

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ, ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА ЮЖНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО ВЬЕТНАМА**

**Чан Туан Дунг<sup>1,2</sup>, Р.Г. Кулинич<sup>3</sup>, Нгуен Ван Санг<sup>4</sup>, Буй Конг Куэ<sup>5</sup>, Нгуен Ба Дай<sup>1</sup>,  
Нгуен Ким Дунг<sup>1</sup>, Чан Туан Дуонг<sup>1</sup>, Чан Чонг Лан<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики, Вьетнамская академия наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам

<sup>2</sup>Университет наук и технологий, Вьетнамская академия наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам

<sup>3</sup>ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, г. Владивосток, 690041; e-mail: rkulinich@mail.ru

<sup>4</sup>Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам

<sup>5</sup>Институт геофизики, г. Ханой, Вьетнам

Поступила в редакцию 2 августа 2018 г.

К настоящему времени многими исследователями уже сделана попытка повысить точность и разрешение гравитационных аномалий, полученных с помощью спутниковой альтиметрии. В результате для большинства районов Мирового океана рассчитаны аномалии силы тяжести по сетке с размером ячейки 1'×1'. Однако такие аномалии не очень точны и имеют большое расхождение с результатами морской набортной гравиметрии, особенно в прибрежных и островных районах.

Повышение точности гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии, и их использование для изучения геологической структуры континентального шельфа южного и центрального Вьетнама с прилегающими районами явилось целью данной работы. Для корректировки альтиметрических данных в целях повышения их точности использован метод коллокации наименьших квадратов в сопоставлении с результатами морской набортной гравиметрии. В качестве исходного материала в работе использованы альтиметрические гравитационные аномалии и аномалии, рассчитанные по результатам морских гравиметрических работ, выполненных в предыдущие годы в рамках совместных проектов Вьетнама с Россией и другими странами. Сопоставление указанных данных показало их среднеквадратичное расхождение около  $\pm 9.358$  мГал. После корректировки расхождение между альтиметрическими и судовыми аномалиями сократилось до  $\pm 1.208$  мГал (для случая соответствия спутниковых траекторий и судовых профилей).

В результате интерпретации вышеуказанных гравитационных аномалий в 3D-варианте в сочетании с сейсмическими данными определены мощность и плотность кайнозойских осадочных отложений. Достигнутые результаты показали эффективность и актуальность использования скорректированных гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии, для детальных исследований геологических структур. Это наиболее значимо для отдаленных или слабо изученных регионов.

**Ключевые слова:** спутниковая и морская набортная гравиметрия, континентальный шельф, плотность и мощность кайнозойских осадков, южный и центральный Вьетнам.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетние исследования в изучаемом районе многие акватории остаются неизученными или отработаны судовой гравиметрией по очень редкой сети наблюдений. Это, прежде всего, касается глубоководных бассейнов и отдаленных районов. Для

восполнения пробелов в данных судовых наблюдений могут быть эффективно использованы альтиметрические данные.

Однако каждый из указанных видов данных, используемый в конкретных целях, имеет как преимущества, так и недостатки с точки зрения стоимости,

удобства и приемлемости. Преимуществами спутниковой альтиметрии являются: доступность по очень скромной цене и широкий охват практически всех морских районов с достаточной плотностью и равномерностью. С другой стороны, ее недостатками являются невысокая точность в пределах береговых зон, островов и на очень высоких широтах, а также относительно низкое разрешение аномалий малой амплитуды ( $< 5$  мГал) [13, 14]. На наш взгляд, эти характеристики нуждаются в улучшении путем объединения с судовыми гравиметрическими данными.

Sandwell D.T. и Smith W.H.F. [4] вычислили глобальные морские гравитационные аномалии, используя альтиметрические данные со спутников Geosat, ERS-1, Topex/Poseidon. Эти результаты были сопоставлены с судовыми гравиметрическими данными, в результате была получена сетка гравитационных аномалий, погрешность которых составила от  $\pm 4$  мГал до  $\pm 7$  мГал. Там, где треки спутников совпадают с профилями судовых наблюдений, погрешность может достигнуть  $\pm 3$  мГал [13].

В 2009 г. эти же авторы сделали сопоставление результатов судовой гравиметрии с глобальной гравиметрической сеткой, полученной по альтиметрическим данным. Расхождение альтиметрических и судовых данных оказалось в диапазоне от  $\pm 2.0$  мГал в акватории Мексиканского залива до  $\pm 4.0$  мГал в районах с неровным рельефом морского дна. Наибольшее расхождение, до 20 мГал, имело место над гребнями узких крупных подводных гор [14].

Huang M.T., Zhai G.T., Ouyang Y.Z. et al. (2006 г.) для расчета аномалий силы тяжести в прибрежном районе о. Тайвань использовали альтиметрические данные по наблюдениям за спутниками Geosat / GM. Результаты показали, что в таких условиях спутниковая гравиметрия не очень точна. Был сделан вывод, что эту проблему необходимо преодолеть, чтобы альтиметрические данные можно было использовать в прибрежных районах [7].

В 2010 г. Andersen O.B., Knudsen P. и Berry P.A.M. для определения морских аномалий силы тяжести и построения гравитационной модели DNSC08GRA использовали альтиметрические данные, взятые со спутников Geosat, ERS, Jason, Envisat, GFO и ICE. Вычисленные результаты сравнивались с данными 321400 пунктов судовой гравиметрии, выполненной в северо-западной части Атлантического океана с точностью  $\pm 3.91$  мГал [11]. В 2010 г. Andersen O.B. обновил модель DNSC08GRAV до DTU10GRAV, добавив новые альтиметрические данные со спутников ERS и ENVISAT. В результате модель DTU10GRAV достигла точности  $\pm 3.82$  мГал.

В 2016 г. Zhang S., Sandwell D.T., Taoyong J., Dawei Li использовали альтиметрические данные со спутников Geosat, ERS-1, Envisat, Jason-1, Cryosat-2 и SARAL/Altika для расчета аномалий силы тяжести в пределах Восточно-Китайского моря. Результаты вычислений сравнивались с судовыми данными Национального центра геофизических данных (NGDC). Среднеквадратичные расхождения между ними распределились следующим образом: для Восточно-Китайского моря –  $\pm 5,986$  мГал; для акватории вблизи южного побережья Тайваня –  $\pm 5.217$  мГал; в районе о-ва Окинава и прилегающей к нему акватории –  $\pm 5.674$  мГал; вокруг Филиппинских островов –  $\pm 8.279$  мГал [21].

Во Вьетнаме альтиметрические данные в последние годы также были использованы для морских исследований. В 2005 г. Bui Cong Que, Tran Tuan Dung и др. [2] использовали данные спутниковой гравиметрии в сочетании с результатами гравиметрических измерений, выполненных на судах «Профессор Гагаринский» и «Атлант», для создания морской гравиметрической сети в акватории восточного Вьетнама и прилегающих районах. Погрешность этой сети составила  $\pm 8.5$  мГал.

В 2012 г. Nguyen Van Sang рассчитал гравитационные аномалии по данным альтиметрии ENVISAT с 10 измеренными циклами в сочетании с судовыми данными, полученными в Южно-Китайском море. Погрешность рассчитанных аномалий достигла  $\pm 6$  мГал.

Нами для повышения точности и разрешающей способности спутниковой гравиметрии, определения плотности и мощности кайнозойских осадков в пределах континентального шельфа южного и центрального Вьетнама с прилегающими районами использованы несколько методов интерпретации гравитационных аномалий, включая метод коллокации наименьших квадратов, расчет кажущейся плотности осадков и трехмерное гравитационное моделирование. Для исследований выбран район, ограниченный координатами  $106^{\circ}$ – $119^{\circ}$  в.д. и  $7^{\circ}$ – $18^{\circ}$  с.ш.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе для получения новой базы гравиметрических данных, имеющих более высокую точность и одинаковое разрешение в пределах континентального шельфа южного и центрального Вьетнама и прилегающих районах, гравитационные аномалии, полученные по данным спутниковой альтиметрии, были откорректированы путем сопоставления с аномалиями силы тяжести, полученными по данным судовой гравиметрии.

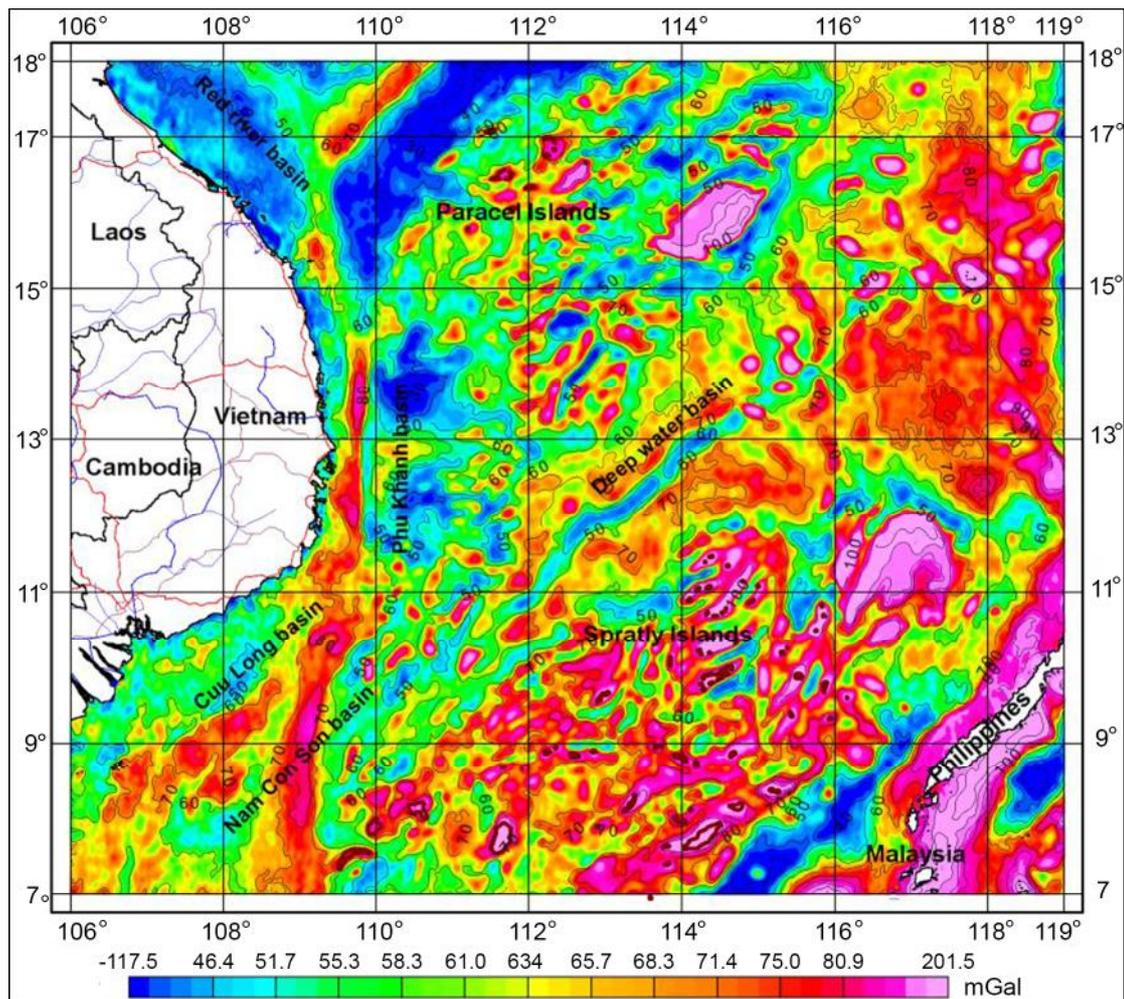


Рис. 1. Карта морских гравитационных аномалий по данным спутниковой альтиметрии.

Для этого использованы следующие первичные данные:

- массив альтиметрических данных по сетке со стороной  $1' \times 1'$ , рассчитанных Sandwell D.T. и др. с использованием многолетних наблюдений за спутниками Geosat, Topex/Poseidon, ERS-1, 2, CryoSat-2, Envisat и Jason-1) [13–16], и карта гравитационных аномалий, построенная по этим данным (рис. 1);

- данные судовой гравиметрии, выполненной на научно-исследовательских судах «Профессор Гагаринский» (1990–1992 гг.) [8] и «Профессор Полшков» (2007–2008 гг.) в рамках Российско-Вьетнамского научного сотрудничества;

- гравиметрические данные последних лет, хранящиеся в Международном Гравиметрическом Бюро (BGI) во Франции [5] (рис. 2).

- данные о глубинах морского дна (рис. 3) и сейсмические данные (рис. 4), полученные производственными компаниями в пределах и за пределами

Вьетнама в рамках проектов VOR93, JMS05, PKL07-08 [2, 9, 17, 18, 20], для определения плотности и мощности кайнозойских осадков.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

##### Метод коллокации наименьших квадратов

Этот метод выбран как способ повышения точности гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии, на основе совместного анализа с результатами судовой гравиметрии.

Точность и разрешение морских гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии, зависят от множества факторов, включая типичное состояние поверхности моря и высоту орбиты спутника. Кроме того, эти характеристики существенно зависят от объема и качества судовых гравиметрических данных, с которыми сравнивается спутниковая информация. Нами выбраны судовые данные, полученные на научно-исследовательских судах «Профессор Гагаринский», «Профессор

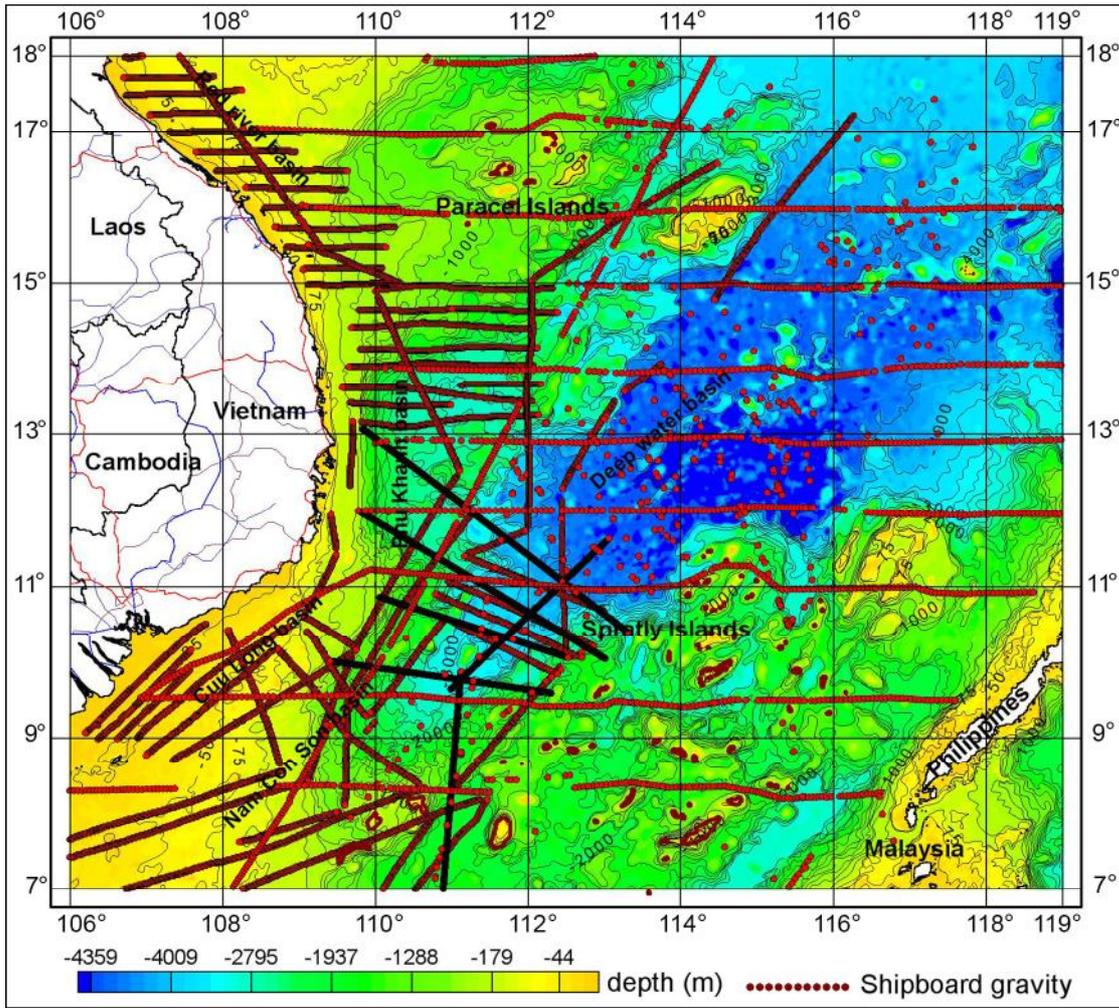


Рис. 2. Расположение профилей судовой набортной гравиметрии.

Полшков» и заимствованные в Международном Гравиметрическом Бюро [6].

Согласно методу коллокации, скорректированные аномалии силы тяжести в точке Р вычисляются по следующей формуле [10, 14]:

$$\Delta g_p = \begin{bmatrix} K(\Delta g^{alt}, \Delta g_p) \\ K(\Delta g^{alt}, \Delta g_p) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} K(\Delta g^{alt}, \Delta g^{alt} + C_{\Delta^{alt} \Delta^{alt}}) & K(\Delta g^{alt}, \Delta g^{sh}) \\ K^T(\Delta g^{alt}, \Delta g^{sh}) & K(\Delta g^{alt}, \Delta g^{sh} + C_{\Delta^{sh} \Delta^{sh}}) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta g^{alt} \\ \Delta g^{sh} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Delta g^{alt}$  – значения гравитационных аномалий, полученных по данным альтиметрии;  $\Delta g^{sh}$  – значения гравитационных аномалий, полученных по данным судовой гравиметрии;  $K(.,.)$  – ковариационная матрица

гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии или по данным судовой гравиметрии;  $C_{\Delta\Delta}$  – ковариационная матрица расхождения гравитационных аномалий.

Ковариантная матрица гравитационных аномалий рассчитана по модели Tscherning-Rapp's [19]:

$$K(\Delta g_i, \Delta g_j) = \alpha \sum_{l=2}^N d_l \frac{(l-1)^2}{r_i r_j} \left[ \frac{R^2}{r_i r_j} \right] \times P_l(\cos \Psi) + \sum_{l=N+1}^{\infty} \frac{A}{(l-2)(l+b)} \frac{(l-1)}{r_i r_j} \left[ \frac{R_B^2}{r_i r_j} \right]^{l+1} \times P_l(\cos \Psi), \quad (2)$$

где  $P_l(\cos \Psi)$  – полином Лагранжа порядка  $l$ ;  $\Psi$  – сферическое расстояние между точками  $i$  и  $j$ ;  $r_i, r_j$  – расстояние до точки  $i$  и  $j$  от начала координат;  $R$  – средний радиус Земли;  $\alpha$  – параметр коррекции,  $d_l$  – дисперсия коэффициентов до порядка  $N$ ,  $b$  – константа с выбранной величиной = 4,  $A$  – единица измерения

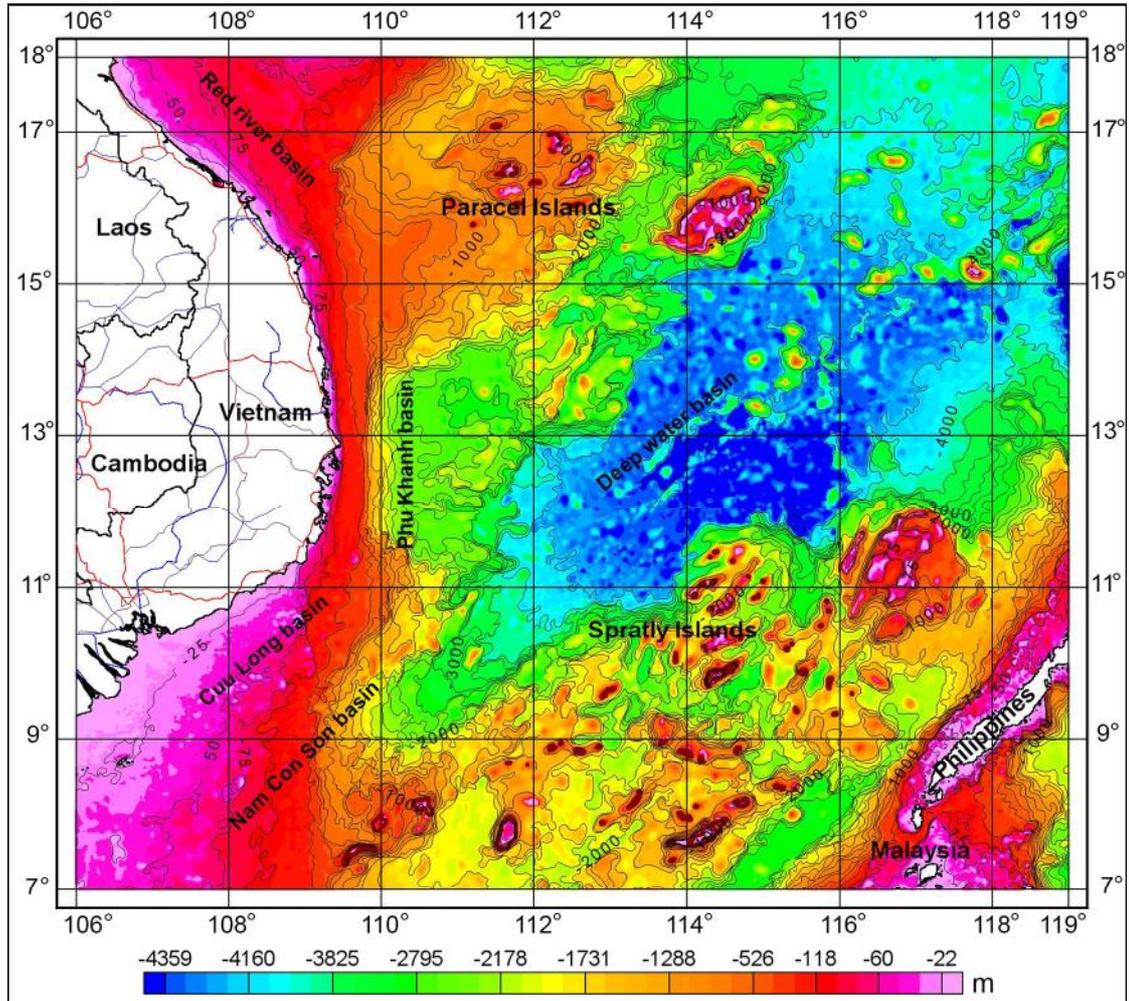


Рис. 3. Карта изоглубин морского дна.

$(m/s)^4$ ,  $R_B$  – радиус сферы Бьерхаммара. Параметры  $\alpha$ ,  $d_p$ ,  $N$ ,  $A$  и  $R_B$  определяются путем сопоставления функции теоретической дисперсии с ее экспериментальными значениями.

#### Расчет кажущейся плотности осадков

Для выделения гравитационного эффекта кайнозойских осадков из общего наблюдаемого гравитационного поля был использован метод частотной фильтрации. Полученные в результате этого остаточные аномалии были использованы для расчетов плотности и мощности осадочного слоя.

Плотность осадков рассчитывалась по следующей формуле [1, 18]:

$$\sigma(x, y) = \frac{\Delta g_{hf}(x, y)}{2\pi G \Delta Z(x, y)}, \quad (3)$$

$\Delta g_{hf}(x, y)$  рассчитывалась путем прямого и обратного преобразования с использованием фильтра верхних частот по следующей формуле:

$$F\{\Delta g_{hf}(x, y)\} = F\{H(x, y)\} F\{\Delta g(x, y)\}, \quad (4)$$

где  $\sigma(x, y)$  – кажущаяся плотность кайнозойских осадков;  $\Delta Z(x, y)$  – средняя мощность кайнозойских осадков;  $F\{\}$  – преобразование Фурье;  $\Delta g_{hf}(x, y)$  – высокочастотные аномалии, отфильтрованные с помощью оператора  $H(x, y)$ ;  $\Delta g(x, y)$  – гравитационные аномалии;  $G$  – гравитационная постоянная;  $H(x, y)$  – фильтр оператора

$$H(x, y) = e^{-D(x, y)^2 / 2\lambda^2}, \quad (5)$$

где  $D(x, y)$  – расстояние между точкой  $(x, y)$ , располагающейся на границе окна фильтрации, и его центром;  $\lambda$  – длина волны отсечки.

#### Гравитационное 3D моделирование

Для определения плотностных границ в земной коре многими учеными внедрены различные 3D-алгоритмы прямого и обратного преобразования. В 1973–1974 гг. Р. Паркер [12] и Д. Ольденбург [10], используя алгоритм Р. Паркера, создали вариант гра-

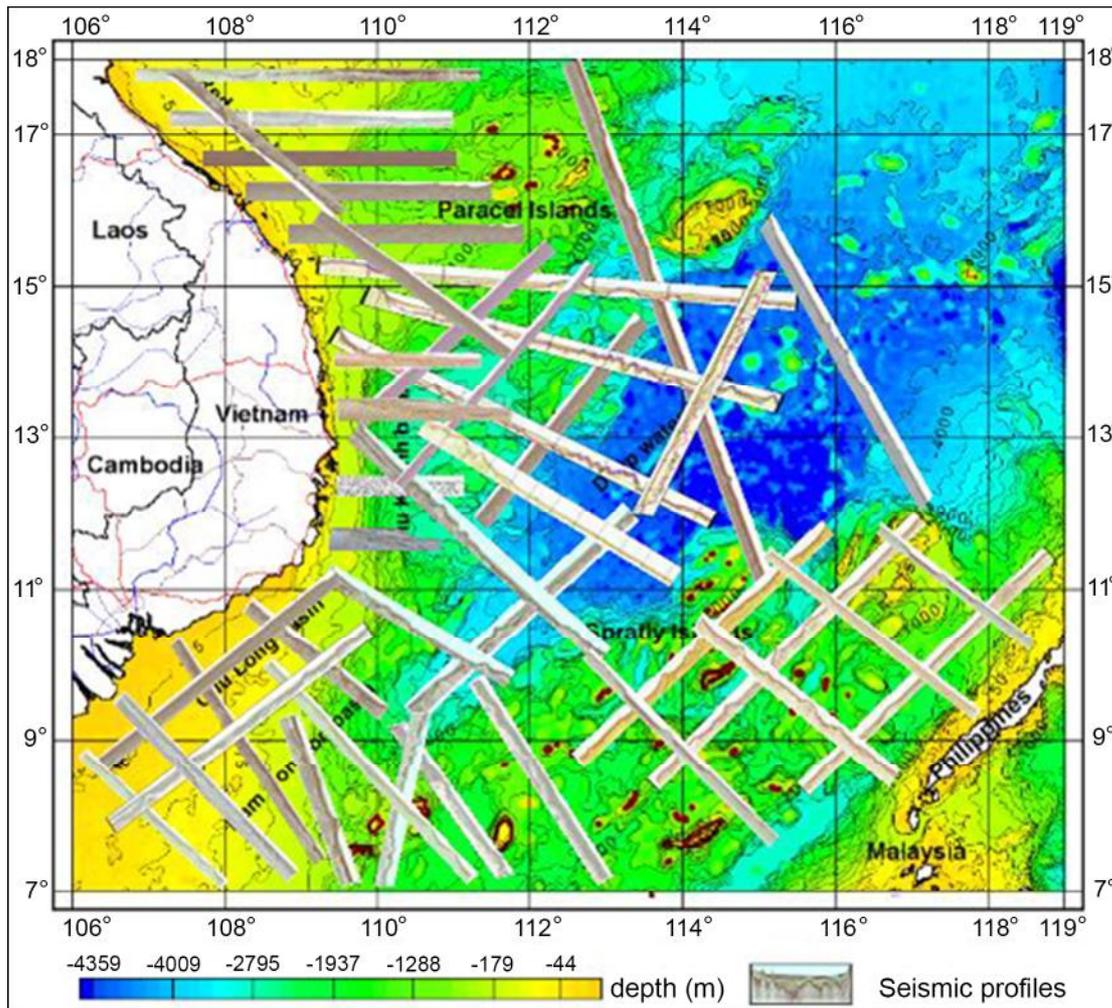


Рис. 4. Расположение сейсмических профилей, использованных в работе.

витационной аномалии от 3D-модели. На основе алгоритма Паркера-Ольденбурга [10] Г.О. Дэвид [3] создал программное обеспечение 3DINVER с открытым исходным кодом на MATLAB. Совсем недавно аналогичным образом компания программного обеспечения Geosoft также применила гравитационную трехмерную модель в частотной области, основанную на алгоритме Паркера.

Для определения плотностных границ мы также использовали алгоритм Паркера-Ольденбурга [10, 12] через преобразование Фурье:

$$F\{\Delta g\} = -2\pi G\rho e^{-kz_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F\{h^n(x)\}, \quad (6)$$

где  $F\{\}$  – Фурье преобразование,  $G$  – гравитационная постоянная,  $\Delta g$  – гравитационная аномалия,  $\rho$  – контраст плотностей на границах,  $k$  – волновое число,  $z_0$  – средняя глубина,  $h(x)$  – глубина плотностной границы.

Из приведенной выше формулы через обратное преобразование Фурье [3–5, 12] можно определить плотностные границы.

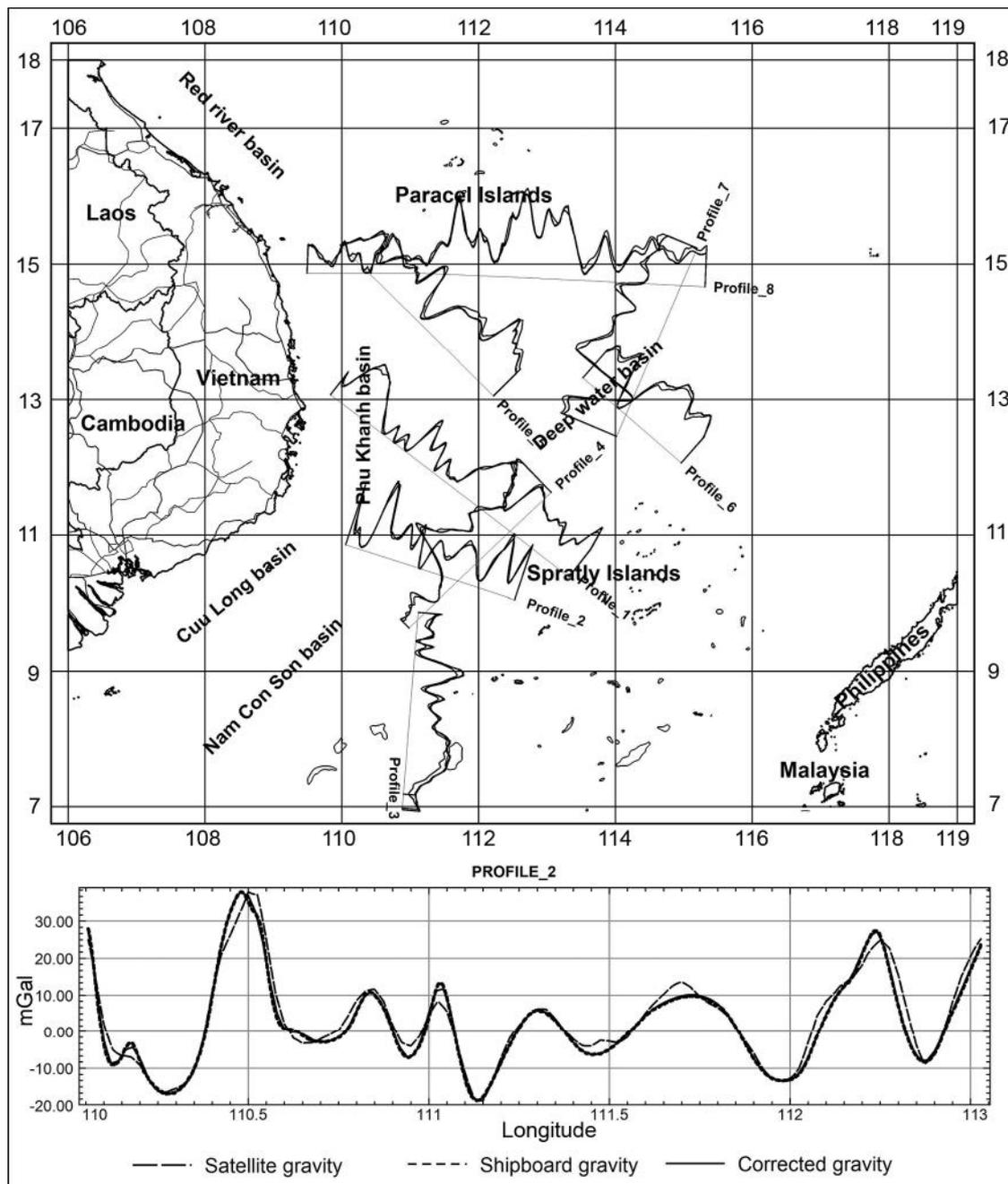
#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

##### Результаты метода коллокации наименьших квадратов

Гравитационные аномалии, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, после коррекции были сопоставлены с гравитационными аномалиями, полученными судовой гравиметрией. Среднеквадратичное расхождение между альтиметрическими и судовыми данными составило:

$$\sigma_{\delta g} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta g_i^{aft} - \Delta g_i^{sh})^2} = 1.208 \text{ мГал}, \quad (7)$$

где  $\Delta g_i^{aft}$  – гравитационные аномалии по данным спутниковой альтиметрии после корректировки;  $\Delta g_i^{sh}$  – гравитационные аномалии, полученные по результатам судовой гравиметрии.



**Рис. 5.** Иллюстрация результатов корректировки альтиметрических гравитационных аномалий по данным судовых гравиметрических измерений.

На рисунке 5 приведена иллюстрация корректировки альтиметрических гравитационных аномалий по данным нескольких профилей судовых гравиметрических измерений.

В результате среднеквадратичная погрешность аномалий, вычисленных по данным спутниковой альтиметрии, сократилась с  $\pm 9.358$  мГал до  $\pm 1.208$  мГал (для случая, когда спутниковые траектории соответствовали профилям судовых наблюдений).

Итак, на базе метода, изложенного выше, альтиметрические гравитационные аномалии были скорректированы в пределах континентального шельфа южного и центрального Вьетнама и прилегающих акваторий. Результатом этой корректировки стала сформированная сетка исправленных значений гравитационных аномалий (с интервалом  $1' \times 1'$ ) и карта гравитационных аномалий (рис. 6). Диапазон изменения исправленных альтиметрических аномалий со-

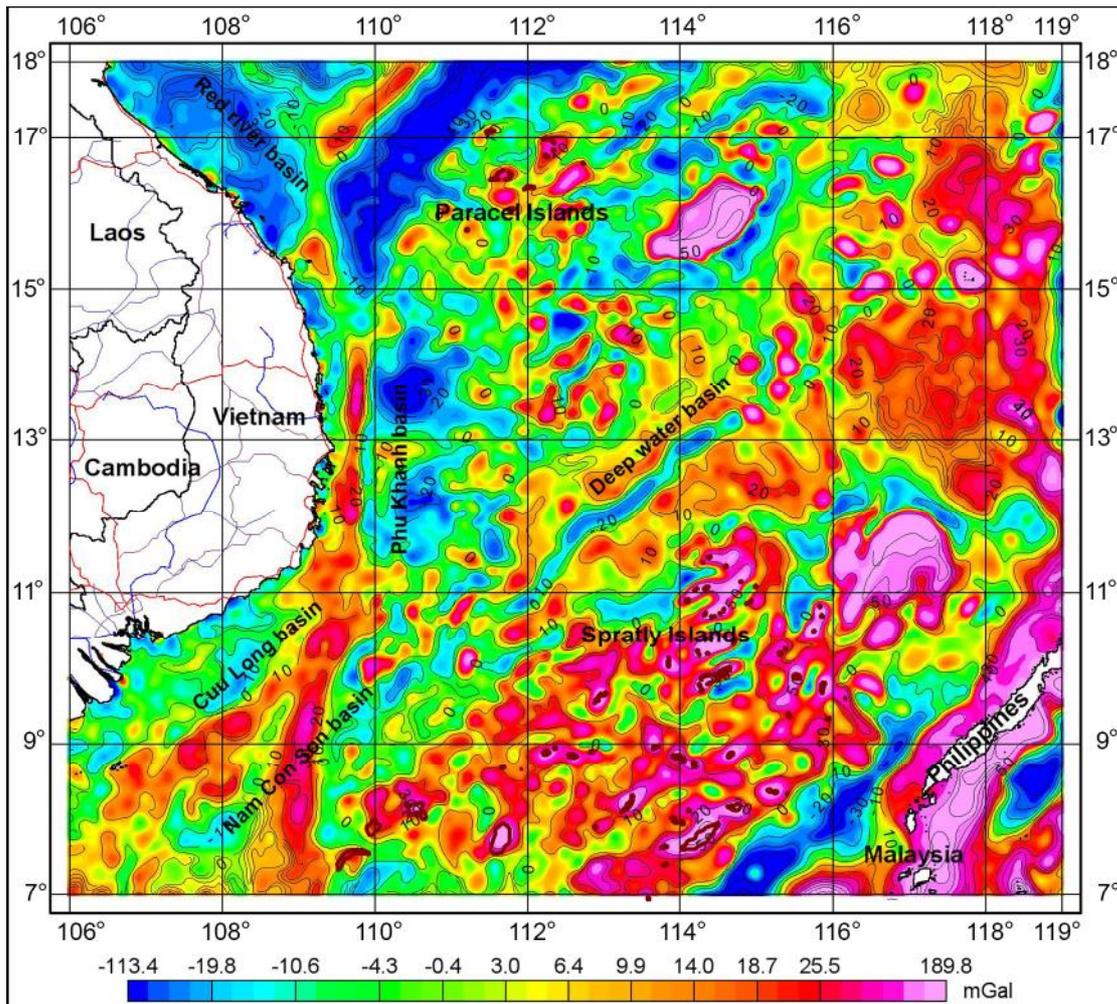


Рис. 6. Карта откорректированных альтиметрических гравитационных аномалий.

ставляет от -113.4 мГал до 189.8 мГал. Для сравнения, диапазон изменения исходных гравитационных аномалий составлял от -117.5 мГал до 201.5 мГал.

Сравнение полученных результатов с исходными данными показало, что после исправления альтиметрические гравитационные аномалии значительно меняются в точках судовых измерений, а в окрестностях, – чем дальше от этих точек, тем гравитационные аномалии меняются меньше.

#### Плотность кайнозойских осадков

Распределение кажущейся плотности кайнозойских осадков рассчитано с помощью гравитационной 3D модели (с использованием высокочастотных аномалий силы тяжести, отфильтрованных с длиной волны  $\lambda = 200$  км). Кажущаяся плотность  $\sigma$  этого слоя варьирует в среднем от 1.80 до 2.60 г/см<sup>3</sup>. Эти значения были использованы в качестве входной информации при 3D моделировании мощности кайнозойских осадков.

По результатам выполненной работы общая характеристика кайнозойских осадков может быть представлена следующим образом (рис. 7).

В пределах континентального шельфа южного и центрального Вьетнама и прилегающих акваторий значения плотности кайнозойских осадков изменяются в интервале 1.8 – 2.6 г/см<sup>3</sup>. Во впадинах р. Красной (Red River) и р. Меконг (Cuu Long) плотность осадков варьирует в интервале 2.0–2.4 г/см<sup>3</sup>. Во впадине р. Красной и в районе Парасельских островов (Paracel Isl.) изолинии плотностей кайнозойских осадков ориентированы в направлении юго-восток – северо-запад. В пределах впадины р. Меконг изолинии ориентированы в направлении юго-запад – северо-восток.

Во впадине Фу Хань (Phu Khanh) плотность кайнозойских осадков изменяется в пределах 1.8–2.6 г/см<sup>3</sup>. При этом на западе и в южной части впадины плотность составляет 1.8 г/см<sup>3</sup>, в ее центре увеличивается до 2.6 г/см<sup>3</sup> и на восточной окраине этой структуры

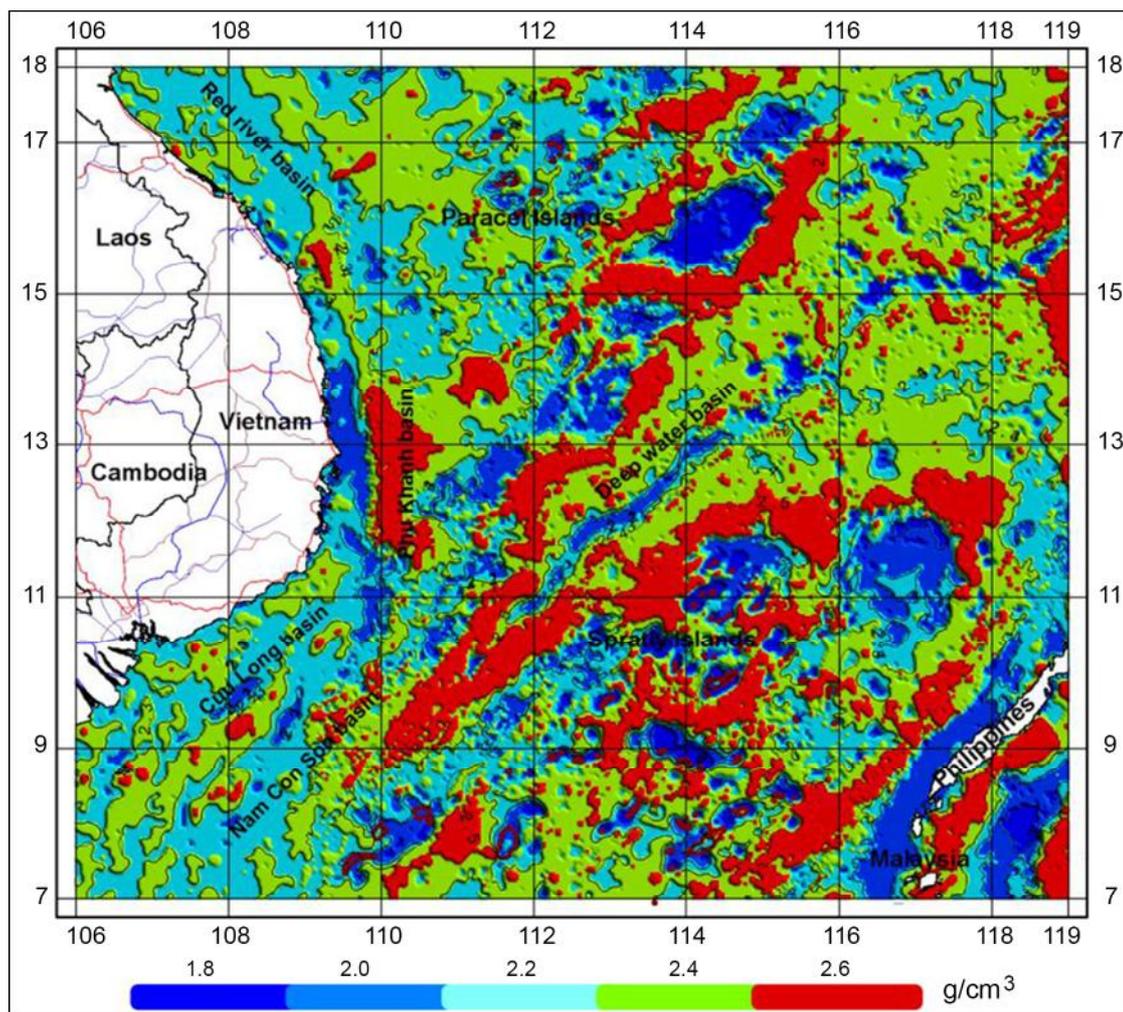


Рис. 7. Карта средней кажущейся плотности кайнозойских осадков.

плотность составляет  $2.4 \text{ г/см}^3$ . Кроме этого, изолинии плотностей кайнозойских осадков здесь ориентированы в меридиональном направлении.

Плотность кайнозойских осадков в пределах впадины Южный Куншань (Nam Con Son) изменяется в интервале  $2.4\text{--}2.6 \text{ г/см}^3$ , а плотностные изолинии ориентированы в юго-запад – северо-восточном направлении.

В районе о-вов Спратли (Spratly Isl.) плотность одновозрастных осадков варьирует от  $1.8 \text{ г/см}^3$  до  $2.6 \text{ г/см}^3$ . Плотность кайнозойских осадков в пределах Парасельских островов характеризуется меньшими величинами, чем на островах Спратли, и изменяется в пределах  $1.8\text{--}2.4 \text{ г/см}^3$ . Как видно, по плотности осадков между этими объектами существует существенная дифференциация.

В пределах глубоководной части моря значения плотности кайнозойских осадков находятся в интервале  $1.8\text{--}2.6 \text{ г/см}^3$ . Вдоль оси спрединга морского дна

плотность минимальна и составляет  $1.8 \text{ г/см}^3$ . Она постепенно повышается к краям этой котловины. Плотностные изолинии ориентированы в направлении юго-запад – северо-восток.

#### Мощность кайнозойских осадков

Расчет мощности кайнозойских осадков с использованием 3D-моделирования выполнялся в итеративном режиме, результаты вычислений сопоставлялись с наблюдаемыми гравитационными аномалиями и заданными сейсмическими параметрами модели. Расчеты заканчивались, когда ошибка полученной модели достигала допустимого значения. В процессе расчетов стандартные значения сейсмических параметров фундамента кайнозойских осадков, принятые в начальной модели, оставались неизменными.

Полученные результаты представлены картой мощности осадочных отложений (рис. 8). На этой основе общая характеристика мощности кайнозойских

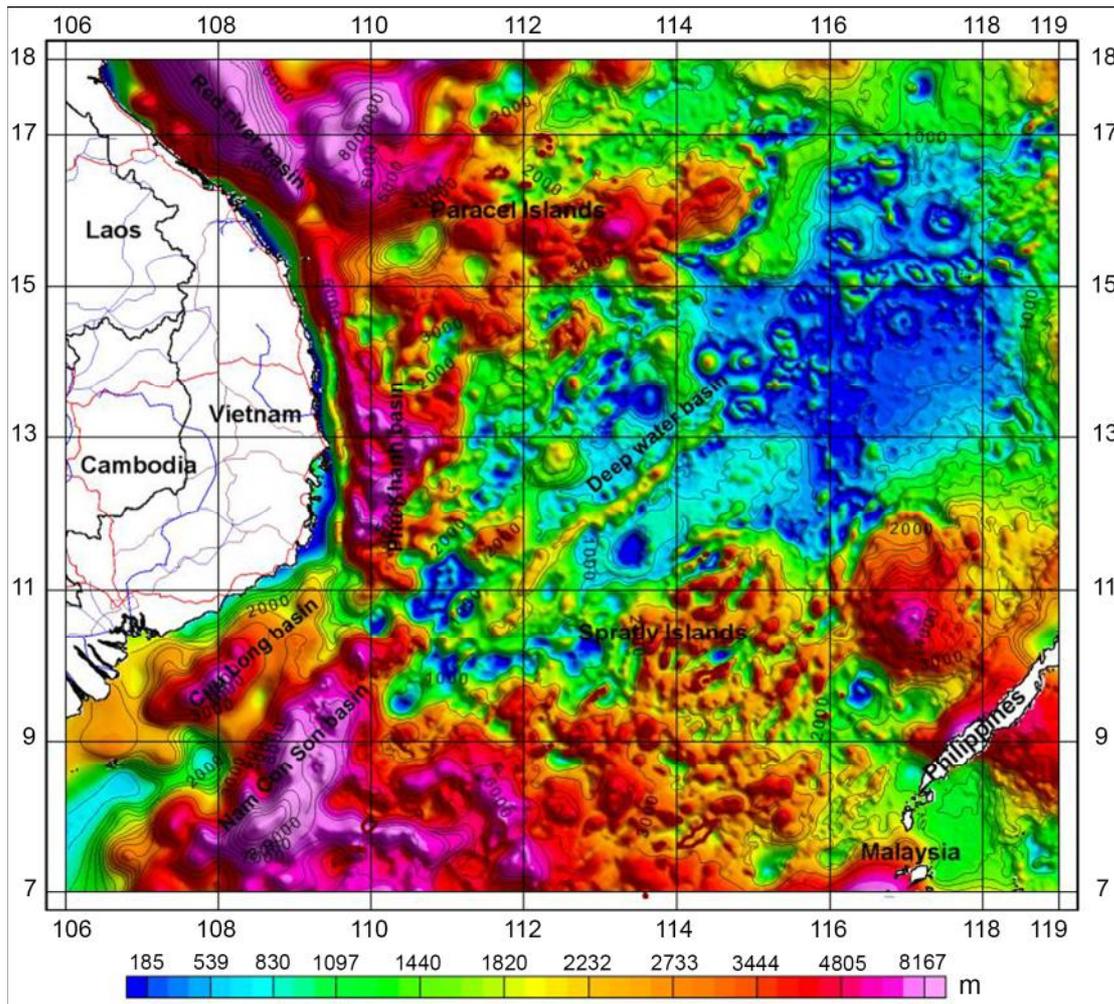


Рис. 8. Карта мощности кайнозойских осадков.

осадочных отложений может быть представлена следующим образом.

В пределах изучаемой площади мощность кайнозойских осадков изменяется в интервале от 155 м до 8357 м. В целом, мощность осадков во впадинах р. Красной, р. Меконг, Фу Хань и Южный Куншань превышает мощность осадочных отложений в их обрамлении.

Во впадине р. Красной мощность осадков, достигающая 8000 м в центральной части, снижается до 3000 м на периферии этой структуры. В пределах впадины Фу Хань мощность кайнозойских осадков также составляет около 8000 м и постепенно снижается до 1500 м в пределах глубоководной котловины. Мощность кайнозойского осадочного комплекса в центральной части впадины р. Меконг составляет 5000 м и снижается примерно до 2000 м на ее окраине. Максимальная мощность осадочных отложений наблюдается в пределах впадины Южный Куншань, где она превышает 8000 м, а минимальная мощность осадков в этом

районе составляет около 4000 м. Мощность осадков в районе островов Парасельских и Спратли варьирует в широком диапазоне – от 1000 м до 4000 м. В центральном районе исследуемой площади наименьшая мощность осадков приурочена к глубоководной котловине, где она изменяется от 185 м в ее северо-восточной части до 2000 м – на юго-западе.

Из изложенного видно, что мощность кайнозойских осадочных отложений распределяется в полном соответствии с типом донных морфотектонических структур региона.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа показала, что корректировка гравитационных аномалий, вычисленных по данным спутниковой альтиметрии, на основе сопоставления и совместной обработки с результатами судовой гравиметрии является наилучшим способом повышения их точности и разрешающей способно-

сти. После корректировки альтиметрических данных, совпадающих с судовыми гравиметрическими профилями, среднеквадратичное расхождение между ними уменьшилось с  $\pm 9.358$  мГал до  $\pm 1.208$  мГал. Это эффективно способствует морским исследованиям.

С помощью 3D моделирования вышеописанных улучшенных гравитационных аномалий в комбинации с сейсмическими данными определены плотность и мощность кайнозойских осадков. Полученная нами модель распределения мощности осадочных отложений отличается от предшествующих моделей. В частности, мощность осадков в районе океанической коры оказалась больше, особенно вдоль осевой зоны спрединга, где она достигает значений от 1250 м до 2500 м.

Полученные результаты показывают эффективность и актуальность использования альтиметрической гравиметрии для детальных исследований геологических структур. Это особенно значимо для отдаленных и слабо изученных районов и способствует повышению качества морских исследований.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Выполненные исследования были поддержаны Проектом VT-UD.03/17-20 и Проектами Вьетнамской академии наук и технологий: № VAST06.01/18-19 и № DLTE00.09/18-19

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bott M.H.P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1960. V. 3, N 1. P. 63–67.
2. Bui Cong Que, Tran Tuan Dung et al. Construction of National atlas for characteristics on the natural conditions and environment in the sea areas of Vietnam. 2005 : State level project. National program for marine research KC-09-02.
3. David G.O., Bhrigu N.P.A. 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm // *J. Computers & Geosci.* 2005. V. 31, N 4. P. 513–520.
4. Forsberg R., Tscherning C.C. Geodetic gravity field modelling programs. Denmark: National Space Institute and Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, 2008.
5. Geosoft. The montaj GM-SYS 3D Modelling extension requires Geosoft's Oasis montaj. 2009.
6. <http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Marine-Gravity-data>.
7. Huang M.T., Zhai G.J., Ouyang Y.Z. et al. Recovery of marine gravity field using integrated data from multi-satellite missions // *Sci. Surv. Mapp.* 2006. V. 31, N 6. P. 37–39 (in Chinese).
8. Kulnich R.G., Zabolotnikov A.A., Markov Yu.D., Zhuravlev A.V., Zdrovenin V.V., Golovan A.A., Obzhurov A.I., Nikolaeva N.A. Formation and evolution of the Earth crust in the South China Sea and in the Southeast Asia. M.: Publishing Nauka, 1994. 250 pp. (in Russian).
9. Nguyen Trong Tin, Tran Tuan Dung et al. Tectonic characteristics of Cenozoic basins in the East Vietnam Sea based on new studied results: International conference on Science and technology – 35 years of Vietnam Petroleum. 2010. P. 57–73.
10. Oldenburg D.W. The inversion and interpretation of gravity anomalies // *Geophys.* 1974.V. 39, N 4. P. 526–536.
11. Ole Baltazar Andersen, Per Knudsen, Philippa A.M. Berry. The DNSC08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry // *J. Geodesy.* 2010. V. 84, Is. 3. P. 191–199. DOI 10.1007/s00190-009-0355-9.
12. Parker R.L. The rapid calculation of potential anomalies // *Geophys. J. Royal Astronom. Soc.* 1973. V. 31. P. 447–455.
13. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 10039–10054.
14. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *J. Geophys. Res.* 2009.V. 114, B01411. DOI:10.1029/2008JB006008.
15. Sandwell D.T., Garcia E., Soofi K., Wessel P., Smith W.H.F. Towards 1 mGal global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1 // *The Leading Edge.* 2013. 32(8). P. 892–899. DOI: 10.1190/tle32080892.1.
16. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science.* 2014. V. 346, N 6205. P. 65–67. DOI: 10.1126/science.1258213.
17. Tran T.D. Characteristics of structure – tectonic in the deep water of the East Sea of Vietnam based on interpretation of gravity and magnetic anomaly data: The 35th Conference of Vietnam Petroleum Institute, 2013. P. 55–66.
18. Tran T.D., Bui C.Q., Nguyen Ho. Phu. Cenozoic basement structure of the South China Sea and adjacent areas by modeling and interpreting gravity data // *Russian J. of Pacific Geol.* 2013. N 4. P. 227–236.
19. Tscherning C.C., Rapp R.H. Closed covariance expressions for gravity anomalies, geoid undulations, and deflections of the vertical implied by anomaly degree variance models // *Reports of the Department of Geodetic Science.* 1974. N 208, The Ohio State Univ., Columbus.
20. Vietnam Oil and Gas Corporation // *Geol. & Petrol. Resources of Vietnam.* 2012. 745 p.
21. Zhang S., Sandwell D.T., Taoyong J., Dawei L. Retracking of SARAL/AltiKa radar altimetry waveforms for optimal gravity field recovery // *Marine Geodesy.* 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2016.1265032>.

Рекомендована к печати В.Б. Каплуном  
после доработки 29.01.2019 г.  
принята к печати 13.03.2019 г.

*Tran Tuan Dung, R. G. Kulinich, Nguyen Van Sang, Bui Cong Que, Nguyen Ba Dai,  
Nguyen Kim Dung, Tran Tuan Duong, Tran Trong Lap*

**Improving accuracy of altimeter-derived marine gravity anomalies for geological structure research in the Vietnam south and central continental shelf and adjacent areas**

In recent years, the satellite altimeter technology allows to enhance the marine investigation in any area. Up to now, many scientific studies have attempted to improve the accuracy and resolution of altimeter-derived gravity anomalies and have produced a gravity grid with an interval of 1'x1' for most of the ocean areas all over the world. However, such anomalies are not very accurate and have a large discrepancy with the results of marine on-Board gravimetry, especially in coastal and island areas.

The purpose of this paper is to improve the accuracy of altimeter-derived marine gravity anomalies for study of the geological structure in the Vietnam south-central continental shelf and adjacent areas. The least squares collocation method is used to correct the altimeter-derived marine gravity data based on-Board gravity data in order to improve the accuracy of marine gravity anomalies. Altimetric gravity anomalies (Sandwell D.T. et al. (24.1) and anomalies calculated on the basis of the results of marine gravimetric works carried out in previous years in the framework of joint projects of Vietnam with Russia and other countries were used as a starting material. A comparison of these data showed their standard deviation of about  $\pm 9.358$  mGal. After adjustment, the discrepancy between altimetric and ship anomalies was reduced to  $\pm 1.208$  mGal (for the case of satellite trajectories and ship profiles).

As a result of the interpretation of the above gravity anomalies in the 3D-version in combination with seismic data, the thickness and density of Cenozoic sediments were determined. The achieved results showed the effectiveness and relevance of the use of corrected gravity anomalies obtained from satellite altimetry data for detailed studies of geological structures. This is most significant for remote or poorly studied regions.

**Key words:** altimeter-derived gravity, on-Board gravity, of density and thickness of Cenozoic sediments, Vietnam south and central continental shelf.