

Р. Г. Горова¹✉, А. Н. Василевский^{1,2}, Е. И. Есин^{1,2}

Вычисление и анализ компонент тензора напряжений из изостатических аномалий для региона Эллинской субдукционной зоны

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука; ИНГГ СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: r.gorova@g.nsu.ru

Аннотация. Рассмотренный подход к интерпретации гравитационного поля подтвердил ранее заявленную возможность использования изостатических аномалий для расчета нормальных компонент тензора напряжений в активных субдукционных зонах. Показано, что изостатические аномалии Эллинской субдукционной зоны контролируются погружающейся литосферой, а не только рельефом или вариациями мощности коры. Расчет с помощью метода DEXP (Depth from Extreme Points) величин и положения аномальных масс согласуется с моделью погружающейся плиты Slab2. Вычисленные нормальные компоненты напряжений на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы растяжения/сжатия. Области согласия подтверждают надежность расчетов, тогда как выявленные несогласия предварительно объясняются изгибом Нубийской плиты (Средиземноморский хребет), переходом в мантию из-за тонкой коры (Критское море) либо отсутствием учета касательных напряжений.

Ключевые слова: изостатические аномалии, нормальные напряжения, Эллинская субдукционная зона, метод DEXP

R. G. Gorova¹✉, A. N. Vasilevsky^{1,2}, E. I. Esin^{1,2}

Calculation and analysis of stress tensor components from isostatic anomalies for the Hellenic subduction zone

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: r.gorova@g.nsu.ru

Abstract. The considered approach to interpreting the gravity field confirmed the previously stated possibility of using isostatic anomalies to calculate the normal components of the stress tensor in active subduction zones. It is shown that the isostatic anomalies of the Hellenic subduction zone are controlled by the subducting lithosphere, rather than by topography or crustal thickness variations alone. DEXP-based (Depth from Extreme Points) calculations of the magnitude and location of anomalous masses are consistent with the Slab2 subducting plate model. The calculated normal stress components at 15 km depth generally reflect the known extensional/compressional tectonic regimes. The areas of agreement confirm the reliability of the calculations, while the observed discrepancies can be preliminarily explained by bending of the Nubian slab (Mediterranean Ridge), transition into the mantle due to thin crust (Cretan Sea), or the omission of shear stresses.

Keywords: isostatic anomalies, normal stresses, Hellenic subduction zone, DEXP method

Введение

Эллинская субдукционная зона формируется в результате пододвигания Нубийской плиты под Эгейскую микроплиту. Современная кинематика детально охарактеризована GPS-наблюдениями. Нубийская плита движется на север-северо-запад со скоростью около 5 мм/год относительно Евразии, однако скорость субдукции достигает 35 мм/год за счет движения Эгейской плиты на юго-запад со скоростью около 33 мм/год [1]. Для региона характерно низкое сцепление: сейсмический момент объясняет лишь около 10% реальной конвергенции по GPS-данным [2]. Мощность коры варьирует от 16 до 40 км [3]. Погружающаяся Нубийская плита по модели Slab2 прослеживается до глубин более 440 км [4].

Несмотря на многолетние исследования, не проводилось оценок напряженного состояния земной коры, сопряженного с отклонениями от изостатического равновесия, и не проводилось рассмотрение вопроса - могут ли изостатические аномалии быть использованы для расчета нормальных компонент тензора напряжений?

Целью данной работы является комплексный количественный анализ нормальных компонент тензора напряжений, обусловленных изостатическими аномалиями Эллинской субдукционной зоны, и установление их связи с геометрией погружающейся плиты. Для достижения цели решаются следующие задачи: (1) анализ изостатических аномалий по глобальной модели XGM2019e 2159 [5]; (2) проверка гипотезы о том, что наблюдаемые изостатические аномалии обусловлены погружающейся плитой, путем продолжения аномалий вверх и сравнения с телами, аппроксимирующими геометрию Slab2; (3) вычисление нормальных компонент тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на основе решения Миндлина [6] по методике [7]; (4) сопоставление полученных полей нормальных напряжений с современными оценками по данным GPS о движениях плит.

Методы и материалы

В работе использована глобальная модель гравитационного поля XGM2019e 2159 [5], построенная по спутниковым, наземным и аэрогравиметрическим данным. Для анализа привлекались два типа аномалий: изостатические аномалии (рис. 1) и аномалии силы тяжести в свободном воздухе.

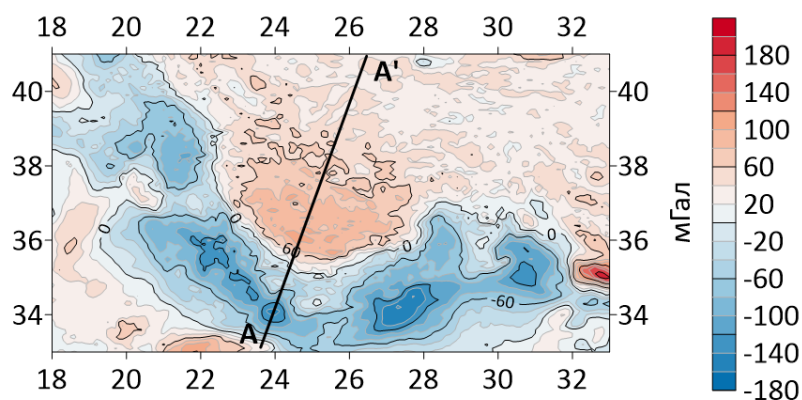


Рис. 1. Карта изостатических аномалий модели XGM2019e 2159 [5] с обозначением профиля AA' (рис. 1).

Для проверки гипотезы о связи изостатических аномалий с погружающейся Нубийской плитой был применен метод DEXP (Depth from Extreme Points), основанный на анализе поля потенциала и его производных. Метод позволяет оценить глубину залегания источников аномалий при самых общих предположениях об их форме. Расчет выполнялся для поля изостатических аномалий модели XGM2019e 2159. Полученные оценки глубин и пространственного положения источников были сопоставлены с геометрией погружающейся плиты по модели Slab2 [4], представляющей собой трехмерную поверхность верхней границы сейсмоактивной зоны субдукции. Совпадение пространственного распределения, в том числе оцененных глубин, интерпретировалось как подтверждение того, что изостатические аномалии в значительной степени обусловлены плотностной неоднородностью, связанной с погружающейся литосферой.

Расчет нормальных компонент тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) выполнялся на основе решения Р. Д. Миндлина для силы, приложенной в точке внутри полубесконечного упругого изотропного тела (рис. 2) [6] по методике, адаптированной для гравитационных изостатических аномалий [7]. Предполагается, что изостатическая аномалия Δg_i (мГал) вызвана наличием на глубине компенсации плитообразного тела переменной мощности H с постоянной плотностью $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$. Связь между H и Δg выражается формулой (1), где G – гравитационная постоянная ($6,67430 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$), g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$). Положительным изостатическим аномалиям соответствует избыток массы (положительная H), а отрицательным – дефицит массы (отрицательная H). Элементарная сила (нагрузка) P , действующая на площадку dA , вычисляется формулой (2). Ось z направлена вниз, поэтому положительные значения P соответствуют силе, направленной вниз, а отрицательные – силе, направленной вверх. Для каждой элементарной нагрузки P , приложенной на глубине компенсации $s = 30 \text{ км}$, вычисляются компоненты тензора напряжений в точке наблюдения на выбранной глубине $z = 15 \text{ км}$. В декартовой системе координат (x – на восток, y – на север, z – вертикально вниз) расстояния между источником и точкой наблюдения определяются формулами (3),

(4) и (5). Для перехода от распределения сил к нормальным компонентам тензора напряжений используются формулы (6), (7) и (8), где μ - коэффициент Пуассона [6]. Итоговое напряжение в каждой точке сетки получается суммированием вкладов от всех элементарных нагрузок по всей области.

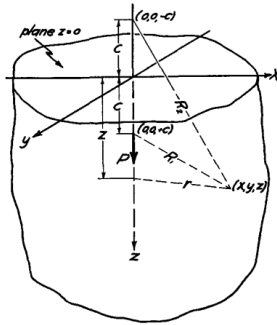


Рис. 2. Схема постановки задачи [6]

$$H = \frac{\Delta g_i}{2\pi G\rho} \quad (1)$$

$$P = dA\rho gH \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (3)$$

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - c)^2} \quad (4)$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z + c)^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} & \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{3x^2(z-c)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-c) - 4\mu(z+c)]}{R_2^3} \right. \\ & - \frac{3(3-4\mu)x^2(z-c) - 6c(z+c)[(1-2\mu)z - 2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cx^2z(z+c)}{R_2^7} \\ & \left. - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)} \left(1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{x^2}{R_2^2} \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} & \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{3y^2(z-c)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-c) - 4\mu(z+c)]}{R_2^3} \right. \\ & - \frac{3(3-4\mu)y^2(z-c) - 6c(z+c)[(1-2\mu)z - 2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cy^2z(z+c)}{R_2^7} \end{aligned}$$

$$-\frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+c)}\left(1-\frac{y^2}{R_2(R_2+z+c)}-\frac{y^2}{R_2^2}\right)\Bigg] \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{(1-2\mu)(z-c)}{R_2^3} + \frac{3(z-c)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)y^2(z-c) - 6c(z+c)[(1-2\mu)z - 2\mu c]}{R_2^5} - \frac{30cy^2z(z+c)}{R_2^7} \right] \quad (8)$$

Результаты

Результаты применения метода DEXP показывают, что изостатические аномалии вероятно вызваны погружающимся с юга на север телом, чья плотность повышается с глубиной (рис. 3). Аномальные массы определяются на глубинах 30 – 50 км (дефицит масс) и на глубинах 70 - 90 км (избыток масс). Нормальные компоненты тензора напряжений, вычисленные из изостатических аномалий, полностью противоположны тектонической обстановки региона: в районе желоба и его окрестностей наблюдаются горизонтальные напряжения растяжения (рис. 4 А; рис 4 Б). Горизонтальные компоненты σ_{xx} и σ_{yy} характеризуются большей амплитудой, чем вертикальная σ_{zz} (рис. 4 В). Компонента σ_{xx} характеризуется сжатием в области Эгейского моря, Анатолии, о-ва Кипр и на запад-юго-запад от глубоководного желоба, а области растяжения формируют полосу окаймляющую субдукционную зону. Компонента σ_{yy} имеет примерно такое же пространственное распределение, но области растяжения встречаются в основном в южной части. Максимальное сжатие по оси z тоже наблюдается в полосе, окаймляющей субдукционную зону. Локальные зоны вертикального растяжения наблюдаются в регионе острова Кипр и в Критском море.

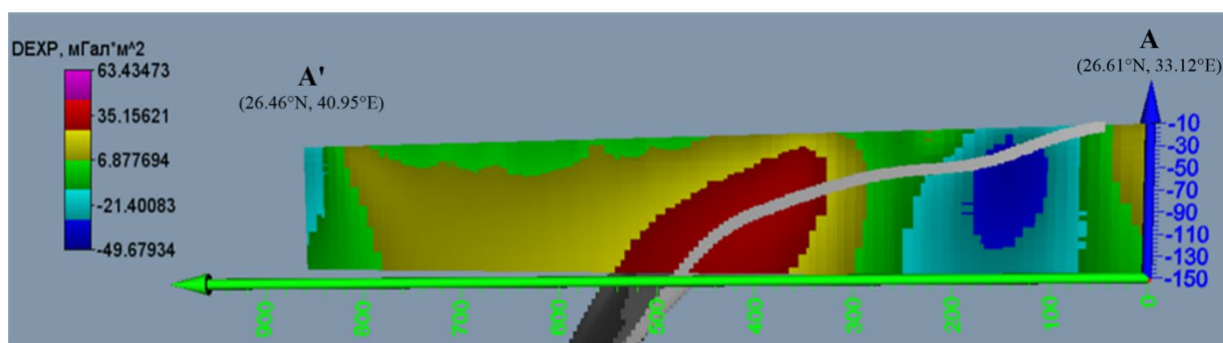


Рис. 3. Источники изостатических аномалий по профилю AA' (рис. 1), полученные методом DEXP и сопоставленные с моделью погружающейся плиты Slab2 [4] (толстая серая линия).

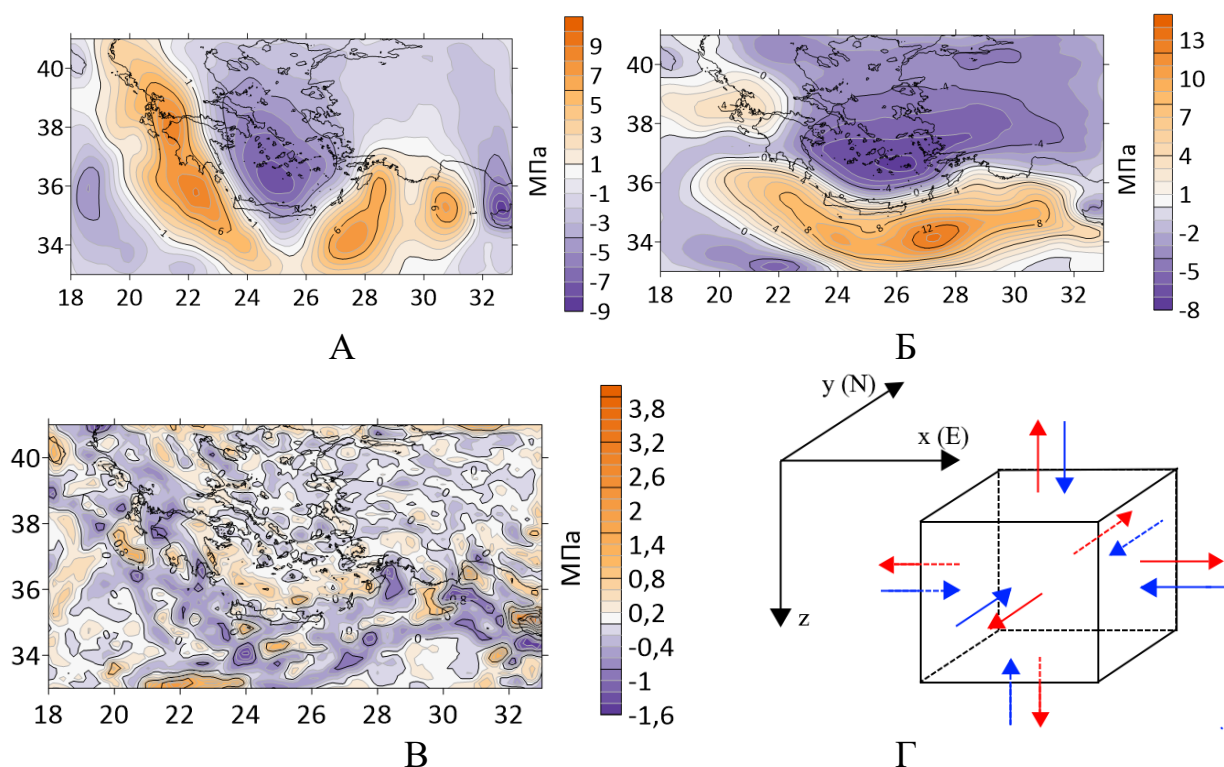


Рис. 4. Нормальные компоненты тензора напряжений на глубине 15 км, А - σ_{xx} ; Б - σ_{yy} ; В - σ_{zz} ; Г- схема нормальных напряжений, где синим цветом обозначены сжимающие напряжения (отрицательные), а красным- растягивающие (положительные)

Обсуждение

Результаты, полученные методом DEXP, были сопоставлены с моделью погружающейся плиты Slab2. Из сопоставления явствует, что изостатические аномалии вероятно обусловлены погружением плиты. При этом изменение плотности пород плиты с глубиной, как было установлено [8, 9], связано с метаморфическими преобразованиями при увеличении температуры и давления с глубиной: серпентинизацией на глубинах 30 – 50 км (с уменьшением плотности) и эклогитизацией на глубинах более 50 км, приводящей к существенному увеличению плотности.

Вычисленные нормальные компоненты тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы, описанные в работах [10,11,12]. В частности, области растяжения в проливе Коринф, проливе Китира-Антикитира, районах островов Карпатос и Родос, а также в Эллинских желобах согласуются с данными других авторов. Наблюдаемые несогласия (Средиземноморский хребет, Критское море) могут быть предварительно объяснены изгибом Нубийской плиты и переходом в мантию из-за аномально тонкой коры, или это может быть связано с тем, что не учтены касательные напряжения. Величины вычисленных нормальных компонент тензора напряжений достаточно большие, составляя более 20 – 30 % от оценок амплитуд напряжений,

обуславливающими спрединг [13, 14], для медленных событий скольжения в проливе Бунго [15] эффективные нормальные напряжения оценены в 18–45 МПа.

Заключение

Предложенный подход и полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности использования изостатических аномалий для расчета нормальных компонент тензора напряжений в активных субдукционных зонах. Основные выводы работы:

1) Изостатические аномалии Эллинской субдукционной зоны контролируются погружающейся литосферой, а не только рельефом или вариациями мощности коры.

2) Вычисленные нормальные компоненты напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz}) на глубине 15 км в целом отражают известные тектонические режимы растяжения/сжатия, описанные в работах [10,11,12].

3) Области согласия (Коринф, Китира-Антикитира, Карпатос, Родос, Эллинские желоба) подтверждают надежность расчетов, тогда как выявленные несогласия предварительно объясняются изгибом Нубийской плиты (Средиземноморский хребет) и переходом в мантию из-за тонкой коры (Критское море) либо отсутствием учета касательных напряжений..

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований рекомендуется: (1) учет касательных напряжений и полного тензора напряжений; (2) сравнение полученных полей с сейсмичностью и механизмами очагов землетрясений; (3) применение методики к другим субдукционным зонам; (4) усложнение использованной модели.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ FWZZ-2026-0051.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S. V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – B05411.
2. Shaw B. Active Tectonics of the Hellenic Subduction Zone. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 169 p.
3. Makris J., Papoulia J., Yegorova T. A 3-D density model of Greece constrained by gravity and seismic data // Geophys. J. Int. – 2013. – Vol. 194. – P. 1–17.
4. Hayes G. Slab2 - A Comprehensive Subduction Zone Geometry Model // U.S. Geological Survey : data release. 2018. DOI: 10.5066/F7PV6JNV.
5. Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., Schuh, H. ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. // Earth System Science Data – 2019 – Vol. 11 – PP. 647-674 – DOI: 10.5194/essd-11-647-2019.

6. Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid // *Physics* – 1936 – Vol. 7 – PP. 195-202.
7. Zhang, Cj., Fang, J. & Ma, Zj. Preliminary study on isostatic anomaly and recent tectonic stress field // *Acta Seimol. Sin.* – 2003 – Vol. 16 – PP. 34–41 – DOI: 10.1007/s11589-003-0004-y
8. Wada I., Wang K. Common depth of slab-mantle decoupling: Reconciling diversity and uniformity of subduction zones // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* – 2009 – Vol. 10 – No. 10 – Q10009–DOI: 10.1029/2009GC002570.
9. Wu H., Lei J., Jia Z., Sheng J., Zhu Y., Wang J. Numerical modeling the process of deep slab dehydration and magmatism // *Scientific Reports* – 2024 – Vol. 14 – 26684 – DOI: 10.1038/s41598-024-78193-w.
10. Lallemand S., Truffert C., Jolivet L., Henry P., Chamot-Rooke N., de Voogd B. Spatial transition from compression to extension in the Western Mediterranean Ridge accretionary complex // *Tectonophysics*. — 1994. — Vol. 234. — P. 33-52.
11. Veliz-Borel V., Mouslopoulou V., Nicol A., Begg J., Oncken O. Normal Faulting Along the Kythira-Antikythira Strait, Southwest Hellenic Forearc, Greece // *Frontiers in Earth Science*. — 2022. — Vol. 9. — 730806.
12. Chousianitis K., Sboras S., Mouslopoulou V., Choularias G., Hristopoulos D.T. The Upper Crustal Deformation Field of Greece Inferred From GPS Data and Its Correlation With Earthquake Occurrence // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2024. — Vol. 129. — e2023JB028004.
13. Ребецкий Ю.Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // *Геотектоника* – 2020 – № 6 – С. 3–24. – DOI: 10.31857/S0016853X20060119
14. Сафонов Д.А. Реконструкция поля тектонических напряжений глубокой части южного сегмента Курило-Камчатской и северного сегмента Японской зоны субдукции // *Geodynamics & Tectonophysics* – 2020 – Т. 11 – № 4. – С. 743–755 – DOI: 10.5800/GT-2020-11-4-0504
15. Sasagawa, Y., Sato, T. & Kobayashi, T. Estimating absolute values of effective normal stress during slow slip events in the Bungo Channel from slip velocities and shear stress variations. // *Earth Planets Space* – 2026 – DOI: 10.1186/s40623-026-02435-6

© *Р. Г. Горова, А. Н. Василевский, Е. И. Есин, 2026*