На правах рукописи

Ву Хонг Куонг

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ КВАЗИГЕОИДА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ТЕРРИТОРИИ ВЬЕТНАМА

Специальность 25.00.32-Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА-2013

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии на кафедре Астрономии и космической геодезии.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Яшкин Станислав Николаевич.

Официальные оппоненты: **Конешов Вячеслав Николаевич,**
доктор технических наук, профессор,
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
заместитель директора.

Клюйков Александр Алексеевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт астрономии РАН (ИНАСАН),
отдел космической геодезии,
старший научный сотрудник.

Ведущая организация: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД».

Защита диссертации состоится «24» декабря 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу 105064, Москва, Гороховский пер., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Автореферат разослан «19» ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Вшивкова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Появление спутников и новых возможностей исследования гравитационного поля существенно расширило круг задач теории фигуры Земли. В последние десятилетия появились весьма высокоточные глобальные геопотенциальные модели (ГГМ) с высокой разрешающей способностью. Такая ситуация стала возможной благодаря внедрению новых методов и способов измерений.

С одной стороны, в этот период внедрялись разностные методы космической геодезии по изучению гравитационного поля Земли (ГПЗ) такие, как спутниковая альтиметрия, системы «спутник-спутник» (SST-метод, проекты CHAMP, GRACE и др.), спутниковая градиентометрия (SGG-метод, проекты «Аристотель», GOCE и др.), что позволило надежно определять коэффициенты гармоник ГПЗ весьма высокого порядка и степени. С другой стороны, в это же время значительно повысилась точность измерений как спутниковых (лазерные, GPS-измерения, радиодальномерные, доплеровские и т.д.), так и наземных (те же GPS и ГЛОНАСС-измерения, баллистические и обычные гравиметрические и т.д.).

Благодаря трудам профессора Тчернинг К.К. (Tscherning C.C.) и других авторов пакет программ «GRAVSOFT» эффективно используется и в настоящее время для совместной обработки разнородных данных в задаче построения квазигеоида.

Объединение спутниковых и наземных измерений позволило создать такие высокоточные ГГМ, как EGM 96, EGM 2008 и др. Это сделало возможным проводить актуальные исследования по определению и измерению гравитационных полей локальных и региональных районов Земли. Так, например, в диссертационной работе Рудницкой Н.И. показано, что для регионов со спокойным ландшафтом (на примере Белоруссии) ГГМ EGM 2008 дает хорошие результаты по изучению гравитационного поля при использовании довольно ограниченного числа наземных и спутниковых

опорных пунктов. В России Непоклоновым В.Б. исследованы существующие современные модели ГПЗ и даны их сравнительные оценки.

Во Вьетнаме в 2005 г. Институтом Кадастрового Исследования Вьетнама (ИКИВ) была построена модель квазигеоида с использованием модели EGM 96, наземных гравиметрических данных и спутниковых альтиметрических измерений. Точность определения высоты геоида этой модели составила около 0,4м. Задача построения более точной модели квазигеоида для последующей замены геометрического нивелирования спутниковым нивелированием на территории Вьетнама в настоящее время является актуальной.

В последние годы появилось множество спутниковых и комбинированных (спутниковые и наземные) ГГМ на базе проекта Европейского Космического Агентства (ЕКА) «GOCE». В статьях объявлено, что модели ГПЗ этого проекта являются более точными по сравнению с другими. Точность этих моделей, по заявлению руководителей проекта «GOCE», составляет 1-2 см для определения высот геоида, 1 мгал для определения аномалий силы тяжести с разрешением 100 км. Возникает необходимость исследования этих моделей и использовать их для целей создания локальных квазигеоидов. Была поставлена цель выполнить исследования на примере территории Вьетнама, хотя эта задача является актуальной для любых регионов со сходными условиями.

Цель диссертации

В работе ставится задача: опираясь на ГГМ, такие как EGM 96, EGM 2008 и модели проекта «GOCE», исследовать возможность и эффективность их использования в регионах со смешанным ландшафтом (равнинный и горный) для локальных и региональных участков Земли. В данной работе основными задачами являются:

1. исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли, особенно моделей проекта «GOCE» и его комбинированных моделей;
2. изучение возможности и эффективности применения GOCE-моделей для построения квазигеоида на территории Вьетнама;
3. разработка методики построения локального квазигеоида;

4. исследование комплекса программ для изучения гравитационного поля Земли как в общем виде, так, и для создания локального квазигеоида;

5. создание вспомогательных программ исследовательского программного комплекса.

Научная новизна работы

Данная диссертация является законченным научным исследованием. Оригинальные исследования автора состоят в следующем:

1. разработаны алгоритм и методика создания локального квазигеоида применительно к территории Вьетнама. Методика состоит из множества «подметодик». Каждая «подметодика» имеет свой подход для создания модели локального квазигеоида. Сравнение результатов этих созданных моделей позволяет получить лучшие модели, лучшие подходы и рекомендации для использования в данном локальном районе. В результате исследований идея комбинации коэффициентов низких гармоник модели GOCE-TIM4 четвертого поколения и высоких гармоник моделей EGM 2008 и EIGEN-6C доказала свое преимущество перед другими подходами;

2. разработаны программы обработки исходных данных для вычислений аномалий силы тяжести, высот квазигеоида из любой глобальной модели ГПЗ, а также программы для анализа результатов вычислений в среде программирования MatLab;

3. впервые выполнены исследования моделей ГПЗ проекта GOCE и комбинированных моделей этого проекта для территории Вьетнама. Впервые применены GOCE-модели для создания локального квазигеоида Вьетнама.

Практическая значимость работы.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что разработанная методика позволила получить модели квазигеоида с более высокой точностью. По этой методике были созданы 12 вариантов-моделей квазигеоида для Вьетнама. Лучшие из созданных моделей имеют стандартное отклонения (СТО) высот квазигеоида по сравнению с 62 контрольными пунктами по всей территории Вьетнама около 12 см; на севере страны - 15 см, в центре и на юге территории - 9см. Модели квазигеоида могут

быть использованы для замены традиционного нивелирования IV-го класса спутниковым нивелированием.

Кроме того, по разработанным программам можно вычислять аномалии силы тяжести и высоты квазигеоида из любой ГГМ, что дает возможность исследования современных ГГМ. По результатам данной работы даны рекомендации по использованию методики комбинации спутниковой геопотенциальной модели 4-го поколения GOCE-TIM4, коэффициентов высоких гармоник моделей EGM 2008 и EIGEN-6C, наземных гравиметрических данных, данных GPS-нивелирования и гравиметрических данных на территориях соседних стран и морей из каталога DTU10GRA.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Программы вычислений аномалий силы тяжести, высот квазигеоида из любой модели ГПЗ. А также программы для анализа результатов вычислений.
2. Методика создания локального квазигеоида для территории Вьетнама и рекомендации по ее практическому использованию.
3. Результаты исследований современных моделей гравитационного поля Земли, в том числе 10 GOCE-моделей и 6 комбинированных моделей применительно к территории Вьетнама.
4. Созданные 12 вариантов-моделей квазигеоида по разработанной методике для территории Вьетнама. Из них 6 моделей дали хорошие результаты по сравнению с контрольными пунктами (СТО 12-13 см).

Апробация результатов работы. Основные положения и выводы исследований в диссертации докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 5 апреля 2011г., 3 апреля 2012г. и 9 апреля 2013г.; на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава 28 мая 2013г. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в научном журнале «Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 23 таблицы и 40 рисунков. Объем диссертации 116 страниц. Список литературы включает 46 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко описаны актуальность, цели диссертации, новизна, а также выносимые на защиту основные результаты исследований, полученные самостоятельно автором при выполнении диссертации.

В **главе 1** описаны общие методы определения квазигеоида.

В первой главе описываются общие понятия о системе высот, общие методы определения локального квазигеоида. В данной главе представлены алгоритмы для вычислений высот квазигеоида и аномалий силы тяжести из любой модели гравитационного поля Земли.

В инженерных и научных приложениях используют системы: динамических $H^{дин.}$, ортометрических $H^{орт.}$, нормальных H^{γ} и геодезических $H^{г}$ высот.

Нормальная высота широко используется во многих странах мира. Во Вьетнаме все высоты пунктов государственной высотной сети определены в нормальной системе высот. В нашей стране высоты точек определяются в системе VN-2000 относительно нуля футштока Хонзау в городе Хайфоне.

Метод влияния остаточной топографии

Этот метод был описан впервые Рене Форсбергом в 1984г. Идея, лежащая в основе метода влияния остаточной топографии (RTM), заключается в том, что в дополнение к реальной топографии поверхности используют среднюю высоту поверхности (СВП), которая соответствует ГГМ. То есть имеется такое разрешение, в которое входят все гравитационные редукции топографии от СВП. В СВП уже должны быть включены все частоты ГГМ. В отличие от классического метода топографической редукции, которая представляет собой гравитационную редукцию топографической массы между уровнем от точки P и фактической топографической поверхностью, метод RTM учитывает влияние масс между СВП и фактической топографической поверхностью.

Формула для приближенного вычисления аномалий силы тяжести $\Delta\tilde{g}$ в свободном воздухе представлена таким образом

$$\Delta g \approx \Delta\tilde{g} = \Delta g^{ГГМ} + \Delta g^{rtm}, \quad (1)$$

где $\Delta g^{ГГМ}$ -аномалия силы тяжести, вычисленная из ГГМ; Δg^{rtm} -часть аномалии силы тяжести остаточной топографии, вычисленная с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР). Тогда остаточная ошибка аномалии силы тяжести $\Delta g^{ост.}$ будет иметь вид

$$\Delta g^{ост.} = \Delta g - \Delta\tilde{g} = \Delta g - \Delta g^{ГГМ} - \Delta g^{rtm}. \quad (2)$$

Остаточная часть высот квазигеоида, вызванная $\Delta g^{ост.}$, вычисляется по формуле

$$\zeta^{Ост.} = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma} S(\psi)\,\Delta g^{Ост.}\,d\sigma, \quad (3)$$

Основные алгоритмы вычисления

Аномалию силы тяжести можно рассчитать на основании ГГМ следующей формулой

$$\Delta g_n^{ГГМ} = \frac{GM}{r^2}\sum_{n=0}^{N\max}\left(\frac{a}{r}\right)^n (n-1)\sum_{m=0}^{n}(\overline{\Delta C}_{nm}\cos m\lambda' + \overline{\Delta S}_{nm}\sin m\lambda')\overline{P_{nm}}(\sin\varphi'), \quad (4)$$

где r, φ', λ' - сферические координаты пункта; GM - геоцентрическая гравитационная постоянная; GM -большая полуось Земли; $\overline{P_{nm}}(\sin\varphi')$ - полностью нормированные присоединенные функции Лежандра; $\overline{\Delta C}_{nm}, \overline{\Delta S}_{nm}$ - разности коэффициентов нормированных сферических функций реального и нормального полей. Последние вычисляются по формулам

$$\overline{\Delta C}_{nm} = C_{nm}^{W} - C_{nm}^{U}\ ,\ \overline{\Delta S}_{nm} = S_{nm}^{W} - S_{nm}^{U}. \quad (5)$$

Коэффициенты $C_{nm}^{дан.}$ реального потенциала заданы в зависимости от данной гравитационной постоянной $GM^{дан.}$ и данного радиуса $R^{дан.}$. А вычисления проведены в зависимости от других вынуждаемых постоянных $GM^{нужс.}, R^{нужс.}$. Преобразование значения коэффициентов гармоник от данных постоянных в вынуждаемые постоянные получаются по формуле

$$C_{nm}^{нужс.} = \left(\frac{GM^{дан.}}{GM^{нужс.}}\right)\left(\frac{R^{дан.}}{R^{нужс.}}\right)^n C_{nm}^{дан.}. \quad (6)$$

У зональных гармоник $S_{n0}=0$, поэтому $\overline{\Delta S}_{nm}=S^{W}_{nm}$. Для расчета нормального потенциала на практике в большинстве случаев достаточно рассмотреть только четные коэффициенты $C^{U}_{00}, C^{U}_{20}, C^{U}_{40}, C^{U}_{60}, C^{U}_{80}$

Высота квазигеоида вычисляется из ГГМ по формуле

$$\zeta^{ГГМ}=\frac{GM}{r\gamma}\sum_{n=2}^{M}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}\sum_{m=0}^{n}(\overline{\Delta C}_{nm}\cos m\lambda'+\overline{\Delta S}_{nm}\sin m\lambda')\overline{P_{nm}}(\sin\varphi') \tag{7}$$

Техника «удаление-восстановление»

Техника «удаление-восстановление» применяется в методе комбинации ГГМ с наборами локальных данных наземных измерений силы тяжести и рельефа. Основные этапы техники «удаления-восстановления» можно обозначить следующим образом:

1) удаление длинноволновой части $\Delta g^{ГГМ}$ аномалии силы тяжести;

2) из полученной разности удаляется редукции за рельеф Δg^{rtm};

3) остаточную часть высоты квазигеоида получают из остаточных аномалий силы тяжести, применяя интегральную формулу Стокса;

4) эффект топографических редукций ζ^{rtm} восстанавливается;

5) длинноволновая часть $\zeta^{ГГМ}$ высоты квазигеоида вычисляется из ГГМ и восстанавливается;

6) если масса M_0 и нормальный потенциал U_0 референц-эллисоида отличаются от массы M и потенциала W геоида, то будет добавлена к высотам квазигеоида поправка за нулевую степень. Она вычисляется по формуле

$$\zeta_0=\frac{GM-GM_0}{R\gamma}-\frac{W_0-U_0}{\gamma} \quad . \tag{8}$$

Сглаживание гравиметрического квазигеоида данными GPS-нивелирования

Из-за систематических ошибок модели квазигеоида, ошибки GPS-измерений и ошибки нивелирования выражение $\Delta\zeta=H^{г}-H^{\gamma}-\zeta^{\text{грав.}}$ не равно нулю и это значение зависит от точностей трех типов высот. Систематические отличия между данными гравиметрического квазигеоида и данными GPS-нивелирования будут удалены путем нахождения корреляционной поправки к квазигеоиду. Это поможет создать более подходящую модель

гравиметрического квазигеоида, соответствующего данным GPS-нивелирования.

Отклонение между высотами квазигеоида, полученными из GPS-нивелирования, и высотами квазигеоида, полученными из гравиметрического квазигеоида может быть выражена таким образом

$$\Delta\zeta_i = \zeta_i^{\text{GPS-нив.}} - \zeta_i^{\text{грав.}} = A_i x - v_i \quad . \tag{9}$$

Поправки модели квазигеоида получаются из формулы

$$\hat{v} = A\hat{x} - L \quad , \tag{10}$$

где вектор $L = \left[\Delta\zeta_1 \quad \Delta\zeta_2 \quad \ldots \quad \Delta\zeta_n\right]^T$

Метод линейной интерполяции помогает получить поправки к модели квазигеоида. Для повышения точности квазигеоида, обычно используют статистические методы, основанные на статистическом анализе законов изменений. Один из таких методов называется среднеквадратической коллокацией.

Уравнение (9) может быть представлено следующим образом

$$\zeta^{\text{GPS-нив.}} - \zeta^{\text{грав.}} = \varepsilon \quad , \tag{11}$$

здесь ε-разность между гравиметрическим квазигеоидом и данными GPS-нивелирования. Из этих разностей на пунктах GPS-нивелирования создается модель расхождения между гравиметрическим квазигеоидом и данными GPS-нивелирования в виде сетки методом среднеквадратичной коллокации. Окончательный квазигеоид получают путем добавления поправки $\varepsilon^{\text{сетк.}}$, полученной от сетки, к гравиметрическому квазигеоиду $\zeta^{\text{грав.}}$ следующим уравнением

$$\zeta^{\text{окон.}} = \zeta^{\text{грав.}} + \varepsilon^{\text{сетк.}} \quad . \tag{12}$$

Программа FITGEOID в пакете программ «GRAVSOFT» использует модель ковариационной функции второго порядка Гаусса-Маркова для ε.

Абсолютная и относительная оценка сравнения модели квазигеоида с данными GPS-нивелирования

Оценки гравиметрического квазигеоида по сравнению с GPS-нивелированием получены двумя способами: абсолютным и относительным.

В первом способе каждое значение $\zeta^{\text{грав.}}$ на пунктах, полученное из гравиметрического квазигеоида, сравнивается с высотами квазигеоида самих пунктов, полученных из GPS-нивелирования. Этот способ сравнения называется абсолютным. Формула для вычисления отклонений высот квазигеоида представлена таким образом

$$\Delta\zeta_i = H_i^{\Gamma} - H_i^{\gamma} - \zeta_i^{\text{грав.}} \quad . \tag{13}$$

Стандартное отклонение модели вычисляется по следующей формуле

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n-1}\left(\Delta\zeta_i - \overline{\Delta\zeta}\right)^2. \tag{14}$$

Во втором способе относительная оценка сравнений гравиметрического квазигеоида с данными GPS-нивелирования оценивается с помощью следующего уравнения

$$\Delta\zeta_{ij} = \left(\zeta_j^{\text{GPS-нив.}} - \zeta_i^{\text{GPS-нив.}}\right) - \left(\zeta_i^{\text{грав.}} - \zeta_j^{\text{грав.}}\right) \quad . \tag{15}$$

Относительная оценка квазигеоида для расстояния L_{ij} между *i* и *j* пунктами вычисляется в миллионных долях $1/млн$ (ppm или $1/млн$) по формуле

$$\Delta\zeta_{ij}^{Отн.} = \frac{\Delta\zeta_{ij}}{L_{ij}} \qquad (1/млн) \quad , \tag{16}$$

где расстояние L_{ij} между *i* и *j* пунктами.

В **главе 2** описан обзор новых методов в изучении гравитационного поля земли и их возможностей.

В этой главе кратко представлены спутниковые варианты изучения ГПЗ и их соответственные проекты CHAMP, GRACE и GOCE. Основой проекта CHAMP является система спутник-спутник в режиме высокий-низкий. А основой проекта GRACE-система спутник-спутник в режиме низкий-низкий.

В случае спутниковой градиентометрии измеряются разности трехмерного ускорения, относящиеся к очень короткому базису. Математически это выражается вторыми производными гравитационного потенциала. Эти данные позволят точно вычислять высоты геоида, аномалии силы тяжести, и получать океанографические данные. Важно отметить, что GPS-анализ орбиты GOCE

дает информацию о длинноволновой части поля силы тяжести, в то время как спутниковая градиентометрия позволит определить коротковолновую часть.

В **главе 3** представлен анализ существующих глобальных моделей гпз применительно к территории Вьетнама

В этой главе реализованы исследования современных моделей ГГМ, как EGM 96, EGM 2008, так и моделей из проекта GOCE. По их сравнениям с данными GPS-нивелирования были выбраны три модели ГГМ GOCE-TIM4, EIGEN-6C и EGM 2008, для создания локального квазигеоида на территории Вьетнама.

В данной главе разработана и реализована методика создания локального квазигеоида с использованием комбинации различных данных. А именно-сочетание ГГМ GOCE-TIM4, EGM2008, EIGEN-6C с глобальными гравиметрическими данными WGM2012, DTU10, GOCE-TIM3, с цифровой моделью рельефа GTOPO30 и пунктами GPS-нивелирования.

Гравиметрические данные были получены от Международного гравиметрического бюро (BGI-данные). Это Мировые Гравиметрические Карты (МГК) 2012 года WGM2012. Кроме того, в данной работе также используются модель DTU10 (улучшенная модель из каталога DNSC08) Датского космического института и модель GOCE-TIM3 проекта «GOCE».

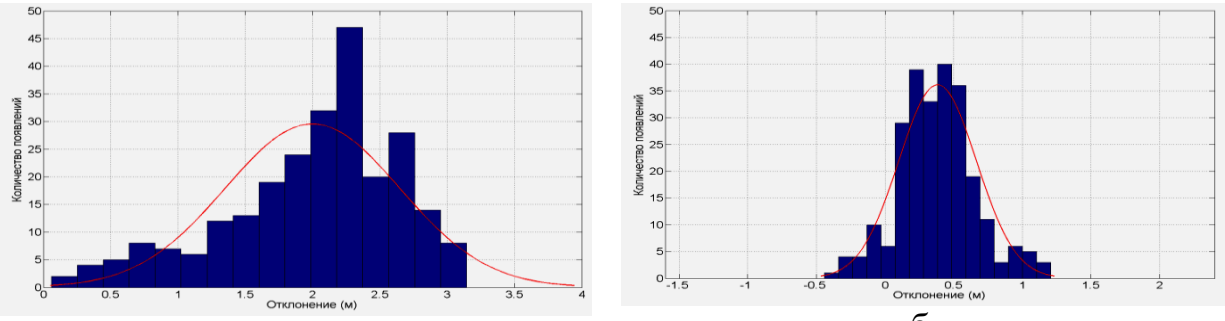
Табл. 1. Список программ и функций

Наименование	Вычисленные величины
DocCSnm	Импортировать C_{nm}, S_{nm} из исходного файла
deltaCnmSnm	$\overline{\Delta C_{nm}}, \overline{\Delta S_{nm}}$
gammaH	$\gamma(B, L, H)$
hslegendrectrinh	$\overline{P_{nm}}(\sin\varphi)$
dithuongdocao003	ζ одного пункта
dithuongtrongluc002	Δg одного пункта
KTDiemGPSTCVN	ζ для ряда пунктов и СТО
KTDiemTLVN	Δg для ряда пунктов и СТО
GridVN	Создать регулярную сетку ζ и Δg

Автором в среде программирования MatLab были созданы программы для вычислений аномалий силы тяжести и высот квазигеоида из глобальной модели ГПЗ. Эти программы перечислены в Табл. 1. Кроме того, в среде MatLab разработаны программы для специальных анализов результатов вычислений, на пример, для анализа зависимости стандартного отклонения и ошибок глобальной геопотенциальной модели от степени и порядка коэффициентов гармоник и тд. В исследованиях используются пакеты программ «Gravsoft» для вычислений $\zeta^{rtm}, \zeta^{ост.}$ по формуле Стокса и сглаживания квазигеоида методом коллокации, и также пакет «GUT» для получения католога DTU10GRA.

Исследование ГГМ EGM 96, EGM 2008 и оценка их точности

На Рис. 1 показана гистограмма распределения частоты отклонений высот квазигеоида моделей EGM 96 и EGM 2008 от данных наземных измерений.



а б

Рис. 1: Гистограмма отклонения высот квазигеоида моделей EGM 96 и EGM 2008 от данных наземных измерений: а-EGM 96; б-EGM 2008

Краткая статистика результатов сравнений на Рис. 1а: среднее отклонение равно 1,999 м, стандартное отклонение равно 0,648 м. На Рис. 1б: среднее отклонение равно 0,383 м, стандартное отклонение (СТО) равно 0,283 м.

Табл. 2. Сравнение высот квазигеоида EGM 96, EGM 2008 на 249 пунктах GPS-нивелирования

Модель	Высота квазигеоида ζ, м		Отклонение высот квазигеоида Δζ, м			СТО м
	min	max	min	max	среднее	
Данные измерения	-32,182	5,062				
EGM 96-360	-33,378	3,126	-0,059	3,144	1,999	0,65
EGM 2008-360	-32,583	4,838	-0,767	1,270	0,354	0,35
EGM 2008-1360	-32,506	4,748	-0,492	1,216	0,376	0,29
EGM 2008-2190	-32,538	4,789	-0,441	1,207	0,383	0,28

Из анализа следует, что отклонения результатов вычислений по данным GPS-нивелирования от модели EGM 2008 минимальны.

На Рис. 5 показана карта модели высот квазигеоида EGM 2008 с разложением в ряд до 2190 степени гармоник.

Выводы: в результате выполненных вычислительных экспериментов по сравнению значений высот квазигеоида пунктов GPS-нивелирования на территории Вьетнама с данными моделей EGM 96 и EGM 2008 получено СТО вывода этого параметра, соответственно 0,65 м и 0,28 м.

Выполненное исследование убедительно доказало, что гравитационная модель EGM 2008 точнее модели EGM 96. Именно эту модель земного гравитационного поля целесообразно использовать в дальнейшей работе.

Исследование GOCE ГГМ и их сравнение с моделью EGM 2008

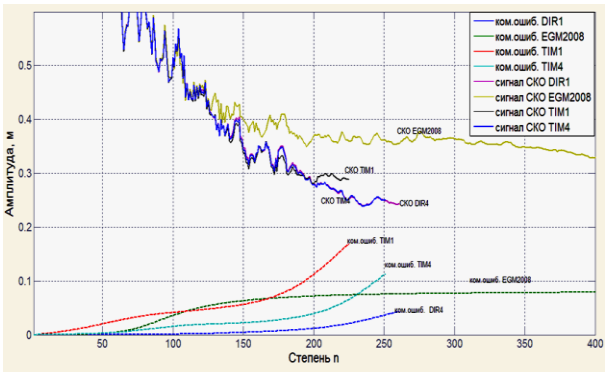


Рис. 2. Сравнение сигналов СТО высот квазигеоида и ошибки коэффициентов гармоник для GOCE-моделей и EGM 2008, штриховые линии -ошибки коэффициентов, сплошные линии-сигналы СТО квазигеоида

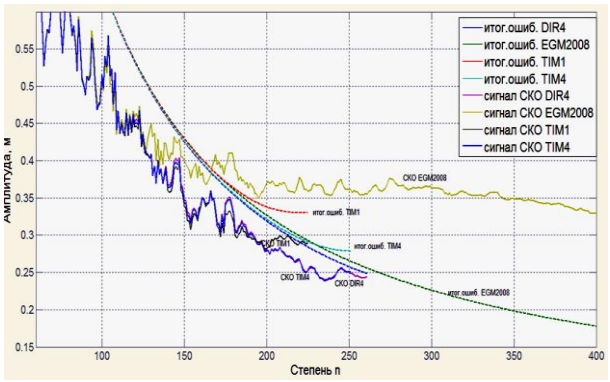


Рис. 3. Сравнение сигналов СТО высот квазигеоида и итоговой ошибки GOCE-моделей и EGM 2008, штриховые линии-итоговые ошибки, сплошные линии-сигналы СТО квазигеоида

На Рис. 2. показано сравнение сигналов СТО высот квазигеоида с его погрешностью за ошибку коэффициентов гармоник GOCE-моделей и EGM 2008, а на Рис. 3-сравнение сигналов СТО высот квазигеоида с итоговыми ошибками GOCE-моделей и EGM 2008.

Исследование показало, что СТО высот квазигеоида уменьшается при увеличении степени n и порядка m и различие разных моделей небольшое при значениях n, m от 0 до 120. Подробные сравнения результатов вычислений высот квазигеоида из ГГМ с данными GPS-нивелирования для степеней 180,

210, 224, 240, 250, 260, 1420, 1949 описаны в таблицах, приведенных в диссертации. Для примера приведена Табл. 3, где степень n и порядок m равны 224.

Табл. 3. Сравнение 249 данных GPS-нивелирования с высотами квазигеоида, вычисленными до 224 степени и порядка гармоник во Вьетнаме, в метрах

Модель	n	Min	Max	Среднее	σ
GOCE-DIR1	224	-0,485	1,286	0,385	0,29
GOCE-DIR2	224	-0,424	1,310	0,410	0,28
GOCE-DIR3	224	-0,272	1,209	0,407	0,26
GOCE-DIR4	224	-0,235	1,248	0,404	0,25
GOCE-SPW2	224	-0,355	1,235	0,400	0,27
GOCE-TIM1	224	-0,351	1,387	0,398	0,29
GOCE-TIM2	224	-0,318	1,255	0,403	0,27
GOCE-TIM3	224	-0,318	1,255	0,403	0,27
GOCE-TIM4	224	-0,317	1,252	0,409	0,25
EGM2008	**224**	**-0,741**	**1,328**	**0,322**	**0,36**
GOCO01S	224	-0,363	1,381	0,401	0,29
GOCO02S	224	-0,377	1,260	0,401	0,27
GOCO03S	224	-0,309	1,240	0,407	0,26
EIGEN-6S	224	-0,438	1,338	0,399	0,28
EIGEN-6C	224	-0,368	1,263	0,386	0,28
EIGEN-6C2	224	-0,441	1,299	0,393	0,28

Анализ таблиц, Рис. 2 и Рис. 3 показывает, что ошибки моделей сильно уменьшаются при увеличении степени и порядка, хотя ошибка коэффициентов гармоник увеличивается. И для территории Вьетнама от степени 120 GOCE-модели показали лучшие результаты по сравнению с моделью EGM 2008. Из них модели GOCE-TIM4 и GOCE-DIR4 дают минимальное СТО (24-25 см).

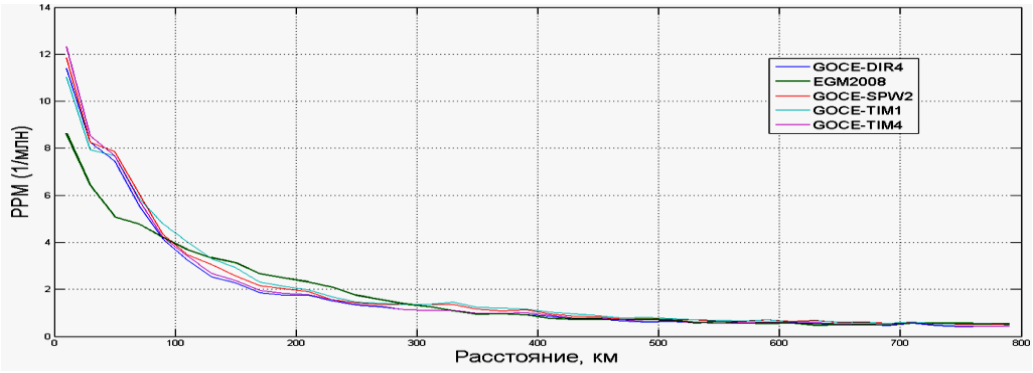


Рис. 4. Относительная оценка сравнения высот квазигеоида ($1/млн$) в зависимости от базовых расстояний (км) GOCE моделей и EGM 2008

Для относительной оценки сравнений моделей ГПЗ использованы разности данных на измеренных пунктах GPS-нивелирования. Они были сравнены с разностями высот квазигеоида, вычисленных для максимальной

степени и порядка гармоник GOCE-моделей и EGM 2008 на тех же пунктах. Эта оценка выполнена ppm ($1/млн$) в зависимости от базисного расстояния с шагом вычисления 20 км. Зависимость относительной оценки между GOCE-моделями и EGM 2008 от базисного расстояния представлено на Рис. 4.

Отметим, что GOCE-модели показали аналогичные результаты по сравнению друг с другом. Тем не менее, относительные точности моделей смещены по отношению друг к другу. Это может быть обусловлено причинами различных максимальных степеней коэффициентов гармоник и существующих систематических ошибок в этих коэффициентах гармоник. Во Вьетнаме статистика относительной оценки рассчитана с использованием 249 пунктов. Статистика модели EGM 2008 показала, что относительная точность составляет от 0,4 до 8,6 ppm, соответственно от 1 см до 160 см на исходные расстояния от 5 км до 800 км. Модель GOCE-TIM1 показала относительную точность от 0,5 до 11 ppm, что соответствует 1 до 173 см. И относительная ошибка модели GOCE-TIM4, аналогично,-от 0,4 до 12 ppm, соответственно, от 1 до 155 см.

Относительная ошибка GOCE-моделей при уменьшении базового расстояния до 200 км медленно растет. А при уменьшении базисного расстояния короче 200 км, точность быстро ухудшается из-за ограниченного разрешения спутниковых ГГМ. В то же время модель EGM 2008 показала лучший результат на расстояниях 5-100 км, который можно отнести к остальным моделям за счет ограниченного порядка и степени коэффициентов гармоник или за счет ошибок отбрасывания высоких степеней и порядков гармоник. Но результат EGM 2008 получается хуже других моделей на расстояниях 100-300 км, возможно, из-за ошибок коэффициентов гармоник.

*Из вышеописанного анализа можно сделать следующие **выводы**:*

- *GOCE-модели точнее модели EGM 2008 по абсолютной оценке сравнения. Из них модели GOCE-DIR4 и GOCE-TIM4 являются наиболее точными. Их СТО сравнения высот квазигеоида составляет 0,24 м;*
- *из 7 комбинированных моделей, модель EGM-6C дает наиболее точные результаты. Если вычисления проводят с учетом максимальной степени*

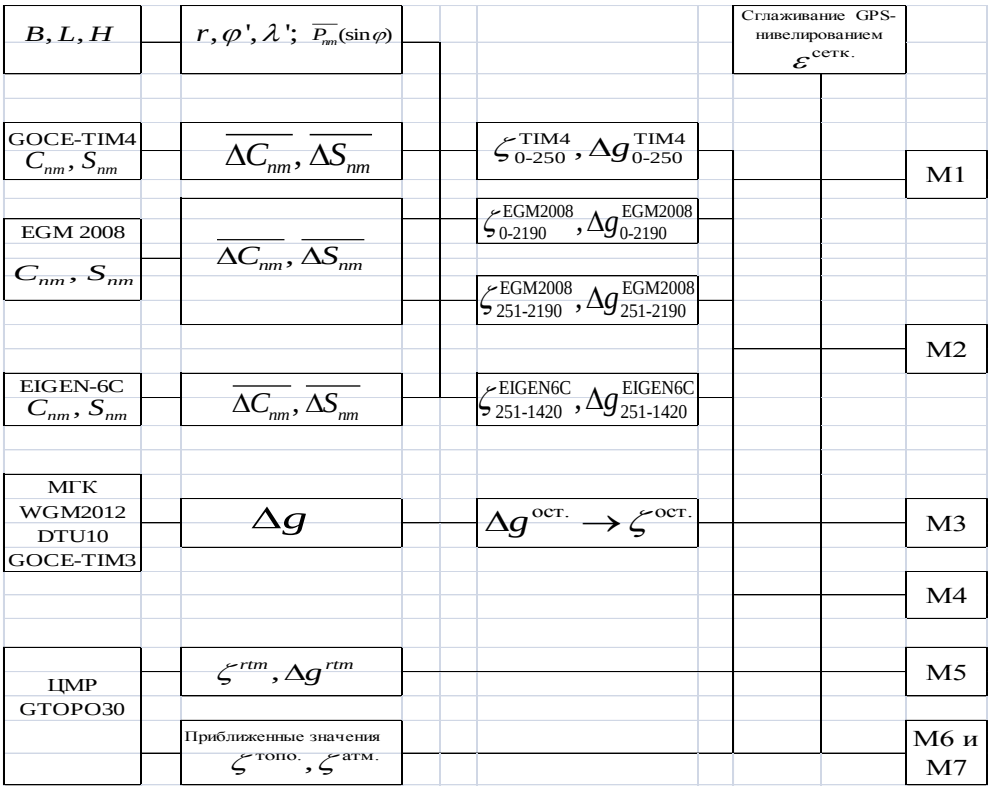
гармоник, то СТО высот квазигеоида модели EGM-6C (0,19 м) и модели EGM-6C2 (0,20 м) дают лучшие результаты, чем модель EGM 2008 (0,28 м);

- *по относительной сравнительной оценке EGM 2008 показывает лучший результат при расстояниях от 5 км до 90 км из-за большего разрешения, но при расстояниях от 90 км до 300 км GOCE-модели дают лучший результат.*

Создание квазигеоида на территории Вьетнама с применением GOCE-моделей

В этом исследовании мы использовали модели ГПЗ GOCE-TIM4 четвертого поколения и их сочетания с EGM 2008 и EIGEN-6C для создания квазигеоида на территории Вьетнама и соседних стран. Модель GOCE-TIM4 была выбрана для исследования так как она была разработана на основе только данных двухлетнего наблюдения спутника GOCE.

Табл. 4. Схема «подметодик» создания локального квазигеоида



Из общих методов построения локального квазигеоида автором создана методика, в которой содержатся 7 «подметодик» (M1-M7). Идея созданной методики состоит в следующем: из вышеописанного анализа моделей видно преимущество использования комбинаций коэффициентов гармоник низких

коэффициентов из спутниковой ГГМ GOCE-TIM4 и высоких коэффициентов из моделей EIGEN-6C или EGM2008. Так как GOCE-TIM4 является одной из лучших спутниковых ГГМ, но ее разрешение ограничено (n=250), а EIGEN-6C и EGM2008 имеют высокое разрешение (n=1420 и 2190) и влияние их ошибок коэффициентов высоких гармоник на высоту квазигеоида небольшое.

В Табл. 4 представлена схема семи «подметодик». И основные формулы этих подметодик описаны в Табл. 5. В диссертации подробно представлена каждая из этих подметодик. Модели, созданные на основе семи «подметодик» необходимо исследовать и найти лучшие для создания квазигеоида на территорию Вьетнама. Необходимо также для лучших моделей дать рекомендации по их использованию.

Табл. 5. Основные формулы подметодик

Подметодика	Основные формулы подхода	Модель
M1	$\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$ или $\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{EGM2008}}_{0\text{-}2190} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG01, QG02
M2	$\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{EGM2008}}_{251\text{-}2190} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$ или $\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{EIGEN6C}}_{251\text{-}1420} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG03, QG04
M3	$\Delta g^{\text{ост.}} = \Delta g - \Delta g^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250}$ $\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{ост.}} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG05, QG06, QG07
M4	$\Delta g^{\text{ост.}} = \Delta g - \Delta g^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} - \Delta g^{\text{rtm}}$ $\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{ост.}} + \zeta^{\text{rtm}} + \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG08, QG09
M5	$\Delta g^{\text{ост.}} = \Delta g - \Delta g^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} - \Delta g^{\text{EGM2008}}_{251\text{-}2190} - \Delta g^{\text{rtm}}$ $\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{ост.}} + \zeta^{\text{rtm}} + \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{EGM2008}}_{251\text{-}2190} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG10
M6	$\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{топо.}} + \zeta^{\text{атм.}} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG11
M7	$\zeta^{кваз.} = \zeta^{\text{TIM4}}_{0\text{-}250} + \zeta^{\text{EGM2008}}_{251\text{-}2190} + \zeta^{\text{топо.}} + \zeta^{\text{атм.}} + \varepsilon^{\text{сетк.}}$	QG12

В исследовании были созданы следующие варианты для построения гравиметрического квазигеоида, которые представлены в Табл. 6. Модели квазигеоида названы по порядку от QG01 до QG12. Каждый вариант модели был создан своей подметодикой с использованием конкретной комбинации используемых данных. Например, QG01-модель, которая была разработана на основе только спутниковой ГГМ четвертого поколения GOCE-TIM4; QG05-комбинированная модель, которая была разработана на основе спутниковой ГГМ четвертого поколения GOCE-TIM4 с использованием мировой гравиметрической карты WGM2012; QG12 -модель, которая была разработана на основе модели GOCE-TIM4 до степени гармоник 250 дополнением

коэффициентов гармоник высших степеней от 251 до 2190 модели EGM 2008 и добавлением приближенных значений влияний топографии и атмосферы.

Табл. 6. Варианты создания квазигеоида для Вьетнама

Модель	TIM4	EIGEN 6C	EGM 2008	ЦМР	МГК	Характеристика составленных данных и номер «подметодики»
QG01	250	нет	нет	нет	нет	Только GOCE-TIM4, «M1»
QG02	нет	нет	2190	нет	нет	Только EGM 2008 до степени 2190, «M1»
QG03	250	нет	251-2190	нет	нет	Низкие коэффициенты гармоник из GOCE-TIM4 и высокие коэффициенты из EGM 2008 (от 251 до 2190), «M2»
QG04	250	251-1420	нет	нет	нет	Низкие коэффициенты гармоник из GOCE-TIM4 и высокие коэффициенты из EIGEN6C (от 251 до 1420), «M2»
QG05	250	нет	нет	нет	WGM 2012	Комбинированная модель из GOCE-TIM4 и карты WGM2012, «M3»
QG06	250	нет	нет	нет	DTU10 GRA	Комбинированная модель из GOCE-TIM4 и данных DTU10GRA, «M3»
QG07	250	нет	нет	нет	GOCE-TIM3	Комбинированная модель из GOCE-TIM4 и данных GOCE-TIM3, «M3»
QG08	250	нет	нет	GTOPO30	GOCE-TIM3	Комбинированная модель из GOCE-TIM4, ЦМР GTOPO30 и данных GOCE-TIM3, «M4»
QG09	250	нет	нет	GTOPO30	DTU10 GRA	Комбинированная модель из GOCE-TIM4, ЦМР GTOPO30 и данных DTU10GRA, «M4»
QG10	250	нет	251-2190	GTOPO30	DTU10 GRA	Комбинированная модель из данных низких гармоник модели GOCE-TIM4, высоких гармоник EGM2008 (от 251 до 2190), ЦМР GTOPO30 и данных DTU10GRA, «M5»
QG11	250	нет	нет	GTOPO30	нет	Комбинированная модель GOCE-TIM4, ЦМР GTOPO30 и влияния атмосферы, «M6»
QG12	250	нет	251-2190	GTOPO30	нет	Комбинированная модель из данных низких гармоник модели GOCE-TIM4, высоких гармоник EGM2008 (от 251 до 2190), ЦМР GTOPO30 и влияния атмосферы, «M7»

После удаления двух пунктов с грубыми ошибками получены 247 пунктов GPS-нивелирования. Из них были выбраны 62 пункта для оценки сравнения созданных моделей с данными GPS-нивелирования. Выбор этих пунктов сделан так, чтобы эти пункты были примерно равномерно расположены по всей территории Вьетнама. Остальные 185 пунктов были

использованы для сглаживания созданных моделей гравиметрического квазигеоида.

Оценки точности моделей квазигеоида представлены в Табл. 7. В круглых скобках описаны результаты оценки после сглаживания квазигеоида пунктами GPS-нивелирования, а верхние значения являются результатами оценки до сглаживания гравиметрического квазигеоида.

Из анализа результатов можно сделать следующие выводы:

- различие высот между началами глобальной и национальной системы высот составляет около 0,4 м;
- три модели QG03, QG04 и QG12 являются наиболее близкими к данным GPS-нивелирования (СТО-12 см). В эти модели добавлены коэффициенты высших гармоник модели EGM 2008, EIGEN-6C;
- кроме того, три модели QG06, QG09 и QG10 также дают хороший результат (СТО-13 см). В создании этих трех моделей был использован каталог DTU10GRA. Результаты сравнений покали, что каталог DTU10GRA точнее карты WGM2012 и модели GOCE-TIM3, так как три модели QG06, QG09 и QG10 созданы на базе DTU10GRA и дают лучшие результаты в сравнении с моделями QG05 (WGM2012) и QG07, QG08 (GOCE-TIM3).

Табл. 7. Статистика сравнений созданных вариантов-моделей квазигеоида до его сглаживания и после сглаживания (в фигурных скобках), в метрах

Модель	**QG01**	**QG02**	**QG03**	**QG04**	**QG05**	**QG06**
Min	-0,229	-0,409	-0,083	-0,070	-0,359	-0,393
	(-0,591)	(-0,334)	(-0,294)	(-0,263)	(-0,817)	(-0,300)
Max	1,001	1,125	0,852	0,868	1,421	1,113
	(0,539)	(0,330)	(0,365)	(0,492)	(0,228)	(0,373)
Среднее	0,381	0,386	0,443	0,451	0,609	0,390
	(-0,048)	(0,002)	(-0,004)	(0,002)	(-0,052)	(0,008)
СТО	0,23	0,30	0,19	0,20	0,33	0,29
	(0,19)	(0,14)	**(0,12)**	**(0,12)**	(0,19)	**(0,13)**
Модель	**QG07**	**QG08**	**QG09**	**QG10**	**QG11**	**QG12**
Min	-0,327	-0,219	-0,276	-0,270	-0,229	-0,085
	(-0,555)	(-0,579)	(-0,301)	(-0,259)	(-0,516)	(-0,294)
Max	1,085	1,217	1,202	1,185	0,998	0,849
	(0,555)	(0,550)	(0,351)	(0,419)	(0,533)	(0,362)
Среднее	0,371	0,367	0,379	0,380	0,386	0,449
	(-0,049)	(-0,050)	(0,004)	(0,011)	(-0,049)	(0,001)
СТО	0,23	0,26	0,32	0,32	0,23	0,19
	(0,19)	(0,20)	**(0,13)**	**(0,13)**	(0,19)	**(0,12)**

Результаты исследований позволили нам сделать следующие выводы:

- *показано, что для территории Вьетнама необходимо использовать комбинации коэффициентов низких гармоник модели GOCE-TIM4 и высоких гармоник моделей EGM 2008, EIGEN-6C;*

- *кроме того, результат использования каталога DTU10GRA дает лучшие результаты в сравнении с использованием карты WGM2012 и GOCE-TIM3.*

Таким образом, для построенных моделей квазигеоида выполнено их сравнение с контрольными пунктами GPS-нивелирования, и для лучших из них СТО высот квазигеоида составило 12-13 см. СТО высот квазигеоида не достигло сантиметрового порядка, как заявлено руководителями проекта «GOCE», по многим причинам:

1. во-первых, из-за значительных ошибок GPS-измерений и ошибок определений нормальных высот пунктов;
2. во-вторых, глобальные модели ГПЗ для Вьетнама имеют точность порядка 25-35 см;
3. в-третьих, автор работы не обладал достаточным количеством качественных наземных гравиметрических данных, пунктов GPS-нивелирования, информации о координатах начала высотной системы Вьетнама, а так же значения потенциала W_o.

Для проверки СТО высот квазигеоида в разных районах территория Вьетнама была разделена на три района: север (широты больше 20º), центральная часть (широты от 12,5º до 20º) и юг (широты меньше 12,5º). Статистика сравнения результатов для этих районов изложена в Табл. 8.

Табл. 8. Статистика сравнений СТО результатов из 12 созданных моделей с данными GPS-нивелирования на севере, в центральной части и на юге Вьетнама, в см

Модель	QG01	QG02	QG03	QG04	QG05	QG06	QG07	QG08	QG09	QG10	QG11	QG12
Север	23	19	15	16	26	17	23	24	17	18	23	15
Центр. часть	16	11	10	09	13	10	16	16	11	11	16	10
Юг	17	10	10	09	13	10	17	17	10	10	18	10
Вьетнам в целом	19	14	**12**	**12**	19	**13**	19	20	**13**	**13**	19	**12**

Из Табл. 8 следует, что СТО высот квазигеоида на юге и в центре Вьетнама получено точнее, чем для севера Вьетнама. Это можно объяснить сложным рельефом севера страны, где преобладают высогорные районы. СТО высот квазигеоида лучших моделей QG03, QG04 и QG12 на севере дают 15-16см, а в центральной части и на юге-9-10 см.

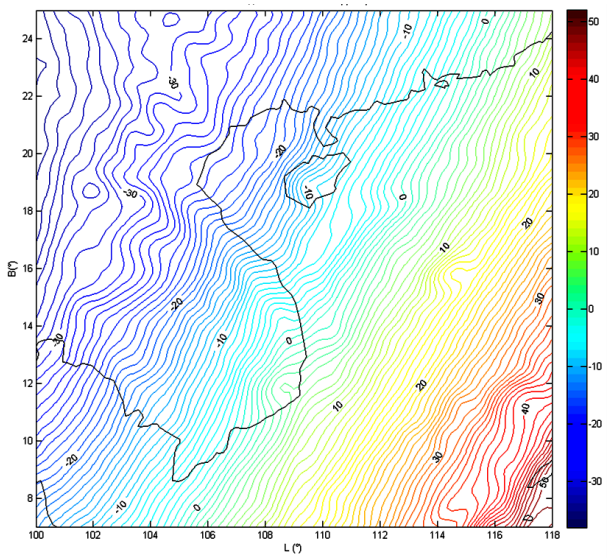


Рис. 5. Модели EGM 2008 на территории Вьетнама и соседних стран, сечение 1 м

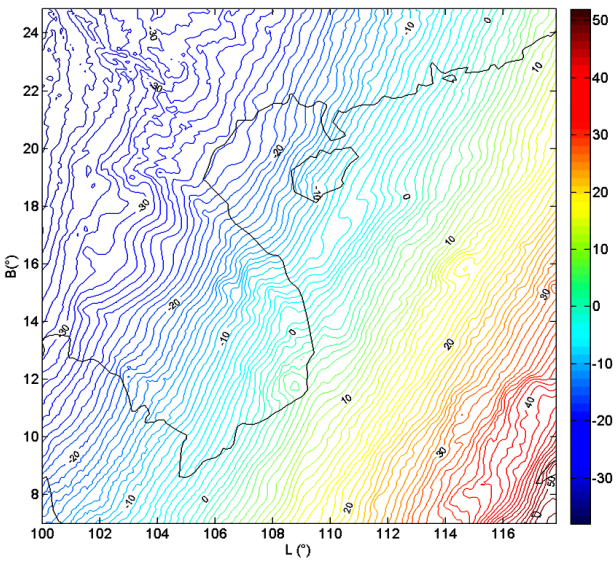


Рис. 6. Модель QG12 на территории Вьетнама и соседних стран, сечение 1 м

Модель QG12 представлена на Рис. 6. Сравнивая Рис. 5 и Рис. 6 нетрудно заметить, что QG12 показывает сложную модель квазигеоида, особенно на севере Вьетнама, где находятся высокогорные районы и в центральной части территории, вдоль которой находится хребет ЧыонгШон.

В заключении диссертации выполнено обобщение результатов исследований:

1. разработаны алгоритмы и программы обработки исходных данных, программы для вычисления высот квазигеоида, аномалий силы тяжести по любой глобальной геопотенциальной модели и программы с целью анализа полученных результатов в среде MatLab;
2. с использованием разработанных алгоритмов выполнены исследования современных моделей гравитационного поля Земли, таких как EGM 96, EGM 2008, 10 спутниковых и 6 комбинированных моделей проекта «GOCE»;
3. впервые выполнены оценки сравнений результатов, полученных из GOCE-моделей и комбинированных моделей с данными GPS-нивелирования для

территории Вьетнама. Анализы результатов убедительно доказали, что на территории Вьетнама модели GOCE-проекта дают лучшие результаты по сравнению с любой предыдущей моделью гравитационного поля Земли, а их использование позволило создать более точную модель квазигеоида для Вьетнама. Из GOCE-проекта лучшие спутниковые модели GOCE-TIM4, GOCE-DIR4 дали стандартное отклонение 25 см, а комбинированные модели такие, как EIGEN-6C и EIGEN-6C2 дали СТО около 20 см;

4. разработанная в работе методика позволила создать локальный квазигеоид для территории Вьетнама с использованием различных источников данных. По разработанной методике можно получать различные варианты-модели квазигеоида. Из сравнений результатов созданных моделей квазигеоида были выбраны лучшие модели с целью использования для спутникового нивелирования, даны рекомендации по используемым данным;
5. впервые применены GOCE-модели для создания локального квазигеоида на территории Вьетнама. Были созданы 12 вариантов-моделей локального квазигеоида на основе комбинации GOCE спутниковых ГГМ, EGM 2008, EIGEN-6C, цифровой модели рельефа, гравиметрических данных, мировых гравиметрических карт и пунктов GPS-нивелирования. Полученные модели были сравнены с данными 62 контрольных пунктов GPS-нивелирования, расположенных по всей территории Вьетнама. Из 12 модели мы имеем три самые точные модели QG03, QG04 и QG12. Они дают СТО по всей территории Вьетнама 12 см. Кроме них, три модели QG06, QG09 и QG10 тоже дают хорошие результаты: СТО равно 13 см. Тем не менее СТО для разных районов Вьетнама различаются:
    - на севере Вьетнама, где в рельефе преобладают высокие горы, СТО равны порядка 15-16 см очевидно, из-за сложности рельефа;
    - на юге и в центральной части территории Вьетнама СТО имеют малые значения (лучшие модели дают СТО 9 -10 см), очевидно, из-за равнинной местности;
6. для создания локального квазигеоида на территории Вьетнама в работе рекомендована методика использования комбинации спутниковой

геопотенциальной модели 4-го поколения GOCE-TIM4, коэффициенты высоких гармоник моделей EGM 2008 и EIGEN-6C. Кроме того, при дальнейших исследованиях желательно получить информацию о координатах футштока Хонзау, значении потенциала национального квазигеоида и большее количество наземных качественных гравиметрических данных и пунктов GPS-нивелирования с эпохами измерений;

7. на основании регулярных сеток построены карты высот квазигеоида, аномалий силы тяжести моделей, и приведены их отличия от данных опорных пунктов;
8. . выполнено экспериментальное исследование инструментария, использующего в GOCE-проекте (GUT) для обработки GOCE данных второго уровня;
9. результаты исследования показали, что вполне возможно создать модель квазигеоида с целью замены нивелирования 4-го класса спутниковым нивелированием.

Список публикаций по теме диссертации.

1. By Хонг Куонг «Исследования моделей гравитационного поля Земли по наземным и спутниковым измерениям», Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», № 1, 2013,-С. 20-25.

2. By Хонг Куонг «Результаты вычисления аномалий высот и аномалий силы тяжести по спутниковым измерениям на территории Вьетнама», Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», № 4, 2013,-С. 8-13.

Подписано в печать 18.11.2013. Гарнитура Таймс
Формат 60?90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 1,5усл. печ. л.
Тираж80 экз. Заказ №124-2013 Цена договорная
Издательство МИИГАиК
105064, Москва, Гороховский пер., 4