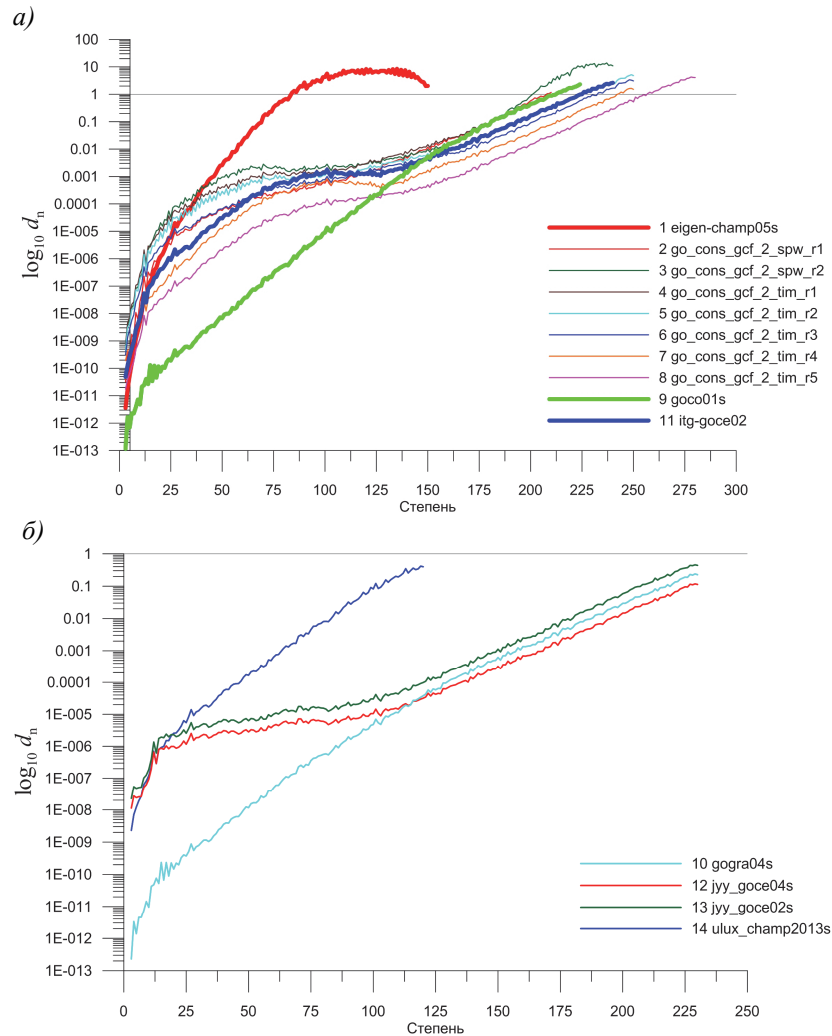


Рис.3. Относительные погрешности определения коэффициентов $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$

Анализируя приведенные на рис. 3, а графики, приходим к выводу, что при увеличении степени n относительные погрешности d_n определения гармонических коэффициентов $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ для моделей 1-8 (табл. 1) быстро увеличиваются с возрастанием степени от 20 до 25. Затем рост погрешности d_n замедляется и сравнивается со значениями коэффициентов: для модели 1 при $n = 84$; для моделей 2–11 при n от 200 до 260. Приведенные на рис. 3, б относительные погрешности коэффициентов моделей 10, 12, 13 и 14 не превосходят абсолютных значений определяемых коэффициентов.

Степенные дисперсии абсолютных значений гармонических коэффициентов аномалий силы тяжести Δg вычислены по формуле (6), а дисперсии их абсолютных погрешностей $\sigma\bar{C}_{nm}$ и $\sigma\bar{S}_{nm}$ – по формуле

$$D_{\sigma\Delta g_n} = \gamma^2 (n-1)^2 \sum_{m=0}^n (\sigma\bar{C}_{nm}^2 + \sigma\bar{S}_{nm}^2) \quad (10)$$

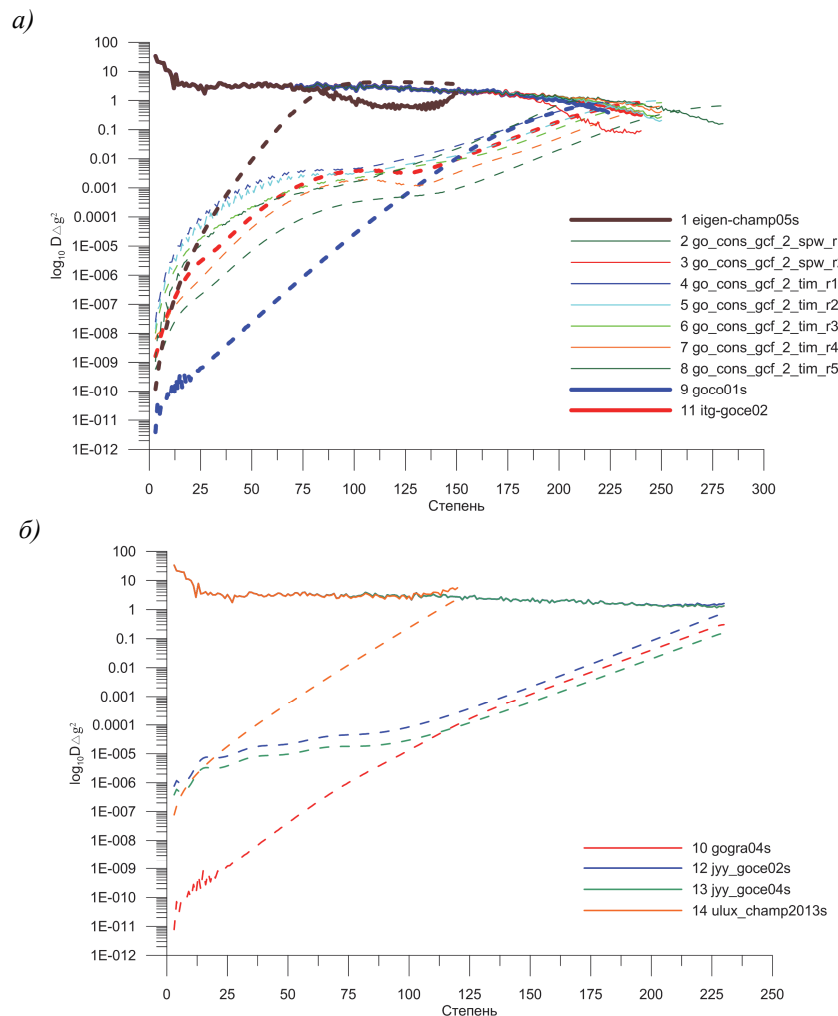


Рис. 4. Дисперсии коэффициентов и дисперсии абсолютных погрешностей аномалий силы тяжести Δg

На рис. 4 приведены графики степенных дисперсий коэффициентов и дисперсии абсолютных погрешностей коэффициентов аномалий силы тяжести Δg .

Сплошные линии соответствуют дисперсиям коэффициентов, пунктирные линии – дисперсиям их погрешностей.

Графики степенных дисперсий коэффициентов и дисперсий их погрешностей, приведенные на рис. 4, а, показывают следующее. Степенные дисперсии, соответствующие коэффициентам моделей 2–11 (табл. 1), становятся равными дисперсиям их ошибок при значениях степени n от 200 до 260. Кривая степенной дисперсии модели 1 пересекает кривую дисперсии ошибок при $n = 87$. Приведенные на рис. 4, б графики степенных дисперсий моделей 10, 12, 13 и 14 не достигают кривых дисперсий их ошибок.

Обсуждение результатов

В табл. 2 приведены результаты исследований спектральных характеристик глобального гравитационного поля Земли по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE в целях оценки разрешающей способности современных глобальных моделей геопотенциала. Критерием оценки точности для значения высоты квазигеоида ζ и аномалии силы тяжести приняты значения, заявленные разработчиками проекта GOCE: 1 см и 1 мГал соответственно.

Т а б л и ц а 2

№	Модель	Максимальная степень модели N_0	Δ (км) при N_0	Степень n при $d_n = 1$	Δ (км) при $d_n = 1$	Степень n при $\delta\zeta < 1$ см	Степень n при $\delta\Delta g < 1$ мГал	Δ (км) при $\delta\zeta < 1$ см	Δ (км) при $\delta\Delta g < 1$ мГал
1	EIGEN-CHAMP05S	150	130	84	231	70	98	278	198
2	GO_CONS_GCF_2_S PW_R1	210	92	208	93	102	174	191	112
3	GO_CONS_GCF_2_S PW_R2	240	81	201	97	100	165	194	118
4	GO_CONS_GCF_2_T IM_R1	224	86	213	91	103	174	189	112
5	GO_CONS_GCF_2_T IM_R2	250	77	226	86	104	187	187	104
6	GO_CONS_GCF_2_T IM_R3	250	77	233	83	104	190	187	102
7	GO_CONS_GCF_2_T IM_R4	250	77	243	80	105	195	185	100
8	GO_CONS_GCF_2_T IM_R5	280	70	257	76	106	205	183	95
9	GOCO01S	224	86	213	91	102	174	191	112
10	GOGRA04S	230	85	-	-	105	193	185	101
11	ITG-GOCE02	240	81	225	86	103	184	189	106
12	JYY_GOCE02S	230	85	-	-	105	195	185	100
13	JYY_GOCE04S	230	85	-	-	105	193	185	101
14	ULUX_CHAMP2013 S	120	162	-	-	85	111	229	175

Из таблицы видно, что значение высоты квазигеоида ζ со среднеквадратической ошибкой не более 1 см можно определить для всех рассматриваемых моделей при учете гармоник до степеней n от 70 до 106. Значения аномалии силы тяжести со среднеквадратической ошибкой не более 1 мГал можно получить для исследуемых моделей при учете гармоник до степеней n от 98 до 205.

Из всех исследуемых глобальных моделей гравитационного поля, полученных за последние 4 года по космическим гравиметрическим миссиям, наилучшие характеристики демонстрируют модели проекта GOCE (ITG-Goce02, JYYGOCE02S, JYY_GOCE04S, GO_CONS_GCF_2_TIM_R5) и модель, полученная по двум космическим миссиям GOCE и GRACE (GOGRA04S).

Среди исследуемых моделей наилучшую разрешающую способность по N_0 , равную 70 км, имеет модель GO_CONS_GCF_2_TIM_R5 с максимальной степенью $N_0 = 280$ и разрешающей способностью для аномалий силы тяжести – 95 км, высот квазигеоида – 183 км.

Использование глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных только по космическим гравиметрическим миссиям, не является достаточным для получения высот квазигеоида с точностью 1-2 см с пространственным разрешением менее 100 км. Таким образом, спутниковые модели необходимо использовать в сочетании с наземными и топографическими данными для целей восстановления глобального квазигеоида.

Необходимы дальнейшие исследования глобальных моделей по результатам космической гравиметрической миссии GOCE как самой результативной миссии по изучению гравитационного поля Земли. Современные космические гравиметрические миссии в сочетании с наземными гравиметрическими измерениями дают уникальную возможность определять тонкую структуру гравитационного поля Земли.

В дальнейшем планируется оценить спутниковые модели по независимым надежным наземным наборам данных.

*Исследование выполнено при поддержке гранта
Российского научного фонда (проект №14-27-00068).*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Канушин, В.Ф.** Сравнение и анализ аномалий силы тяжести, полученных по данным глобальной модели EGM2008 и гравиметрических измерений на локальных участках земной поверхности / В.Ф., Канушин, И.Г. Ганагина, Д.Н. Голдобин, Б.А.Харченко / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Т. 1: геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: Сб. материалов Междунар. науч. конгр. «ИНТЕРЭКСПО ГЕО - СИБИРЬ - 2014», 16 -18 апреля 2014 г., Новосибирск. - Новосибирск. СГГА, 2014.- С. 197 - 203.
2. **Конешов, В.Н.** Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности. В.Н. Конешов, В.Б. Непоклонов, Р.А. Сермягин, Е.А. Лидовская. - М.: Гирскопия и навигация. - №1(80) . - 2013. - С. 107-117.
3. **Конешов, В.Н.** Сравнение глобальных моделей аномалий гравитационного поля земли с аэрогравиметрическими измерениями при трансконтинентальном перелете. В.Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, В.Н. Соловьев. – М.: Гирскопия и навигация. - №2(85) . – 2014. – С.86-94.
4. **Нейман Ю.М.** Вариационный метод физической геодезии. - М.: Недра, 1979. - 200 с.
5. **Пеллинен Л. П.** Высшая геодезия. - М.: Недра, 1978. - 264 с.
6. **Сугаипова, Л. С.** Сравнение современных моделей глобального гравитационного поля Земли. Л.С. Сугаипова. - М.: Известия вузов: Геодезия и аэрофотосъемка. - №6. - 2011. - С.14-20
7. **Яшкин, С.Н.** Некоторые аспекты спутниковой градиентометрии // Геопрофи. - 2007. - №4.

8. **Bruinsma, S.L., Marty, J.C., Balmino, G., Biancale, R., Foerste, C., Abrikosov, O. and Neumayer, H.**, 2010, GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method, Proceeding at the ESA Living Planet Symposium, 27th June - 2nd July 2010, Bergen, Norway; See also: earth.esa.int/GOCE.
9. **Gerlach, C. and Fecher, T.**, 2012, Approximations of the GOCE error variance-covariance matrix for least-squares estimation of height datum offsets, *J. Geod. Sci.*, 2, 4, 247-256.].
10. **Improvement** in the geopotential derived from satellite and surface data (GEM 7 and 8). 1977 // *Journ. Geophys. Research*, 82, № 5, p. 901 -914. Abm.: Wagner C. A., Lerch F. J., Brown J.E., Richardson J. A.
11. **Muller, J.** Gravity Satellite Mission and Their Application in Geosciences// Труды Международной Конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК, - М., 2004.
12. **Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K.** An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 / EGU General Assembly 2008. - Vienna, Austria, April 13 -18, 2008.

Abstract. The paper investigates spectral characteristics of modern global models of the Earth gravity field, obtained from space gravimetry missions CHAMP, GRACE and GOCE. The resolution is estimated for the given accuracy.

Key words: spectral characteristics, space gravimetry missions CHAMP, GRACE and GOCE, resolution, accuracy, comparative analysis

Материал поступил 14.10.14