

На правах рукописи

НГУЕН ВАН ШАНГ

**ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ВЬЕТНАМУ АКВАТОРИИ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ**

Специальность: 25.00.32 – «Геодезия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Диссертация выполнена на кафедре Высшей математики
Московского государственного университета геодезии и картографии
(МИИГАиК)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Нейман Юрий Михайлович

Официальные оппоненты:

Лебедев Святослав Владимирович, доктор технических наук, доцент,
Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
профессор кафедры Высшей геодезии.

Плешаков Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, ФБУ «27 ЦНИИ
МО РФ», начальник Научно-исследовательского управления Научно-
исследовательского центра (топогеодезического и навигационного обеспечения).

Ведущая организация:

Центральный ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт гео-
дезии, аэросъёмки и картографии имени Ф. Н. Красовского (ФГУП «ЦНИИГАиК»).

Защита состоится « 15 » ноября 2012 г. в 12 часов на заседании диссертационного
совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и карто-
графии (МИИГАиК) по адресу: 105064 Москва, Гороховский пер., 4, зал заседания
Ученого совета.

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

Автореферат разослан « 11 » октября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Юрий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Обоснование актуальности темы диссертации

Определение физической поверхности и гравитационного поля Земли в единой системе координат является основной задачей геодезии. Для решения этой задачи нужны глобальные гравиметрические данные. Поскольку большую часть поверхности Земли занимает океан (более 70%), то определение аномалии силы тяжести на океане является важным разделом геодезии. При этом незаменимую роль играет спутниковая альтиметрия.

Данная работа направлена на улучшение гравиметрического обеспечения конкретной территории, а именно акватории, прилегающей к Социалистической Республике Вьетнам. Актуальной задачей для территории Вьетнама является создание единой системы нормальных высот и устранение неопределённостей в начальных отсчётах от уровня моря. Для этого необходимо на множестве точек, равномерно распределённых по территории, выполнять GPS-наблюдение и определять высоты квазигеоида с высокой точностью. Поскольку территория Вьетнама вытянута вдоль моря, то для вычисления высот квазигеоида необходимо располагать гравиметрической информацией не только на суше, но и на море. Однако непосредственное измерение силы тяжести на море с нужной плотностью требует слишком больших ресурсов и на сегодняшний день представляется нереальным. Поэтому актуальной задачей является исследование возможностей и разработка эффективных методов определения аномалии силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму, по данным спутниковой альтиметрии.

Теоретическим основам и практической реализации гравиметрического обеспечения прилегающей к Вьетнаму акватории по результатам спутниковой альтиметрии и посвящена данная диссертационная работа. Информации о проведении подобных работ на акватории, прилегающей к Вьетнаму, в предыдущие годы, к сожалению, не обнаружено.

Цель и основные задачи исследования

Основной целью диссертационной работы является исследование, разработка и практическая реализация комплекса работ с целью гравиметрического обеспечения акватории, прилегающей к Вьетнаму, по результатам спутниковой альтиметрии. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- 1) исследование возможностей спутниковой альтиметрии и изучение международного опыта её использования, сбор и отбор необходимых данных альтиметрии на акватории вблизи Вьетнама;

- 2) адаптация программного пакета BRAT (Basic Radar Altimetry Toolbox) для решения конкретных задач и вычисление с его помощью высот морской поверхности на акватории вблизи Вьетнама;

3) выделение динамических возмущений морской поверхности путём уравнивания пересечений спутниковых треков;

4) исследование степени гладкости гравитационного поля на изучаемой территории;

5) практическое вычисление аномалий силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму, по данным альтиметрии ENVISAT (Environmental Satellite);

6) исследование точности полученных результатов и исследование возможностей их уточнения по доступным результатам гравиметрической съёмки.

Научная новизна работы

Разработан и реализован общий алгоритм определения аномалии силы тяжести по результатам спутниковой альтиметрии ENVISAT применительно конкретно к акватории Вьетнама. Последнее означает:

- учёт реальной специфики акватории,
- учёт реальной гладкости соответствующего гравитационного поля,
- ослабление влияния динамической топографии,
- учёт расположения доступных данных морской гравиметрии,
- составление необходимого комплекса программ на языке Фортран.

При изучении технической литературы не обнаружено ссылок на то, что подобные работы когда-либо выполнялись ранее для акватории Вьетнама.

Результаты, выносимые на защиту

1 – Общий алгоритм определения аномалии силы тяжести по результатам альтиметрии спутника ENVISAT применительно к акватории Вьетнама и с учётом её специфики.

2 – Процедура ослабления влияния динамической топографии на высоты геоида путём уравнивания пересечений альтиметрических треков.

3 – Методика ковариационного анализа гравитационного поля на акватории и её использование для учёта доступных данных гравиметрии при обработке результатов альтиметрии.

4 – Регулярная сетка с шагом 10' значений аномалии силы тяжести, полученная на прилегающей к Вьетнаму акватории по результатам альтиметрии ENVISAT.

Вклад автора в проведенное исследование

Все результаты диссертации получены её автором самостоятельно с учётом международного опыта подобных работ.

Практическая значимость работы

1 – Разработанные алгоритмы и соответствующее программное обеспечение на языке Фортран автоматизируют весь процесс обработки результатов спутниковой альтиметрии ENVISAT и доступны для оперативного повторения с другими исходными данными.

2 – На прилегающей к Вьетнаму акватории по результатам альтиметрии ENVISAT получены конкретные значения аномалии силы тяжести на регулярной сетке с шагом 10’.

3 – Даны рекомендации по работе с современными форматами космической геодезии при использовании программного пакета BRAT.

Апробация результатов работы

Основные результаты по теме диссертации докладывались на конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 6 апреля 2011 и 3 апреля 2012 гг.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 3 статьи, две из которых в журнале, включенном в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав основного текста и заключения. Список литературы насчитывает 46 наименований на русском, вьетнамском и английском языках. Кроме того, имеется список использованных сокращений, список принятых обозначений и 6 приложений. Общий объем работы составляет 157 страниц машинописного текста и содержит 71 рисунок и 66 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель, поставлены задачи и описаны ожидаемые научные результаты, которые автор предполагает получить при разработке диссертации.

В первой главе «Общие сведения об альтиметрии и определении высот морской поверхности по результатам проекта ENVISAT» описаны основные сведения об альтиметрии и её приложениях вообще и конкретно о спутниковом альтиметрическом проекте ENVISAT. Особое внимание уделено сбору и отбору результатов альтиметрии для акватории, прилегающей к Вьетнаму, а также вычислениям высот морской поверхности в заданном районе с помощью международного программного пакета обработки данных альтиметрии BRAT. Даны рекомендации по работе с программой BRAT.

Во второй главе «Определение аномалии силы тяжести по данным альтиметрии ENVISAT» представлена теория определения аномалий силы тяжести по данным альтиметрии, принцип «удаления – восстановления» при обработке данных альтиметрии, вычисление высоты средней динамической топографии моря, уравнивание пересечений треков, определение аномалии силы тяжести по данным альтиметрии методом коллокации и уточнение аномалии силы тяжести.

1. Принцип «удаления – восстановления» при обработке данных альтиметрии

Высота морской поверхности SSH (Sea Surface Height) представляется формулой

$$SSH = N_{EGM} + \Delta N + h_d. \quad (1)$$

Согласно принципу «удаления – восстановления», до вычисления аномалии силы тяжести, высоты геоида N_{EGM} относительно EGM удаляются. В результате роль исходных данных играют только остаточные значения ΔN и динамическая высота моря h_d . Такое вычитание длинноволновой части поля в определённом смысле равносильно удалению влияния “дальних зон” и уменьшению радиуса корреляции гравитационного поля. Полезным следствием является возможность выполнять последующие вычисления в меньших регионах, учитывая остаточное влияние только “ближних зон”. Понятно, что в конце вычислений низкочастотную часть поля необходимо восстановить. Высоты геоида относительно EGM вычислены по формуле:

$$N_{EGM} = \frac{GM}{\gamma \cdot r} \left[\sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (c_{n,m} \cos m\lambda + s_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \phi) \right]. \quad (2)$$

Модельные аномалии силы тяжести относительно EGM вычисляются по формуле:

$$\Delta g_{EGM} = \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r} \right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n (c_{n,m} \cos m\lambda + s_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \phi) \right]. \quad (3)$$

2. Вычисление высоты средней динамической топографии моря

Динамическая высота моря h_d складывается из высоты средней динамической топографии моря (Mean Dynamic Topography) h_{MDT} и динамической высоты моря, изменяющейся со временем h_t . Высота средней динамической топографии моря является разностью между поверхностью геоида и средней морской поверхностью. Её значения изменяются в пределах $\pm 1,8$ м и во многом обусловлены морскими течениями. Высоту средней динамической топографии моря можно вычислить с помощью моделей геоида (EGM) и моделей средней морской поверхности (Mean Sea Surface – MSS) по формуле

$$h_{MDT} = h_{MSS} - N_{EGM} \quad (4)$$

или с помощью моделей средней динамической топографии моря (Mean Dynamic Topography – MDT).

В данной работе использованы модели MSS_GNES_CLS_10 и GO_CONS_EGM_GOC_2I. Высота средней динамической топографии моря на экватории, прилегающей к Вьетнаму, вычислена с помощью программы GUT. В результате мы получили 15 053 значений высоты средней динамической топографии моря на регулярной сетке с размером ячеек $6 \times 6'$.

Поскольку местоположение данных модели о высотах средней динамической топографии моря не совпадают с точками, которым соответствуют результаты альтиметрии

тиметрии, то неизбежно возникает необходимость интерполяции. В нашей работе эта задача решается методом оптимального линейного прогнозирования с помощью нашей программы «*Inter_emp*», «*Inter_fit*» и «*Interpolation*».

3. Уравнивание пересечений треков

Для ослабления влияния динамической высоты моря h_t , изменяющейся со временем, на определение высот геоида целесообразно выполнить уравнивание пересечений треков.

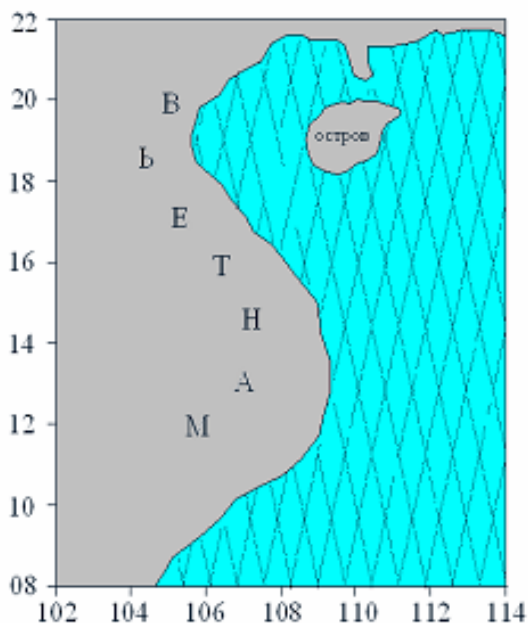


Рис. 1. Пересечения треков спутника ENVISAT

Под пересечением треков понимают то место морской поверхности, где нисходящий трек альтиметрии пересекает восходящий трек. Естественно предположить, что высота геоида в каждом таком месте не изменяется во времени, что и служит основанием для уравнивания. Проекты спутниковой альтиметрии, как правило, обеспечивают определённую сеть пересекающихся треков (см. рис. 1). Обеспечение минимума различий высоты геоида на пересечении между восходящими и нисходящими треками уменьшает не только ошибки самих треков, но и разного рода длинноволновые ошибки, неизбежно содержащиеся в результатах измерения высоты поверхности моря.

Однако пересечения треков часто не совпадают с точками, к которым относится результат альтиметрии. Поэтому, прежде чем выполнять уравнивание пересечений треков, необходимо определять местоположение и разности высот пересечений в таком порядке:

- классификация нисходящих треков и восходящих треков.
- сравнение каждого восходящего трека со всеми нисходящими треками с целью поиска пересечения.
- определение приближенного места пересечения.
- определение уточнённого места пересечения треков.

- вычисление разности высоты на пересечении.

Уравнивание результатов пересечения треков

Для интересующей нас акватории Вьетнама длины треков достигают 1500 км, динамические высоты моря каждого трека могут быть смоделированы в предположении постоянства смещения a и уклона b трека, то есть

$$dH_{ij} = (a_i + b_i \mu_j) - (a_j + b_j \mu_i) + v_{ij}, \quad (5)$$

где b_i, b_j – неизвестные параметры уклона, которые относятся к восходящему и нисходящему треку; μ_i, μ_j – относительные долготы i -го и j -го треков;

$$\mu_i^P = \lambda_i^P - \lambda_i^{cp}, \quad (6)$$

где μ_i^P – относительная долгота точки P на i -ом треке; λ_i^P – долгота точки P на i -ом треке; λ_i^{cp} – средняя долгота i -го трека.

В матричном виде эти уравнения связи принимают вид:

$$d = Ax + v, \quad (7)$$

где x – вектор, содержащий неизвестные параметры смещения и уклона

$$x^T = (a_{i1} \ b_{i1} \ a_{i2} \ b_{i2} \ \dots \ a_{im} \ b_{im} \ a_{j1} \ b_{j1} \ a_{j2} \ b_{j2} \ \dots \ a_{jk} \ b_{jk}); \quad (8)$$

A – матрица коэффициентов уравнений связи;

d – матрица разностей высот морской поверхности в точках пересечения треков

$$d^T = (dH_1 \ dH_2 \ \dots \ dH_n); \quad (9)$$

v – матрица остатков

$$v^T = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n). \quad (10)$$

Матрица коэффициентов уравнений связи (7) имеет ранг, на четыре меньший полного. Уравнения связи можно решать или путём предварительной фиксации каких-нибудь двух треков, или совместным уравниванием пересечения всех треков под условием $x^T C_x^{-1} x = \min$.

Недостатком обоих этих подходов является то, что после уравнивания результатов пересечений треков разность между поверхностью, созданной из уравненных точек пересечения треков, и поверхностью геоида иногда остаётся довольно большой. Для уменьшения этой разности желательно приближать каждый трек к геоиду. В связи с этим высоты морской поверхности каждой точки на k -ом треке рекомендуется смоделировать в предположении постоянства смещения (a_k^0) и уклона (b_k^0) трека, то есть

$$SSH''_{ki_1} = a_k^0 + b_k^0 \mu_{ki_1} + V_{ki_1}. \quad (11)$$

Здесь SSH''_{ki_1} – высота морской поверхности после удаления высоты геоида относительно модели гравитационного поля Земли N_{EGM} и высоты средней динамической

топографии моря h_{MDT} ; μ_{ki} – относительная долгота точки i_1 ; V_{ki} – остаток высоты в точке i_1 .

Параметры a_k^0 и b_k^0 оцениваются методом наименьших квадратов под условием $\sum_{i_1=1}^{n_1} V_{ki}^2 = \min$, n_1 – количество измеренных точек на k -ом треке.

Приближение каждого трека к поверхности геоида и уравнивание пересечений треков можно выполнять одновременно (т.е. $a^0 = a$ и $b^0 = b$). Тогда система уравнений связи принимает вид:

$$\begin{cases} dH_{ij} = (a_i + b_i \mu_j) - (a_j + b_j \mu_i) + v_{ij} \\ SSH''_{ki} = (a_k + b_k \mu_{ki}) + V_{ki} \end{cases} \quad (12)$$

Матрица коэффициентов уравнений связи имеет полный ранг. Параметры смещения и уклона оцениваются методом наименьших квадратов под условием

$$\sum v_{ij}^2 + w \sum V_{ki}^2 = \min. \quad (13)$$

Величина w является относительным весом. Если w мало, то разность в пересечениях уменьшается достаточно эффективно, но средняя морская поверхность не приближена к поверхности геоида. Наоборот, если w велико, то средняя морская поверхность хорошо приближена к поверхности геоида, но разность в пересечениях всё ещё остаётся значительной. В расчётах относительный вес принят $w = 0,1$.

После того как параметры смещения уклона оценены, остаточные высоты геоида вычисляются по этим параметрам:

$$\Delta N = SSH'' - (a + b\mu). \quad (14)$$

4. Определение аномалии силы тяжести по данным альтиметрии методом коллокации

Трактуем величины остаточных высот геоида $\Delta \tilde{N}_1, \Delta \tilde{N}_2, \dots, \Delta \tilde{N}_n$ как измеренные значения \tilde{l}_i функционалов L_i , $i = 1, 2, \dots, n$ на соответствующем возмущающем потенциале. Требуется вычислить значение другого функционала F – остаточную аномалию силы тяжести Δg_P в точке заданной P .

Согласно локальной задаче коллокации,

$$\hat{F} = K^T(L, F) \cdot (K(L, L) + C_\Delta)^{-1} \cdot \tilde{l}. \quad (15)$$

Здесь \hat{F} – оценка функционала F , $K(\cdot, \cdot)$ – воспроизводящее ядро используемого гильбертова пространства (ковариационная функция), C_Δ – ковариационная матрица ошибок измерений, \tilde{l}_i результаты измерений функционалов L_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Таким образом, аномалия силы тяжести $\bar{\Delta} g_P$ в точке P вычисляется по следующей формуле

$$\hat{\Delta} g_P = K_{1 \times n}^T(\Delta N, \Delta g_P) \cdot [K(\Delta N, \Delta N) + C_\Delta]_{n \times n}^{-1} \cdot \Delta \tilde{N}_{n \times 1}. \quad (16)$$

Соответствующая дисперсия оценивается величиной

$$\hat{\sigma}_{\Delta g}^2 = K_{1 \times 1}(\Delta g_p, \Delta g_p) - K_{1 \times n}^T(\Delta N, \Delta g_p) \cdot [K(\Delta N, \Delta N) + C_{\Delta}]^{-1} \cdot K_{n \times 1}(\Delta N, \Delta g_p). \quad (17)$$

$$\text{Здесь } K^T(\Delta N, \Delta g_p) = [K(\Delta N_1, \Delta g_p) \quad K(\Delta N_2, \Delta g_p) \quad \dots \quad K(\Delta N_n, \Delta g_p)]; \quad (18)$$

$$K(\Delta N, \Delta N) = \begin{bmatrix} K(\Delta N_1, \Delta N_1) & K(\Delta N_1, \Delta N_2) & \dots & K(\Delta N_1, \Delta N_n) \\ K(\Delta N_2, \Delta N_1) & K(\Delta N_2, \Delta N_2) & \dots & K(\Delta N_2, \Delta N_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(\Delta N_n, \Delta N_1) & K(\Delta N_n, \Delta N_2) & \dots & K(\Delta N_n, \Delta N_n) \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$C_{\Delta} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}; \quad \Delta \tilde{N} = \begin{bmatrix} \Delta \tilde{N}_1 \\ \Delta \tilde{N}_2 \\ \dots \\ \Delta \tilde{N}_n \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Ковариационная функция остаточных высот геоида записывается в формуле

$$K(\Delta N_i, \Delta N_j) = a \sum_{l=2}^N d_l \frac{1}{\gamma_i \cdot \gamma_j} \left(\frac{R^2}{r_i \cdot r_j} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi) + \sum_{l=N+1}^{\infty} \frac{A}{(l-2)(l+b)} \frac{1}{\gamma_i \cdot \gamma_j} \left(\frac{R_B^2}{r_i \cdot r_j} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi). \quad (21)$$

Взаимная ковариационная функция аномалий силы тяжести и остаточной высоты геоида имеет вид:

$$K(\Delta N_i, \Delta g_p) = \frac{a}{\gamma_i} \sum_{l=2}^N d_l \frac{(l-1)}{r_p} \left(\frac{R^2}{r_i \cdot r_p} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi) + \frac{1}{\gamma_i} \sum_{l=N+1}^{\infty} \frac{A}{(l-2)(l+b)} \frac{1}{r_p} \left(\frac{R_B^2}{r_i \cdot r_p} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi), \quad (22)$$

А ковариационная функция аномалий силы тяжести имеет вид:

$$K(\Delta g_i, \Delta g_j) = a \sum_{l=2}^N d_l \frac{(l-1)^2}{r_i \cdot r_j} \left(\frac{R^2}{r_i \cdot r_j} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi) + \sum_{l=N+1}^{\infty} \frac{A}{(l-2)(l+b)} \frac{(l-1)}{r_i \cdot r_j} \left(\frac{R_B^2}{r_i \cdot r_j} \right)^{l+1} P_l(\cos \psi), \quad (23)$$

где $P_l(\cos \psi)$ - полиномы Лежандра степени l ; ψ - сферическое расстояние между точками i и j ; r_i и r_j - расстояния этих точек от начала координат; d_l - степенные дисперсии ошибок коэффициентов низкочастотной части потенциала до N включительно; R - средний радиус Земли; b - число, которое выбирается равным 4, но иногда, чтобы максимально приблизиться к низким степенным дисперсиям, достигает 24; Степень N , масштабный коэффициент a , константа A в единицах $(\text{м/с})^4$ и радиус целиком расположенной в теле Земли сферы Бьерхаммара R_B являются свободными параметрами и подлежат определению по результатам ковариационного анализа остаточных значений высот геоида. В нашем случае среднее расстояние $\Delta \psi$ между точками с данными приближённо равно 10 дуговых минут.

После того как остаточные аномалии силы тяжести вычислены, полные аномалии силы тяжести определяются суммированием:

$$\Delta g = \bar{\Delta g} + \Delta g_{EGM}, \quad (24)$$

где Δg_{EGM} - аномалия силы тяжести относительно модели гравитационного поля Земли вычисляется по формуле (3).

5. Уточнение аномалий силы тяжести по результатам гравиметрической съёмки

Если в изучаемой акватории доступны результаты гравиметрической съёмки на море или на ближайшем побережье, то аномалии силы тяжести, вычисленные по результатам альтиметрии, можно попытаться уточнить.

В самом деле, пусть на изучаемой акватории имеются k значений аномалий силы тяжести $\tilde{\Delta}g_1^{альт}, \tilde{\Delta}g_2^{альт}, \dots, \tilde{\Delta}g_k^{альт}$, вычисленных по данным альтиметрии, и m значений аномалий силы тяжести $\tilde{\Delta}g_1^{изм}, \tilde{\Delta}g_2^{изм}, \dots, \tilde{\Delta}g_m^{изм}$, полученных по результатам гравиметрической съёмки на море или на ближайшем побережье. Тогда уточненное значение аномалия силы тяжести Δg_p в точке P можно получить по формуле:

$$\hat{\Delta}g_p = \begin{bmatrix} K(\Delta g^{альт}, \Delta g_p) \\ K(\Delta g^{изм}, \Delta g_p) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} K(\Delta g^{альт}, \Delta g^{альт}) + C_{\Delta^{альт} \Delta^{альт}} & K(\Delta g^{альт}, \Delta g^{изм}) \\ K^T(\Delta g^{альт}, \Delta g^{изм}) & K(\Delta g^{изм}, \Delta g^{изм}) + C_{\Delta^{изм} \Delta^{изм}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{\Delta}g^{альт} \\ \tilde{\Delta}g^{изм} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Соответствующая дисперсия оценивается величиной

$$\hat{\sigma}_{\Delta g}^2 = K(\Delta g_p, \Delta g_p) - \begin{bmatrix} K(\Delta g^{альт}, \Delta g_p) \\ K(\Delta g^{изм}, \Delta g_p) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} K(\Delta g^{альт}, \Delta g^{альт}) + C_{\Delta^{альт} \Delta^{альт}} & K(\Delta g^{альт}, \Delta g^{изм}) \\ K^T(\Delta g^{альт}, \Delta g^{изм}) & K(\Delta g^{изм}, \Delta g^{изм}) + C_{\Delta^{изм} \Delta^{изм}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K(\Delta g^{альт}, \Delta g_p) \\ K(\Delta g^{изм}, \Delta g_p) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Здесь $K(\cdot, \cdot)$ – ковариационная функция аномалии силы тяжести, $C_{\Delta\Delta}$ – ковариационная матрица ошибок измерений.

Ковариационная функция аномалии силы тяжести вычислена аналогично по формуле (23). Параметры a , d_i , N , A , и R_B подлежат определению по результатам корреляционного анализа эмпирических данных аномалий силы тяжести.

6. Общая схема определения аномалий силы тяжести по данным альтиметрии ENVISAT

Теоретические положения, изложенные выше, определяют общий порядок вычисления аномалий силы тяжести по данным альтиметрии, схематично показанный на рис. 2.

В схеме: SSH – высота морской поверхности; N_{EGM} – высота геоида относительно определённой модели гравитационного поля Земли (ГПЗ); ΔN – остаточная высота геоида; h_{MDT} – высоты средней динамической топографии моря; h_t – динамическая высота моря, изменяющаяся со временем; $\bar{\Delta}g$ – остаточная аномалия силы тяжести; Δg_{EGM} – аномалия силы тяжести относительно модели (ГПЗ); Δg – полная аномалия силы тяжести; $\Delta g^{усред}$ – усреднённая аномалия силы тяжести по данным многих циклов; Δg_i – аномалия силы тяжести i -го цикла; n – число циклов.

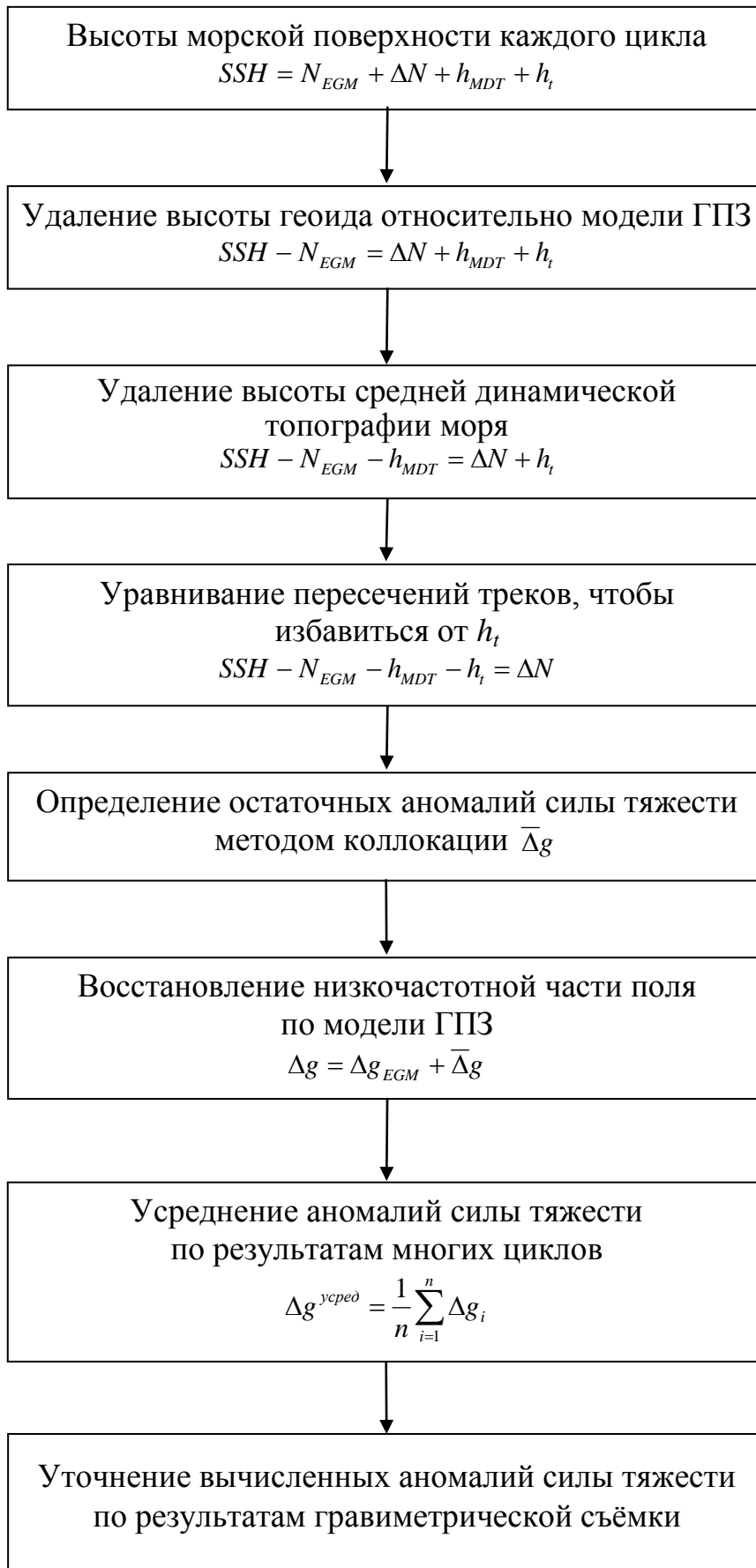


Рис. 2. Схема определения аномалий силы тяжести по данным спутниковой альтиметрии ENVISAT.

В третьей главе «Практические результаты вычисления аномалий силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму, по данным альтиметрии ENVISAT» приведены экспериментальные результаты вычисления аномалии силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму, по данным альтиметрии ENVISAT, результаты сравнения с каталогом DNSC08GRAV, результаты сравнения с результатами гравиметрической съёмки на побережье и результаты совместного уравнивания аномалии силы тяжести, полученные по результатам гравиметрической съёмки на побережье и по данным альтиметрии.

1. Результаты вычисления аномалий силы тяжести при использовании EGM96 для процедуры «удаления-восстановления»

В этом разделе описаны результаты вычисления аномалии силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму ($\varphi: 8^0 \div 22^0$, $\lambda: 105^0 \div 114^0$), в соответствии с изложенной выше теорией. Исходными данными для вычислений послужили высоты морской поверхности, полученные со спутника ENVISAT на десяти циклах и приведенные в первой главе. Для процедуры «удаления – восстановления» использована известная модель глобального гравитационного поля Земли EGM96. Аномалии силы тяжести вычислены для каждого цикла и затем усреднены по десяти циклам.

Результаты вычисленных аномалий силы для тяжести десяти циклов усреднены по формуле:

$$\Delta g_i^{усред} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \Delta g_{ij} . \quad (27)$$

Здесь $\Delta g_i^{усред}$ – усредненная аномалия силы тяжести для десяти циклов в i -й точке; Δg_{ij} – аномалия силы тяжести j -го цикла в i -й точке.

В результате для изучаемого района получена регулярная сетка $10' \times 10'$ усредненных аномалий силы тяжести, общее количество точек 4675, максимальное значение равно 70,8 мгал, минимальное значение равно -62,3 мгал, среднее значение равно -3,8 мгал, среднеквадратическое значение равно 16,5 мгал.

Таблица 1 содержит краткие статистики сравнений аномалий силы тяжести для каждого цикла с усреднёнными результатами для всех десяти циклов.

Здесь n – общее количество точек;

$$\delta g_i = \Delta g_{ij} - \Delta g_i^{усред} ; \quad (28)$$

$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91;$

δg_{\max} – максимальное отклонение аномалий силы тяжести;

δg_{\min} – минимальное отклонение аномалий силы тяжести;

δg_{cp} – среднее отклонение аномалий силы тяжести

$$\delta g_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta g_i ; \quad (29)$$

$\hat{\sigma}_{\delta g}$ – среднеквадратическое отклонение

$$\hat{\sigma}_{\delta g} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta g_i - \delta g_{cp})^2}{n-1}} . \quad (30)$$

Таблица 1. Краткие статистики
сравнений каждого цикла с усреднёнными результатами

Цикл	n	δg_{\max} (мгал)	δg_{\min} (мгал)	δg_{cp} (мгал)	$\hat{\sigma}_{\delta g}$ (мгал)
81 – ср	4675	11,6	-17,3	-0,3	2,5
83 – ср	4675	14,5	-13,9	-0,0	2,9
84 – ср	4675	11,1	-13,6	0,0	2,4
85 – ср	4675	23,8	-16,1	-0,2	3,5
86 – ср	4675	14,7	-24,2	-0,1	2,9
87 – ср	4675	31,2	-11,9	0,3	3,0
88 – ср	4675	19,9	-20,9	0,1	3,2
89 – ср	4675	24,0	-13,1	-0,0	3,2
90 – ср	4675	40,4	-56,9	0,4	7,9
91 – ср	4675	11,0	-10,2	-0,2	2,6

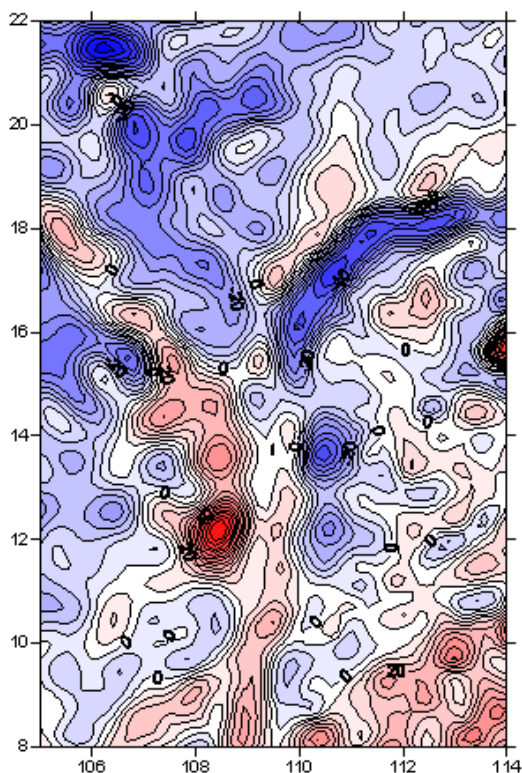
Из таблицы 1 видно, что результаты 90-го цикла сильно отличаются от усреднённых значений, а другие циклы от усреднённых значений отличаются мало. Поэтому мы удалили результаты 90-го цикла и ещё раз усреднили остаточные девять циклов.

Усреднённые аномалии силы тяжести девяти циклов вычислены по формуле:

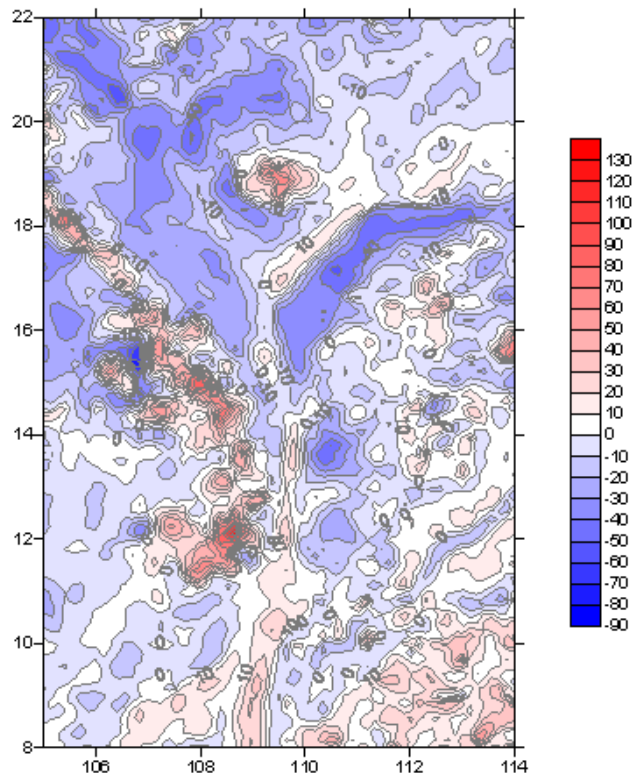
$$\Delta g_i^{усред} = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 \Delta g_{ij} , \quad (31)$$

где $\Delta g_i^{усред}$ – усреднённая аномалия силы тяжести для девяти циклов в i -й точке; Δg_{ij} – аномалия силы тяжести j -го цикла в i -й точке.

Краткая статистика усреднённых результатов: максимальное значение = 70,7 мгал, минимальное значение = -62,5 мгал, среднее значение = -3,9 мгал, среднеквадратическое значение = 16,4 мгал. Усреднённые аномалии силы тяжести для девяти циклов показаны на рисунке 3а.



(а) при использовании EGM96 для процедуры «удаления-восстановления». Высота сечения 5 мгал



(б) при использовании EGM2008 для процедуры «удаления-восстановления». Высота сечения 10 мгал

Рис. 3. Усредненные аномалии силы тяжести для девяти циклов

2. Результаты вычисления аномалий силы тяжести при использовании EGM2008 для процедуры «удаления-восстановления»

В этом разделе описаны результаты вычисления аномалии силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму. Исходными данными для вычислений послужили высоты морской поверхности, полученные со спутника ENVISAT на десяти циклах и приведенные в первой главе. Для процедуры «удаления – восстановления» использована известная модель глобального гравитационного поля Земли EGM2008. Аномалии силы тяжести вычислены для каждого цикла и затем усреднены по десяти циклам.

Результаты вычисленных аномалий силы для тяжести десяти циклов усреднены по формуле:

$$\Delta g_i^{усред} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \Delta g_{ij} . \quad (32)$$

Здесь $\Delta g_i^{усред}$ – усредненная аномалия силы тяжести для десяти циклов в i -й точке; Δg_{ij} – аномалия силы тяжести j -го цикла в i -й точке.

В результате для изучаемого района получена регулярная сетка 10' x 10' усредненных аномалий силы тяжести, общее количество точек 4675, максимальное

значение равно 137,8 мгал, минимальное значение равно -86,0 мгал, среднее значение равно -4,2 мгал, среднеквадратическое значение равно 21,2 мгал.

Таблица 3 содержит краткие статистики сравнений аномалий силы тяжести для каждого цикла с усреднёнными результатами для всех десяти циклов.

Таблица 2. Краткие статистики сравнений каждого цикла с усредненными результатами

Цикл	n	δg_{\max} (мгал)	δg_{\min} (мгал)	δg_{cp} (мгал)	$\hat{\sigma}_{\delta g}$ (м.гал)
81 – Ср	4675	12,3	-16,6	-0,1	2,4
83 – Ср	4675	15,1	-18,9	0,1	2,8
84 – Ср	4675	10,0	-11,8	-0,0	2,1
85 – Ср	4675	40,8	-22,4	-0,1	3,5
86 – Ср	4675	16,8	-26,5	-0,2	2,8
87 – Ср	4675	35,5	-19,5	0,1	3,1
88 – Ср	4675	25,4	-25,6	0,0	3,3
89 – Ср	4675	21,6	-13,3	0,1	3,0
90 – Ср	4675	68,7	-80,4	0,1	9,3
91 – Ср	4675	9,2	-10,6	-0,1	2,4

Из таблицы 3 видно, что результаты 90-го цикла сильно отличаются от усредненных значений, а другие циклы от усредненных значений отличаются мало. Поэтому мы удалили результаты 90-го цикла и ещё раз усреднили значения остаточных девяти циклов.

Усредненные аномалии силы тяжести девяти циклов вычислены по формуле

$$\Delta g_i^{усред} = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 \Delta g_{ij}, \quad (33)$$

где $\Delta g_i^{усред}$ – усредненная аномалия силы тяжести девяти циклов в i -й точке; Δg_{ij} – аномалия силы тяжести j -го цикла в i -й точке.

Краткая статистика усредненных результатов: максимальное значение = 137,8 мгал, минимальное значение = -86,1 мгал, среднее значение = -4,2 мгал, среднеквадратическое значение = 21,2 мгал. Усредненные аномалии силы тяжести для девяти циклов показаны на рисунке 3б.

3. Сравнение аномалий силы тяжести, полученных при использовании для процедуры «удаления – восстановления» моделей EGM96 и EGM2008

Вычисленные результаты аномалий силы тяжести, полученные при использовании для процедуры «удаления – восстановления» моделей EGM96 и EGM2008, сравнены между собой.

Результаты сравнений на 4675 точках представлены горизонталями на рис. 5 с высотой сечения 10 мгал. На рис. 4 показана гистограмма распределения частоты отклонений. Краткая статистика результатов сравнений: среднее отклонение равно 0,3 мгал, и среднеквадратическое отклонение равно 14,1 мгал.

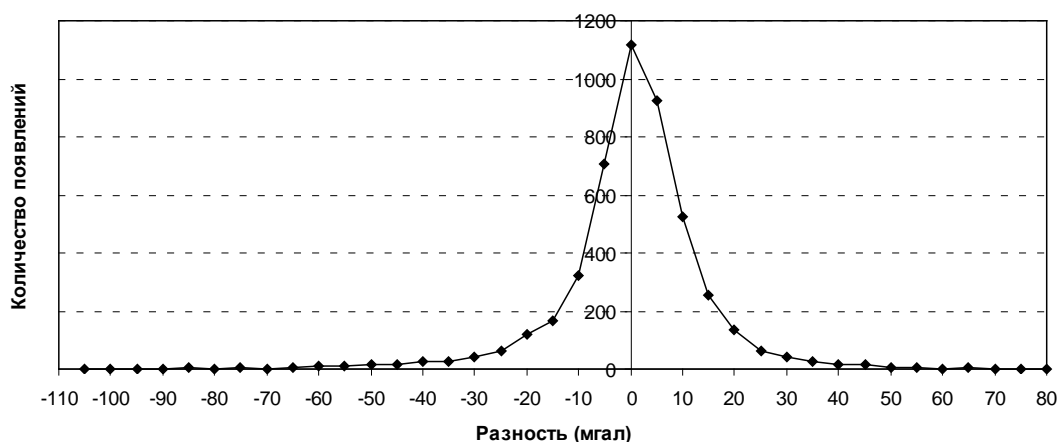


Рис. 4. Гистограмма распределения частоты отклонений

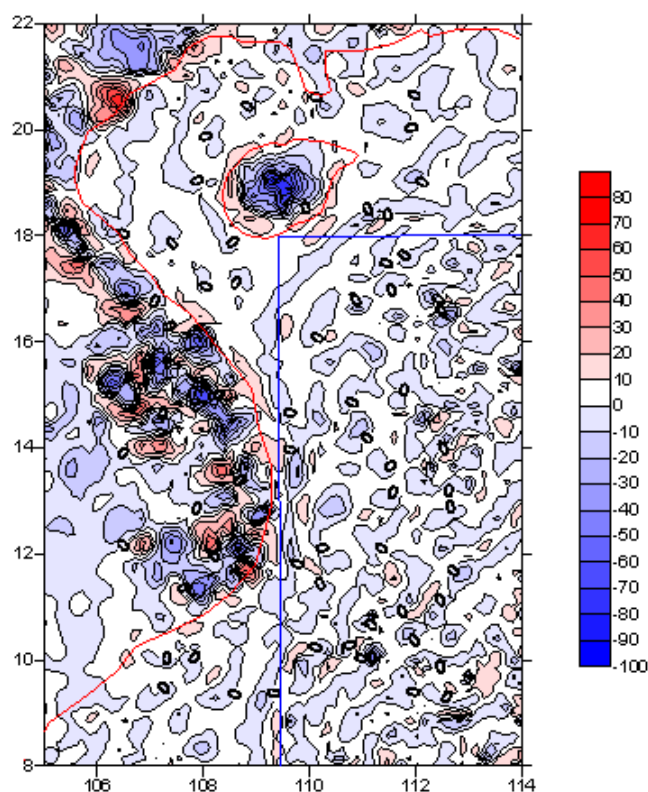


Рис. 5. Разность аномалий силы тяжести, полученных при использовании EGM96 и EGM2008 для процедуры «удаления – восстановления» на акватории, прилегающей к Вьетнаму

Из рис. 5 видно, что на суше и островах, где нет данных альтиметрии, разности большие, а на море, где есть данные альтиметрии, разности маленькие. Если рассмотреть только морской район (широта: $08^{\circ} \div 18^{\circ}$, долгота: $109^{\circ}30' \div 114^{\circ}$), окруженный синей линией, то среднее отклонение равно 1,0 мгал, и среднеквадратическое отклонение равно 10,6 мгал.

4. Сравнение вычисленных аномалий силы тяжести с каталогом DNSC08GRA

DNSC08GRA является одним из наиболее подробных современных глобальных каталогов аномалии силы тяжести, созданный на сетке с размером ячеек 1' x 1' датским национальным космическим центром в 2008 году. Среднее отличие данных этого каталога от 321 400 результатов морской гравиметрии составило 0,39 мгал, а среднеквадратическое отклонение равно 4,36 мгал.

Сравнение с данными каталога DNSC08GRA аномалий силы тяжести, вычисленных при использовании для процедуры «удаления – восстановления» модели EGM96

Вычисленные аномалии силы тяжести девяти циклов, полученные при использовании EGM96 для процедуры «удаления – восстановления», сравнены с каталогом DNSC08GRA. Результаты сравнения представлены горизонталями на рис. 7а. Гистограмма распределения частоты отклонений показана на рис. 6. Краткая статистика отклонений аномалий силы тяжести: среднее отклонение равно 0,4 мгал; среднеквадратическое отклонение равно 14,2 мгал.

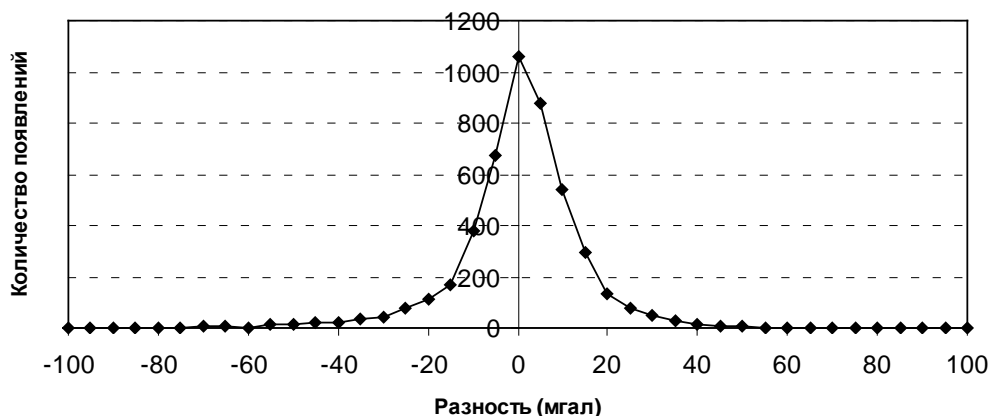
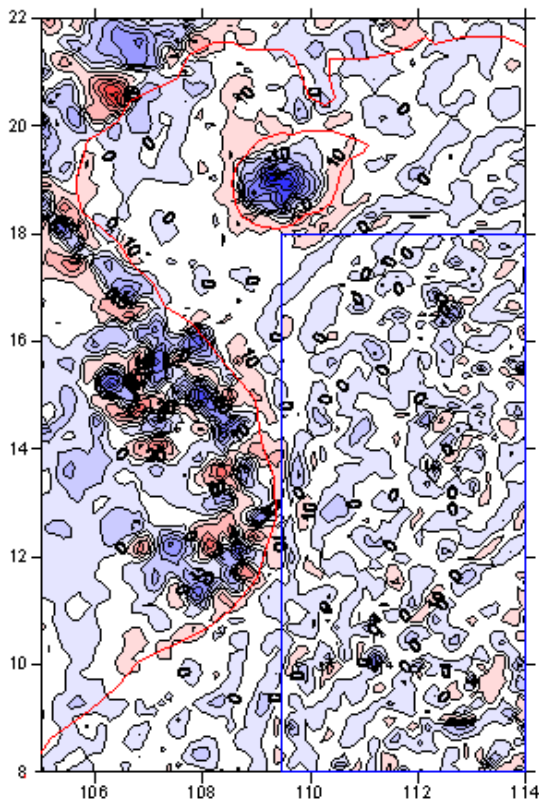


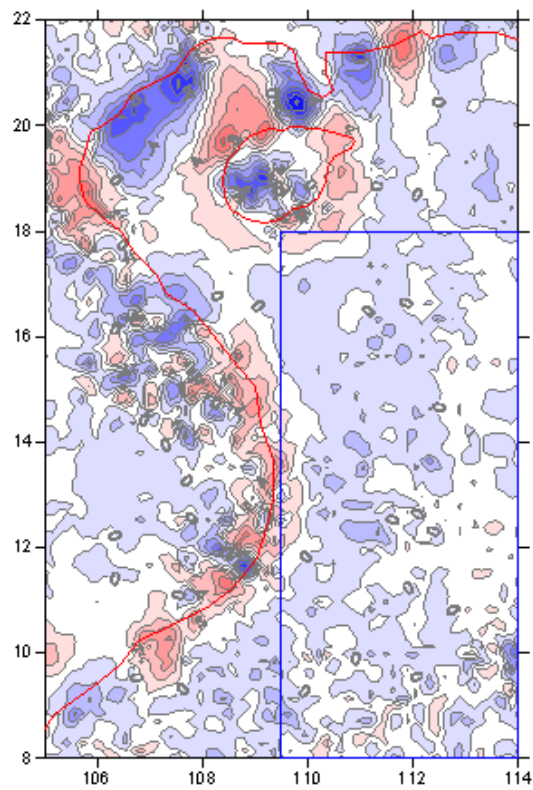
Рис. 6. Гистограмма распределения частоты отклонений, сравненных с каталогом DNSC08GRA

Из рисунка 7а видно, что на суше и островах, где нет данных альтиметрии, отклонения аномалий силы тяжести большие, а на море, где есть данные альтиметрии, отклонения маленькие. Если рассмотреть только морской район (широта: $08^{\circ} \div 18^{\circ}$, долгота: $109^{\circ}30' \div 114^{\circ}$, окруженный синей линией), то среднее отклонение равно всего 0,9 мгал, но среднеквадратическое отклонение равно 11,1 мгал.



(а) при использовании EGM96 для процедуры «удаления – восстановления».

Высота сечения 10 мгал



(б) при использовании EGM2008 для процедуры «удаления – восстановления».

Высота сечения 2 мгал

Рис. 7. Отклонения аномалий силы тяжести, сравненные с каталогом DNSC08GRA

Сравнение с данными каталога DNSC08GRA аномалий силы тяжести, вычисленных при использовании для процедуры «удаления – восстановления» модели EGM2008

Аномалии силы тяжести, вычисленные с использованием в процедуре «удаления – восстановления» модели EGM2008, сравнены с каталогом DNSC08GRA. Отклонения аномалий силы тяжести показаны на рис. 7б горизонталями с высотой сечения 2 мгал. На рис. 8 показана гистограмма распределения частоты отклонений. Краткая статистика отклонения аномалий силы тяжести: среднее отклонение равно 0,1 мгал, среднеквадратическое отклонение равно 3,1 мгал.

Из рисунка 7б видно, что на суше и на островах, где нет данных альтиметрии, отклонения аномалий силы тяжести по-прежнему больше, чем на море, где есть данные альтиметрии. Если рассмотреть только морской район (широта: $08^{\circ} \div 18^{\circ}$, долгота: $109^{\circ}30' \div 114^{\circ}$, на рисунке ограничен синей линией), то максимальное отклонение равно 8,9 мгал, минимальное отклонение равно -11,3 мгал, среднее отклонение равно -0,1 мгал, и среднеквадратическое отклонение равно 1,8 мгал.

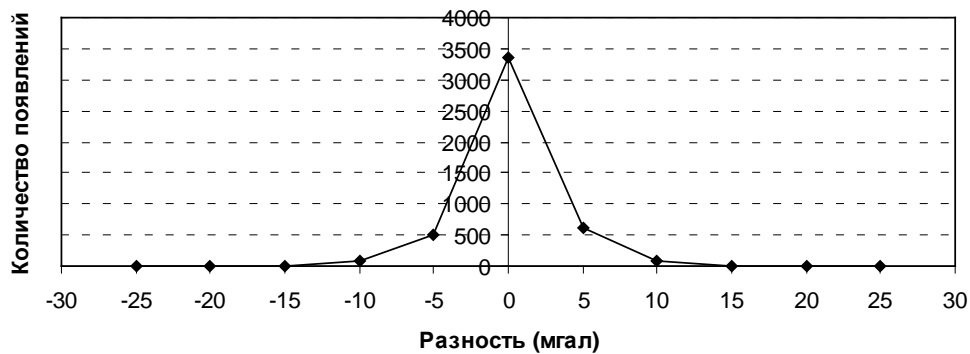


Рис. 8. Гистограмма распределения частоты отклонений, полученных при сравнении с каталогом DNSC08

Вывод: отклонения от данных каталога DNSC08GRA аномалий силы тяжести, полученных при использовании для процедуры «удаления – восстановления» модели EGM2008, много меньше, чем при аналогичном использовании модели EGM96. По-видимому, это объясняется тем, что при создании каталога DNSC08GRA для процедуры «удаления – восстановления» тоже использована модель EGM2008.

5. Сравнение аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии, с результатами гравиметрической съёмки на побережье

О результатах гравиметрической съёмки на побережье Вьетнама

Наибольший интерес, конечно, представляет сравнение полученных нами аномалий силы тяжести с непосредственно измеренными значениями на побережье. Мы располагали такими данными в 133 хаотично расположенных точках (см. рис. 9). Из них 123 точки удалось получить в BGI (International Gravimetric Bureau, Франция) и 10 точек получены из работы ЦНИИГАиК в 2011 г. по созданию государственной гравиметрической сети Вьетнама. Все эти точки находятся на островах и на побережье не далее 30 км от моря.

Сравнение с результатами гравиметрической съёмки аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии при использовании модели EGM96

Аномалии силы тяжести на 133 точках интерполированы методом коллокации из усреднённых аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии девяти циклов спутника ENVISAT при использовании EGM96 и сравнены с аномалиями силы тяжести в свободном воздухе, полученными по результатам гравиметрической съёмки на побережье Вьетнама.

Краткая статистика результатов сравнения: среднее отклонение равно -12,0 мгал; среднеквадратическое отклонение равно 15,2 мгал. На рис. 10 показана гистограмма распределения частоты отклонений.

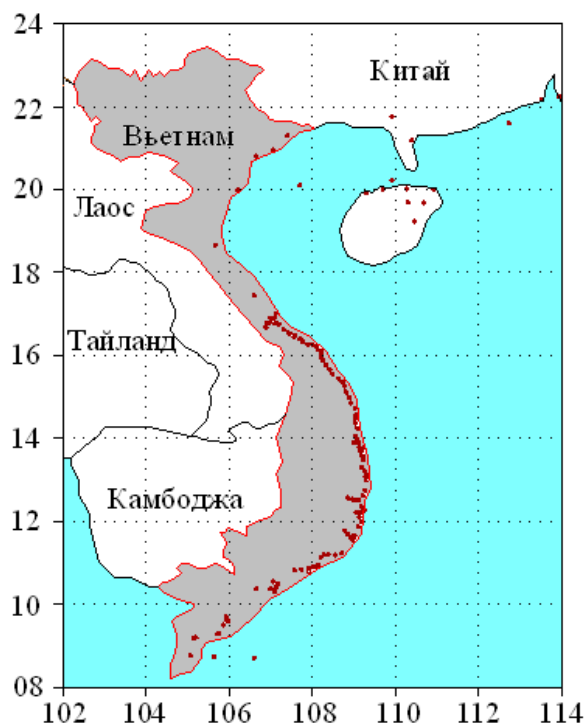


Рис. 9. Расположение аномалий силы тяжести в свободном воздухе, полученных по результатам гравиметрической съёмки на побережье Вьетнама

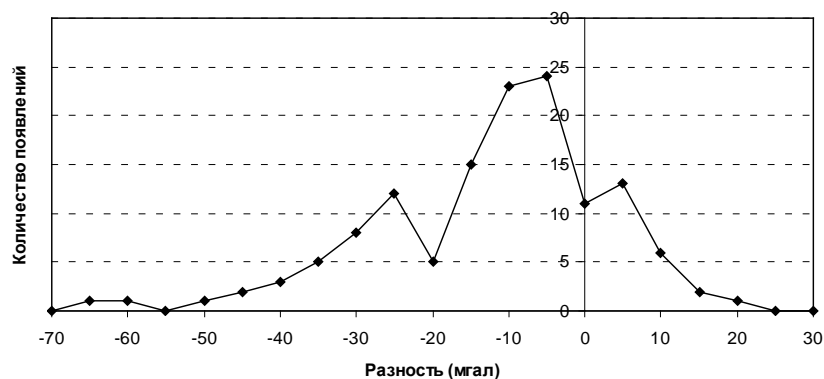


Рис. 10. Гистограмма распределения частоты отклонений

Сравнение с результатами гравиметрической съёмки аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии при использовании модели EGM2008

Аномалии силы тяжести на 133 точках снова интерполированы методом коллокации из усреднённых аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии девяти циклов спутника ENVISAT при использовании EGM2008, и сравнены с аномалиями силы тяжести в свободном воздухе, полученными по результатам гравиметрической съёмки на побережье. Краткая статистика результатов сравнения: среднее отклонение равно -3,3 мгал; среднеквадратическое отклонение равно 8,7 мгал. На рис. 11 показана гистограмма распределения частоты отклонений.

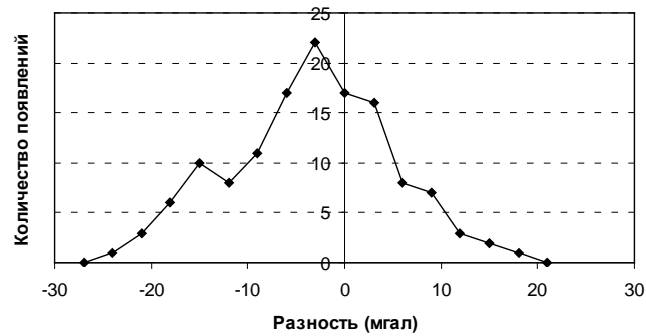


Рис. 11. Гистограмма распределения частоты отклонений

Из сравнения аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии, с результатами гравиметрической съёмки видно, что на акватории, прилегающей к Вьетнаму, точность аномалий силы тяжести, полученных по данным альтиметрии при использовании EGM2008 гораздо лучше, чем при использовании EGM96.

6. Результаты совместного уравнивания аномалий силы тяжести, полученных по результатам гравиметрической съёмки на побережье и по результатам альтиметрии на акватории

Аномалии силы тяжести, полученные по результатам гравиметрической съёмки, имеют, конечно, более высокую точность, чем вычисленные по данным альтиметрии. Поэтому целесообразно выполнить совместное уравнивание аномалий силы тяжести, полученных по результатам гравиметрической съёмки на побережье и по результатам альтиметрии на акватории. Для расчётов использованы аномалии силы тяжести, полученные по данным альтиметрии спутника ENVISAT девяти циклов при использовании EGM2008 для процедуры «удаления - восстановления», и аномалии силы тяжести в свободном воздухе, полученные по результатам гравиметрической съёмки на побережье в 133 точках. Предварительно у всех аномалий силы тяжести удалена низкочастотная часть поля с помощью модели EGM96. Процесс уравнивания выполнен методом среднеквадратической коллокации.

В результате, после восстановления низкочастотной части поля получены уточненные аномалии силы тяжести на регулярной сетке 10' x 10'. Общее количество точек 4675, максимальная аномалия силы тяжести равна 132,2 мгал, минимальное значение равно -84,5 мгал, среднее значение равно -4,2 мгал, среднеквадратическое значение равно 21,0 мгал. Полученные значения аномалий силы тяжести представлены на рис. 12 горизонталями с высотой сечения 10 мгал.

Сравнение аномалий силы тяжести до и после уравнивания

Сравнены 4675 значений аномалии силы тяжести до и после уравнивания. Максимальная разность оказалась равной 13,9 мгал, минимальная -13,1 мгал, сред-

неквадратическое отличие равно 2,0 мгал, но среднее изменение равно нулю. Эти изменения показаны на рис. 13 горизонталями с высотой сечения 1 мгал.

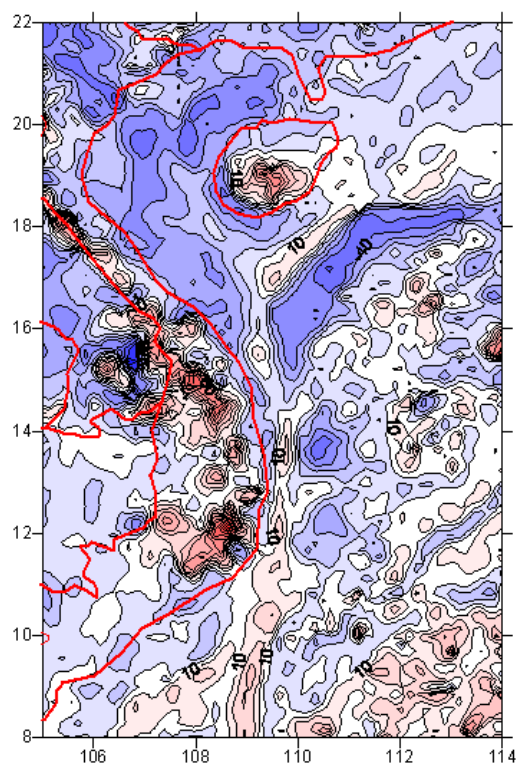


Рис. 12. Уравненные аномалии силы тяжести на акватории, прилегающей к Вьетнаму

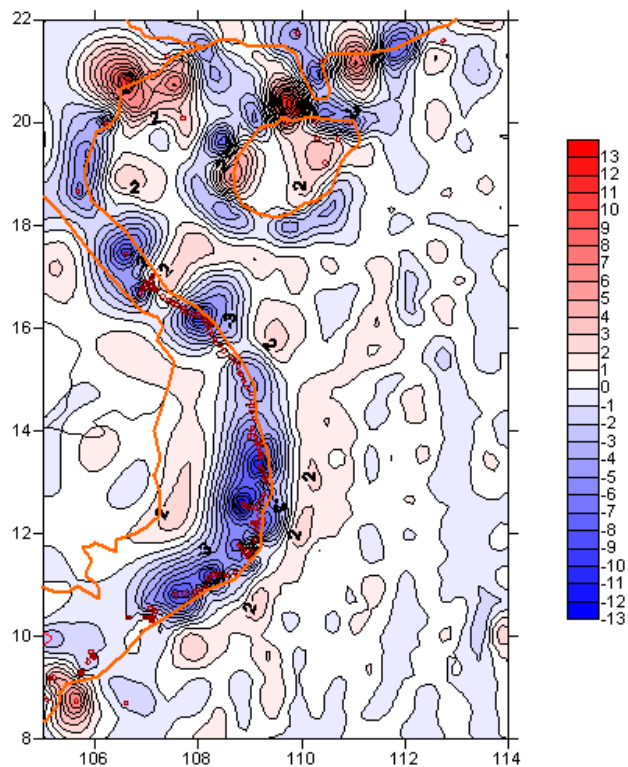


Рис. 13. Разности между значениями аномалий силы тяжести до и после уравнивания

Из рис. 13 видно, что после уравнивания аномалии силы тяжести изменились только в районе, где есть результаты гравиметрической съёмки, и в ближайших окрестностях съёмки. И это понятно, так как чем дальше от района съёмки, тем меньше сказывается её влияние. Количественной мерой при этом служит радиус корреляции поля, который в данном эксперименте равен 0.4 градуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнены теоретические исследования и экспериментальные вычисления с целью определения аномалии силы тяжести на прилегающей к Вьетнаму акватории по данным спутниковой альтиметрии. В итоге работы получены следующие результаты:

1 – собран необходимый материал в виде десяти циклов альтиметрии ENVISAT (за период с 20 июля 2009 г по 9 августа 2010 г) и выполнен отбор данных, необходимых для работы на акватории, прилегающей к Вьетнаму;

2 – разработан алгоритм определения аномалий силы тяжести по данным спутниковой альтиметрии с учётом формы акватории Вьетнама и наличия островов;

3 – для ослабления влияния динамической топографии разработана процедура уравнивания пересечений альтиметрических треков;

4 – оптимизирована методика ковариационного анализа аномалии силы тяжести на акватории и показано преимущество использования метода коллокации и программного пакета GRAVSOFТ при обработке альтиметрии, в частности, для совместного уравнивания результатов обработки с доступными данными гравиметрии;

5 – разработанные алгоритмы и фортран-программы автоматизируют весь процесс обработки результатов спутниковой альтиметрии ENVISAT и доступны для оперативного повторения с другими исходными данными;

6 – сформирована регулярная сетка с шагом 10' значений аномалии силы тяжести, полученная на прилегающей к Вьетнаму акватории по результатам альтиметрии ENVISAT;

7 – даны рекомендации по работе с современными форматами космической геодезии с помощью программного пакета BRAT.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нейман Ю.М, Нгуен Ван Шанг. Определение аномалии силы тяжести на акватории Вьетнама по данным альтиметрии ENVISAT // Изв. вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка». –2011. –№ 5. –С.15 – 21.
2. Нгуен Ван Шанг. Уравнивание пересечений треков спутниковой альтиметрии на акватории, прилегающей к Вьетнаму // Изв. вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка». –2012. –№ 3 –С.8 – 12.
3. Нгуен Ван Шанг. Определение высот морской поверхности по данным ENVISAT на акватории Вьетнама // Научно-технический журнал ХГГУ. Ханойский горно-геологический университет. –2011. –№ 35. –С.81 – 85.