

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

© 2026 А.М. Петрищевский

*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия, 697016;
e-mail: petris2010@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.11.2025; после доработки 25.02.2026; принята в печать 27.03.2026

Сопоставлены гравиметрические карты аномалий Буге по данным наземных и морских наблюдений М 1 : 1 000 000 с гравитационными аномалиями в спутниковой сферической модели EGM08_SVA_global_2190_2.5m на территориях Охотского моря и левобережного Восточного Приамурья. Выполнена независимая вероятностно-детерминистская реологическая интерпретация гравитационных аномалий в двух системах их описания, в результате которой получены сопоставимые модели пространственных распределений плотностной дифференциации (контрастности) земной коры и подкоревой мантии, отображающие реологическое состояние геологических сред. В обеих моделях одинаково проявлены зоны пониженной вязкости, соответствующие региональным структурам растяжения в земной коре. Доказана применимость глобальной сферической гравитационной модели EGM08 для тектонической интерпретации региональных аномалий Буге в масштабе М 1 : 1 000 000.

Ключевые слова: наземные, морские, спутниковые гравитационные аномалии, Охотское море, Приамурье.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Глобальные гравитационные спутниковые модели (Land Gravity Data), используемые автором данной статьи для построения региональных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, покрывают всю поверхность нашей планеты по сети $0.0417^\circ \times 0.0417^\circ$ (EGM08_SVA_global_2190_2.5m) и по сети $0.0333^\circ \times 0.0333^\circ$ (WGM2012_Bouguer_ponc_2min). На северных широтах 52° – 60° они соответствуют сети 2.98×2.98 км (EGM08) и 2.38×2.38 км (WGM2012). Это примерно совпадает с сетью наземных гравиметрических съемок М 1 : 200 000.

На территории Российской Федерации (РФ) для моделирования глубинных структур земной коры и верхней мантии автором настоящей работы используются наземные и морские гравиметрические наблюдения в масштабе 1 : 1 000 000, обобщенные в (Государственная..., 2001).

Вне границ РФ с этой же целью автором используются данные глобальных гравитационных моделей производства Bureau Gravimetrique

International (BGI), Франция, которые включают все наземные и морские гравиметрические наблюдения и спутниковые (CHAMP, GRACE) измерения абсолютных значений гравитационного поля. Для вычисления аномалий Буге и Фая в моделях BGI используются модели геоида и земной поверхности (ETOPO1, Satellite Laser Ranging). Гравитационные аномалии преобразуются в сферические функции, описывающие аномальное гравитационное поле на поверхности Земли. Карты гравитационных аномалий представляются в прямоугольной (меркаторовской) системе координат.

Различными исследователями применяются и другие алгоритмы описания глобальных гравитационных аномалий. В частности, на территории РФ используются модели GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) (Ткаченко, Лыгин, 2017), Geosat и ERS-1 спутниковая альтиметрия (Кулинич, Валитов, 2011). В последнем случае показано, что определение мощности земной коры по данным спутниковой альтиметрии хорошо совпадает с результатами расчетов по морским

наблюдениям. На территории Вьетнама в целях повышения точности спутниковой альтиметрии использован метод коллокации наименьших квадратов в сопоставлении с результатами морских наблюдений (Дунг и др., 2019).

Целью настоящей работы является сопоставление аномальных полей и гравитационных реологических моделей в наземных и морских наблюдениях с глобальными гравитационными моделями BGI (EGM08 и WGM2012), использованными автором этой статьи в предшествующих публикациях. Сравниваются аномалии Буге и горизонтальные срезы плотностной контрастности (дифференциации) земной коры и подкоровой мантии в двух районах дальневосточной окраины России: левобережном Восточном Приамурье и Охотском море. Такая работа на территории РФ ранее не выполнялась и она сделана для того, чтобы обосновать применимость спутниковых аномалий Буге для изучения глубинного строения тектоносферы.

Аномалии плотностной контрастности земной коры, полученные по данным интерпретации морских и наземных гравиметрических наблюдений, приведены по опубликованным источникам (Петрищевский, 2004, 2016). Там же описана методика построения 3D пространственных распределений этих аномалий.

ОХОТСКОЕ МОРЕ

В Охотском море графики аномалии Буге в двух глобальных гравитационных моделях отличаются несущественно (рис. 1), однако они отличаются по уровню поля и амплитуде локальных гравитационных возмущений. После выравнивания уровней полей и осреднения графики аномалий обеих систем становятся совместимыми (рис. 1, нижний график).

Сопоставление гравиметрической карты (рис. 2а) и графиков (рис. 2б) морских и наземных аномалий Буге с гравиметрической картой Охотского моря, построенной по данным глобальной модели GEM-8 (рис. 2б), построенных в разных информационных системах, показывает, что они вполне согласуются между собой. Мелкие расхождения обусловлены несовпадениями точек регистрации аномального гравитационного поля в системах ГСК-2011 (косоугольная геодезическая система координат) на территории России и меркаторовской прямоугольной системы координат в сферической глобальной модели GEM-8.

Сопоставление моделей плотностной контрастности нижнего слоя земной коры, построенных в разных системах описания аномального гравитационного поля (рис. 3) показывает, что в обеих моделях похожим образом проявлены две зоны растяжения (минимумы плотностной кон-

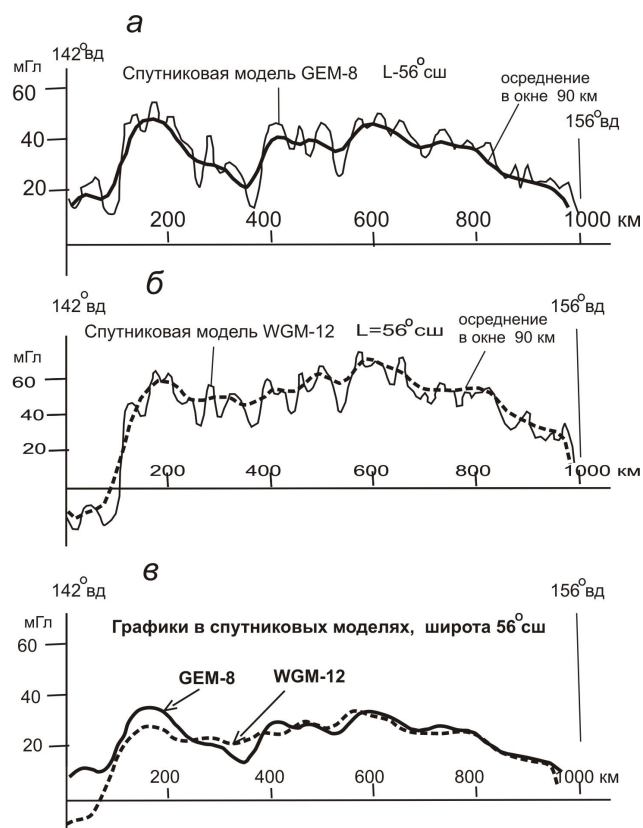


Рис. 1. Графики аномалий Буге в Охотском море: в спутниковых моделях GEM-8 (а) и WGM-12 (б); сопоставление графиков GEM-8 и WGM-12 (в).

Fig. 1. Bouguer gravity profiles in the Sea of Okhotsk: in model GEM-8 (a), in model WGM-12 (b); the graphic comparison GEM-8 and WGM-12 (в).

трастности). Первая, в слое 16–25 км от поверхности (рис. 3а, 3б) связана с конвергенцией Тихоокеанской и Охотоморской плит, а вторая, в слое 22–35 км (рис. 3в, 3е) — с конвергенцией Евразийской и Северо-Американской плит.

В слое 16–25 км одинаково картируется локальный минимум плотностной контрастности в северо-восточной части района, совпадающий с осадочным бассейном ТИНРО (рис. 3а, 3б) и сокращением мощности земной коры (рис. 3д). Минимум плотностной контрастности под бассейном ТИНРО совпадает с аномалией высокого теплового потока (800–900 мВт/м), а температура на глубине 30 км составляет 700–800 °С (Петрищевский, 2016). В разрезе 3–3 этот минимум разделяет континентальную окраину и Камчатскую композитную островную дугу (рис. 3е).

Теоретические основы и технология построения пространственных распределений плотностной контрастности геологического пространства подробно описаны в работах (Петрищевский, 2004, 2008, 2013, 2016). Плотностная контрастность является индикатором реологического состояния геологических сред (Петрищевский, 2008, 2013, 2016). 3D-модели этого параметра

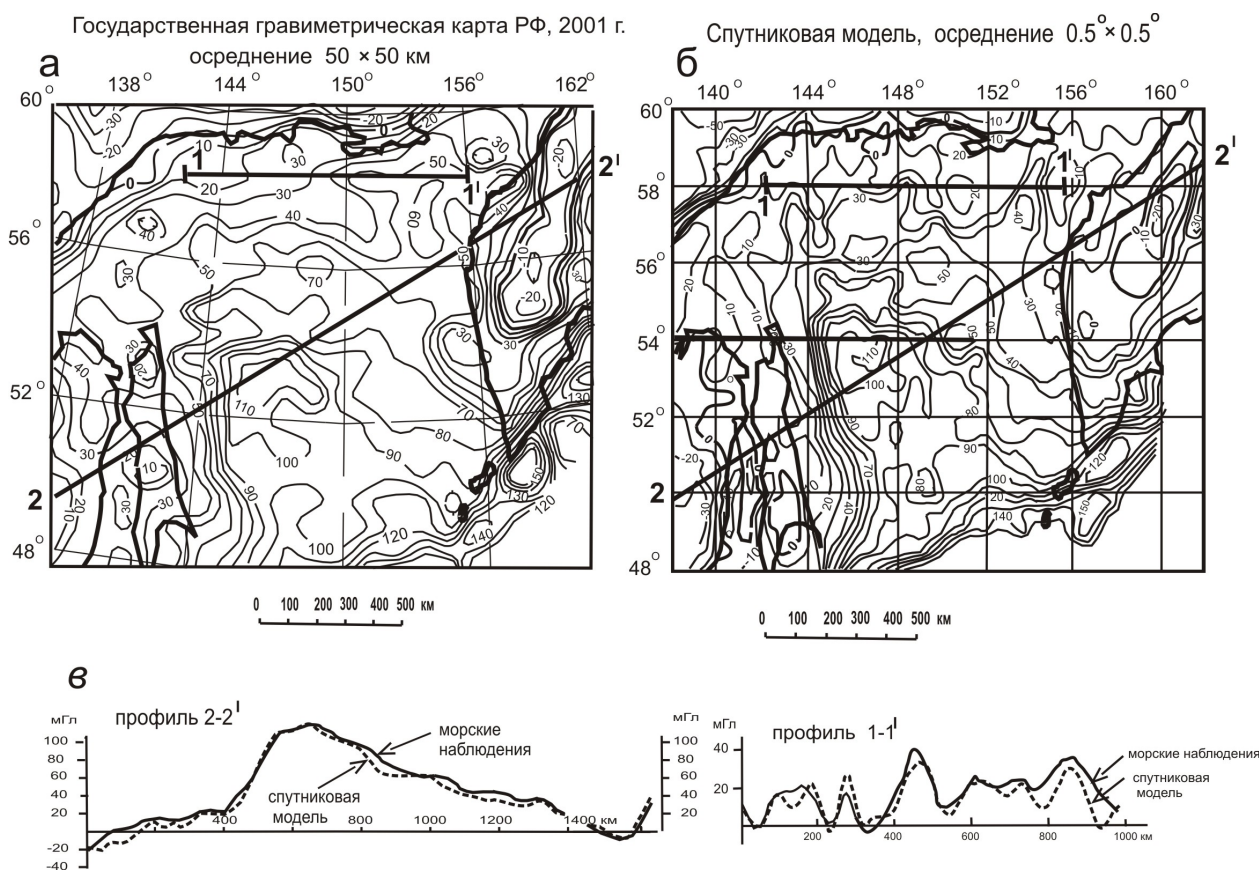


Рис. 2. Гравиметрические карты аномалий Буге по морским наблюдениям (а) и в спутниковой модели (б) с графиками аномалий (в) в Охотском море.

Fig. 2. Bouguer gravity maps by the sea observations (a) and satellite model (б) with gravity anomaly profiles (в) in the Sea of Okhotsk.

конструируются без привлечения внешней геолого-геофизической информации.

Трансформированные гравитационные аномалии в модели GEM8 существенно менее детально отображают плотностную дифференциацию исследованного геологического пространства. Однако, кроме района впадины ТИПРО, в срезе 3D модели плотностной контрастности на глубине 15 км одинаково отображаются максимумы в северной, юго-западной и юго-восточной частях района и минимум СВ-ЮЗ простирания (рис. 3а, 3б).

ВОСТОЧНОЕ ПРИАМУРЬЕ

В Восточном Приамурье гравитационные аномалии по наземным наблюдениям (рис. 4а) и в сферической глобальной модели GEM8 (рис. 4б) удовлетворительно совпадают, хотя и различаются по абсолютным значениям. Графики аномалий Буге в относительном уровне по широте 52° тоже согласуются между собой (рис. 4г).

Восточное Приамурье характеризуется очень сложным геологическим строением. На его территории пространственно сопряжены

разновозрастные (AR–MZ) складчатые и метаморфические комплексы (рис. 5а, 5б). Этот район представляет собой узел сочленения архейско-протерозойских, палеозойских и мезозойских тектонических структур: архейско-протерозойских Туранского и Мамынского блоков, палеозойской Монголо-Охотской складчатой системы и близкого по возрасту Сулукского блока, юрско-меловых Удского и Буреинского наложенных прогибов. С востока к району примыкают мезозойские складчатые комплексы Сихотэ-Алиня. Юго-западная часть района перекрыта кайнозойским чехлом Амура-Зейской впадины. Удовлетворительное гравитационное моделирование глубинных геологических структур возможно здесь только в приповерхностном слое земной коры, где локальные гравитационные модели идентифицируются с локальными прогибами и выступами древнего фундамента, либо гранитоидными массивами.

Вероятностно-детерминистские гравитационные реологические модели земной коры и верхней мантии, построенные независимо друг от друга по разным источникам описания гравитационных аномалий и без внешней априорной информации (рис. 6), показывают их очевидное сходство.

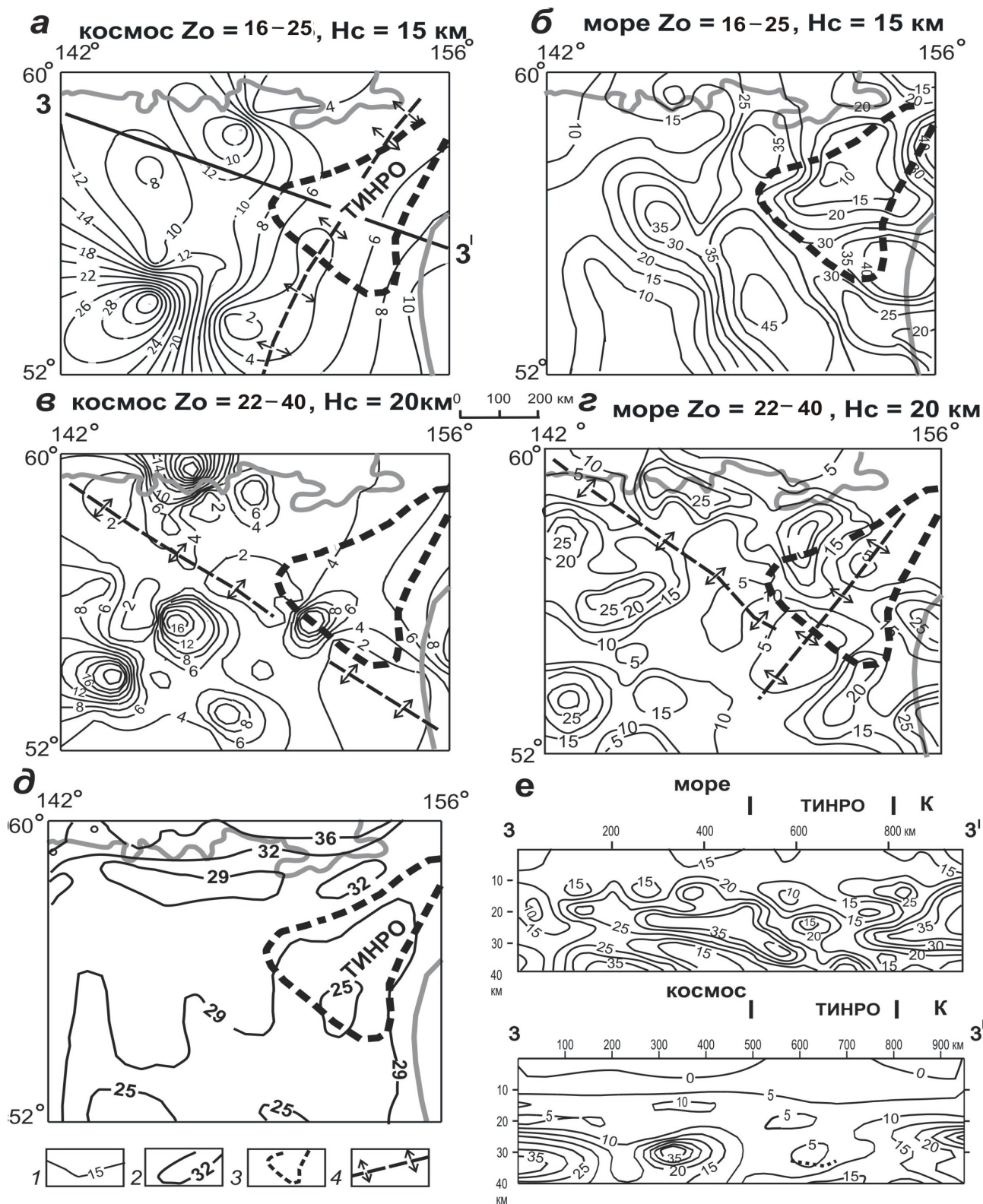


Рис. 3. Плотностная контрастность нижнего слоя земной коры в спутниковой (а, в) и морской (б, г) моделях, мощность земной коры (д) (Структура..., 1996); и разрезы 3D моделей плотностной контрастности (е) в Охотском море. 1 — изолинии плотностной контрастности, 10^{-2} кг/м²/км; 2 — изопакиты мощности земной коры, км; 3 — контуры осадочного бассейна ТИНРО по изопакиту 5 км (Структура..., 1996); 4 — оси зон растяжения.

Fig. 3. Density contrast of the lower crust layer from satellite (a, v) and sea (b, g) models; the crust thickness (d) (Structure..., 1996); sections of 3D density contrast models (e) in the Sea of Okhotsk. 1 — isolines of density contrast (10^{-2} kg/m²/km); 2 — the crust thickness, km; 3 — counter of the ТИНРО basin by the 5 km sediment thickness (Structure..., 1996); 4 — axis of a extensional zones.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

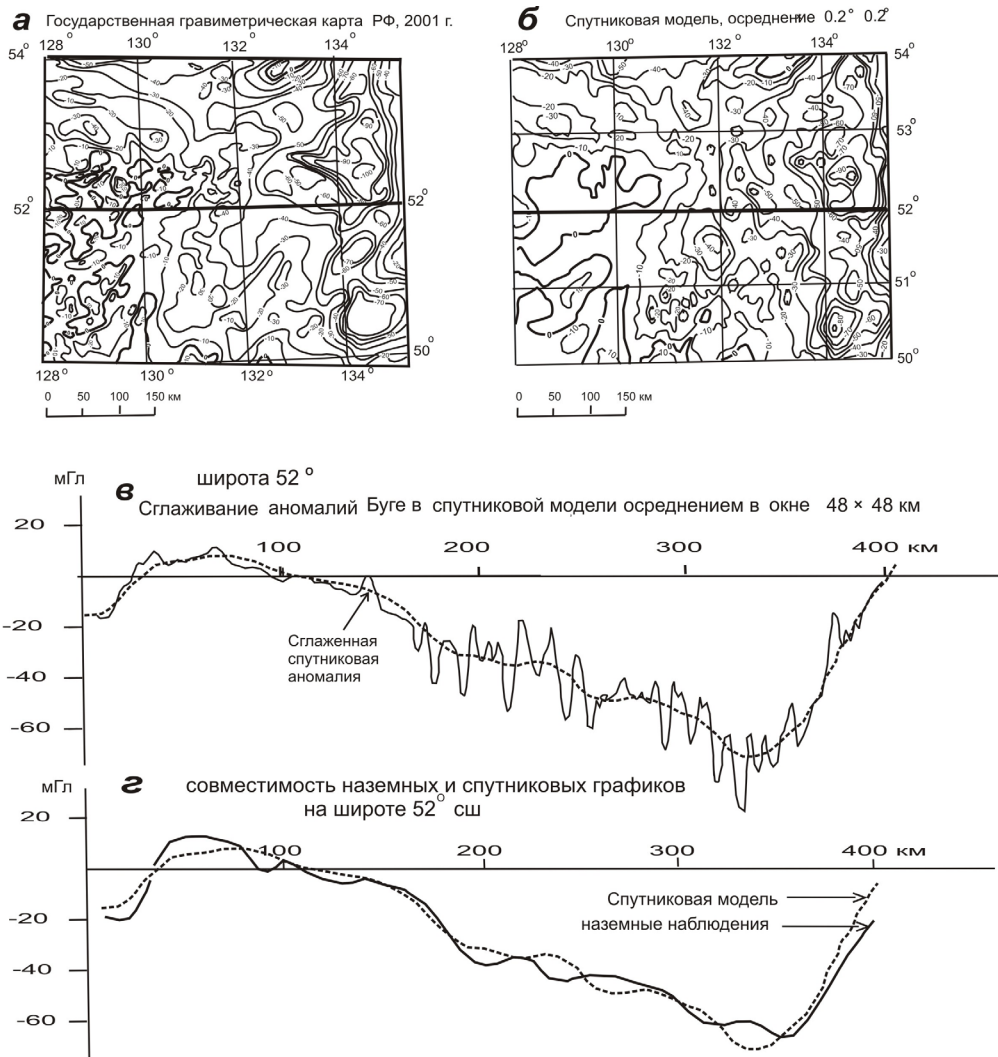


Рис. 4. Гравиметрические карты аномалий Буге по наземным наблюдениям (а) и в спутниковой модели (б) с графиками аномалий (в, з) в Восточном Приамурье.

Fig. 4. Bouguer gravity maps by the Earth's observations (a) and satellite model (b) with gravity anomaly profiles (v, z) in the Eastern Amur region.

В обеих моделях центральной структурой является зона растяжения, разделяющая AR–PR структуры на западе и палеозойский Сулукский блок на востоке. Обе модели предполагают продолжение Сулукского блока на север под Моголо-Охотскую складчатую систему. Зона растяжения прослеживается в подкорковой мантии (рис. 6б, 6в) и на южном отрезке совпадает с наложенным Буреинским прогибом на поверхности. Земная кора в зоне растяжения сокращена на 4–6 км (Геодинамика..., 2006; Глубинное..., 2010), а подкорковая мантии разуплотнена (Глубинное..., 2010).

В разрезах обеих моделей (GEM8 и наземной) зона растяжения одинаково сопровождается уменьшением плотностной контрастности (рис. 6в, 6з), при этом в этих разрезах одинаково отображается различная глубина залегания жестких тектонических масс (максимумов плотностной контрастности) в архейском на западе и палеозойском на востоке блоках. Архейско-про-

терозойское основание Сулукского палеозойского блока располагается на 9–10 км глубже, чем в Туранском (рис. 6в, 6з). В спутниковой модели вертикальная мощность зоны низкой плотностной контрастности охватывает практически всю земную кору, а в наземной модели — только гранитно-метаморфический слой до глубины 25 км (рис. 6в). В спутниковой модели отражен выступ Северо-Азиатского кратона на севере района (рис. 6б), который не виден в наземной модели (рис. 6а). Отмеченные расхождения объясняются различной детальностью регистрации аномалий силы тяжести: в наземной модели она соответствует съемке М 1 : 1 000 000, а в спутниковой модели — примерно М 1 : 200 000.

Тем не менее, обе рассмотренные модели (рис. 6 а–з) в главных чертах находят подтверждение в сейсмических и теплофизических данных (рис. 6д, 6е). В сейсмической модели зона растяжения сопровождается понижением скорости

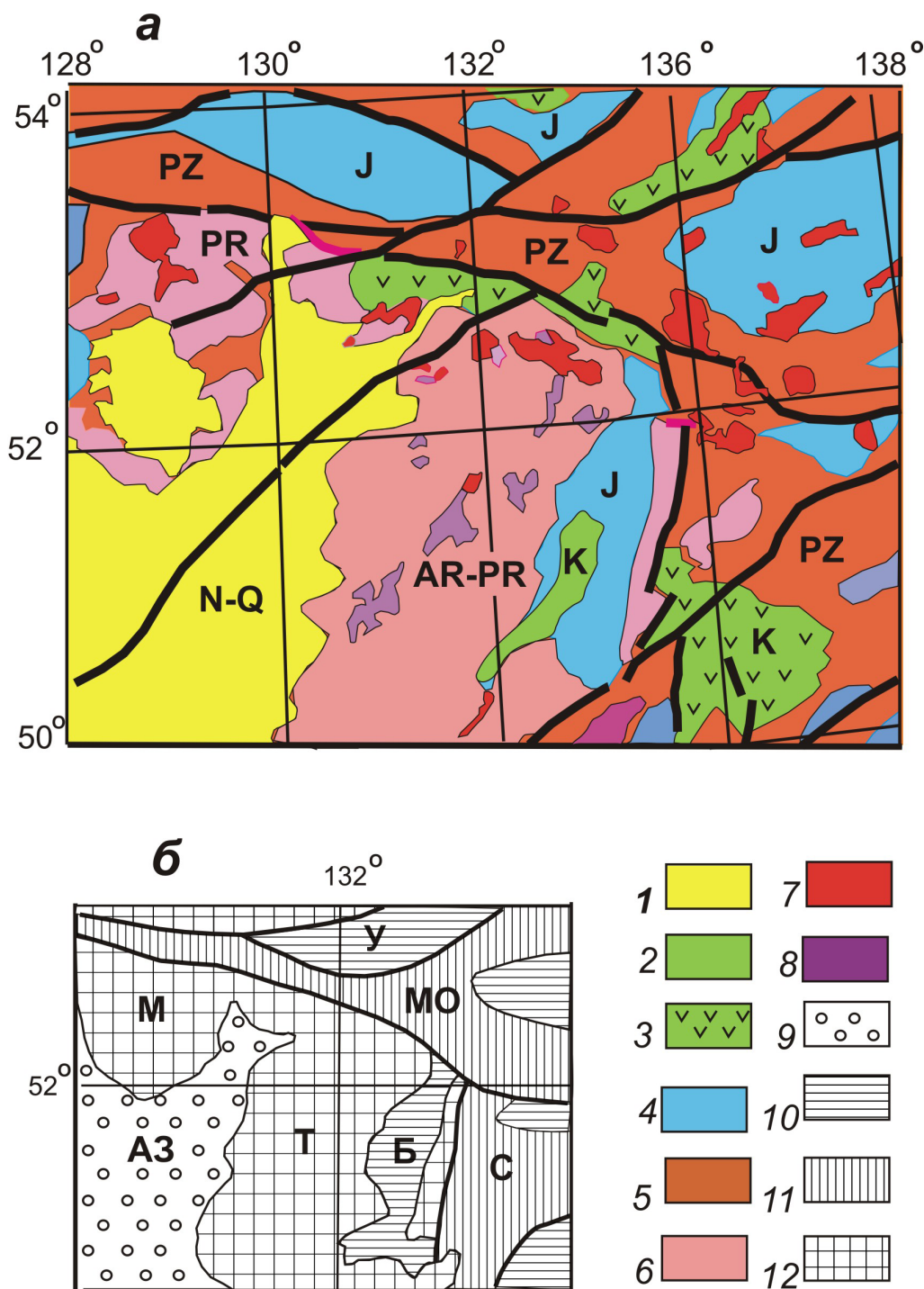


Рис. 5. Геологическая карта (а) (Геологическая..., 1999) и тектоническая схема (б) (Karsakov, Zhao, 2001) Восточного Приамурья. На геологической карте: 1-6 — тектонические комплексы: кайнозойские (1), поздне-мезозойские осадочные (2), меловые вулканиты (3), юрские (4), палеозойские (5), архейско-протерозойские (6); 7-8 — гранитоиды: палеозойские (7), архейско-протерозойские (8). Структуры на тектонической схеме: 9 — кайнозойские, 10 — мезозойские, 11 — палеозойские, 12 — архейско-протерозойские. Обозначения структур: кратонные блоки Т — Туранский, М — Мамынский; С — Сулукский палеозойский блок; МО — Монголо-Охотская складчатая система; поздне-мезозойские осадочные бассейны: Б — Буреинский, У — Удский; 3Б — Зее-Буреинский осадочный бассейн.

Fig. 5. Geological map (Геологическая..., 1999) (а) and tectonic scheme (Karsakov, Zhao, 2001) (б) in the Eastern Amur region. On geological map: 1-6 — tectonic strata: Cenozoic (1), sediment Late Mesozoic (2), Cretaceous volcanics (3), Jurassic (4), Paleozoic (5), Archean-Proterozoic (6); 7-8 — granites: Paleozoic (7), Archean-Proterozoic (8). Structures on tectonic scheme: 9 — Cenozoic, 10 — Mesozoic, 11 — Paleozoic, 12 — Archean-Proterozoic. Designations of structures: the craton type blocks: Т — Turanian, С — Suluk, MO — Mongolo-Okhotskaya fold System; sediment basins: Б — Bureinskiy, У — Udskiy; 3Б — Zee-Bureinskiy.

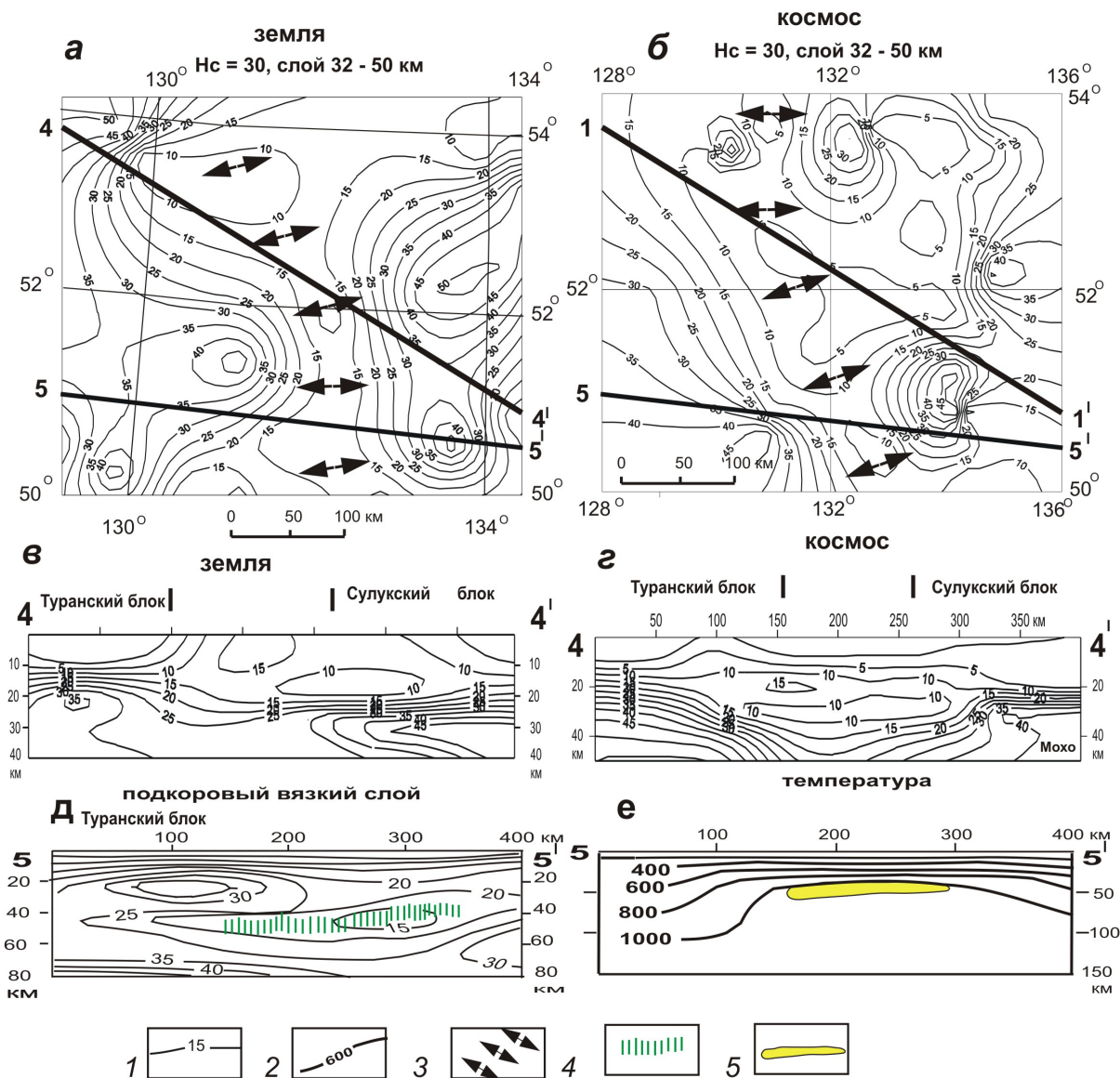


Рис. 6. Плотностная контрастность переходного слоя кора-мантия в Восточном Приамурье в наземной (а, в) и спутниковой (б, г) моделях; скорость сейсмических волн (д) (Потапьев, 1977) и температура (е) (Тектоносфера..., 1992) в разрезах. 1–2 — изолинии плотностной контрастности, 10^{-2} кг/м²/км (1) и температуры, °С (2); 3 — зона растяжения; 4–5 — зоны пониженной скорости сейсмических волн (4) и частичного плавления (5).

Fig. 6. Density contrast of the crust-mantle transitional layer in the Eastern Amur River Region in Earth's (a, v) and satellite's (б, г); velocity of seismic waves (д) (Потапьев, 1977) and temperature (е) (Тектоносфера..., 1992) in sections. 1–2 — isolines of density contrast, 10^{-2} kg/m²/km (1) and temperature, °C (2); 3 — stretching zone; 4–5 — zones of lower velocity of seismic waves (4) and partial melting (5).

сейсмических волн в подкоровом вязком слое (рис. 6д), а в теплофизической модели в зоне растяжения установлено резкое приближение температурной аномалии 1000 °С до глубины 50 км от поверхности (рис. 6е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение глобальной гравитационной сферической модели (EGM08_SVA_global_2190_2.5m) с наземными и морскими гравиметрическими наблюдениями доказывает

удовлетворительную степень подобия в отображении гравитационных аномалий и совместимость моделей глубинных структур земной коры и подкоровой мантии.

Гравитационные реологические модели, независимо представляемые 3D распределениями плотностной контрастности геологического пространства без вспомогательной априорной информации, в обеих системах одинаково отображают области высокоплотных тектонических масс и зоны растяжения в земной коре и подкоровой мантии.

Реологическая дифференциация геологического пространства в обеих моделях находят подтверждение в тектонических, сейсмических и теплофизических данных.

Работа выполнена в соответствии с темой научных исследований, утвержденной государственным заданием Министерства науки и высшего образования: «Общие закономерности и региональные особенности экологии, геологии, глубинного строения, реологии, палеогеодинамики и металлогении тектоносферы Восточной Азии в сравнении с Дальневосточным регионом России (2024-2026)» (№ гос. регистрации FWUG-2024-0004 / 1021062311240-7-1.5.6;1.5.5.1).

Список литературы [References]

- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. А.И. Ханчук. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с. [Geodynamics, magmatism and metalllogeny of the Eastern Russia / Ed. A.I. Khanchuk. V. 1. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 572 p. (in Russian)].
- Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1:2500000 / Гл. редакторы: Л.И. Красный, Пэн ЮньБяо. Л.: ВСЕГЕИ, 1999. 3 л. с объяснит. запиской 135 с. [Geological map of the Amur River Region an adjacent territories. Scale 1:2500000 / Ed. Krasniy L.I. Ptn YunByao. Leningrad: VSEGEI, 1999. 3 lists with explanation, 135 p. (in Russian)].
- Государственная гравиметрическая карта Российской Федерации. М:12500000. М.: ЦНИИГАиК, 2001 [State gravity map of the Russian Federation. Scale 1:2500000. Moscow: Central Sci. Institute of Geodesy, Aerial Photography and Mapping, 2001 (in Russian)].
- Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. Мощность и типы земной коры Японского моря по данным морской и спутниковой гравиметрии. Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 6. С. 3–13 [Kulinich R.G., Valitov M.G. Thickness and the crust types of the Sea of Japan from data of sea and satellite gravity measurements. Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 30. № 6. P. 3–13 (in Russian)].
- Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с. [Deep structure and metallogeny of the Eastern Asia. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 332 p. (in Russian)].
- Петрищевский А.М. Гравитационная неоднородность земной коры и верхней мантии Приамурья (пространственно-статистические модели) // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 1. С. 20–36 [Petrishchevsky A.M. Gravity inhomogeneity of the crust and upper mantle of Priamurie (space- stastisnic gravity models. Russian Journal of Pacific Geology. 2004. T. 23. № 1. P. 20–36 (in Russian)].
- Петрищевский А.М. Вязкий слой на границе корамантия (Дальний Восток) // Геотектоника. 2008. № 5. С. 37–48 [Petrishchevsky A.M. A viscous layer at the crust-mantle boundary in the Far East of Russia// Geotectonics. 2008.V. 45. № 5. P. 357–367].
- Петрищевский А.М. Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии // Геотектоника. 2013. № 6. С. 60–83 [Petrishchevsky A.M. Gravity models of the two-level collision of lithospheric plates on the North East Asia // Geotectonics. 2013. V. 47. № 5. P. 465–484].
- Петрищевский А.М. Реологическая и геотермическая характеристики Охотоморского плюма // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2016. Т. 327. № 2. С. 65–76 [Petrishchevsky A.M. Rheological and geothermic characteristics of the Sea of Okhotsk plume // Bulletin of the Tomsk Polytecnic University. 2016. V. 327. № 2. P. 65–76 (in Russian)].
- Потатьев С.В. Авиасейсмические исследования земной коры. М.: Наука, 1977. 169 с. [Potap'ev S.V. Aeroseismic studies of the crust. Moscow: Nauka, 1977. 169 p. (in Russian)].
- Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона. Результаты исследований по международным геофизическим проектам / ред. Родников А.Г. М.: РАН. Национальный геофизический комитет, 1996. 337 с. [Structure and dynamics of the lithosphere and astenosphere of the Sea of Okhotsk Area. Results of researches on international geophysical projects / Ed. Rodnikov A.G. Moscow: RAN. National geophysical committee, 1996. 337 с. (in Russian)].
- Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. Владивосток: ДВО РАН, 1992. 238 с. [Tectonosphere of the Asian margin. Vladivostok: Far East Branch of Russian Academy of Science. 1992 с. (in Russian)].
- Ткаченко Н.С., Лыгин И.В. Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестник МГУ. 2017. Серия Геология. № 2. С. 3–7 [Tkachenko I.S, Lygin I.V. Using of satellite mission GRACE for decision of geological and geographic tasks. Bulletin of the Moscow University. 2017. Ser. Geology. № 2. P. 3–7 (in Russian)].
- Дунг Ч.Т., Кулинич Р.Г., Санг Н.В. и др. Повышение точности гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии, для исследования геологической структуры континентального шельфа Южного и Центрального Вьетнама // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 4. С. 62–73 [Dung T.T., Kulinich R.G., Sang N.V. et al. Improving accuracy of altimeter-derived marine gravity anomalies for geological structure research in the Vietnam south and central continental shelf and adjacent areas. Russian Journal of Pacific Geology. 2019. V. 13. №. 4. P. 364–374].
- Karsakov L.P., Zhao C.(2001). Tectonic map of the Central Asian – Pacific Belts Junction Area. Scale 1:1500000. Khabarovsk-Shunjing.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
**USING OF GLOBAL GRAVITY MODELS FOR MODELLING OF RHEOLOGIC
IN HOMOGENEITIES IN THE CRUST AND UPPER MANTLE**

A.M. Petrishchevsky

Institute of Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS, Birobidzhan, Russia, 697016

Received December 23, 2025; revised February 25, 2026; accepted March 27, 2026

Gravity maps of Bouguer anomalies according to land and sea observations of scale 1,000,000 are compared with gravity anomalies in the satellite spherical EGM08_CBA_global_2190_2.5m model in territories of the Sea of Okhotsk and left-bank East Priamurye. Independent probabilistic-deterministic rheological interpretation of gravity anomalies in two systems of them description as a result of which the comparable models of spatial distributions of density differentiation (contrast) of the crust and a subcrustal mantle layers reflecting rheological states of geological media are received are executed. In both models rigid crystal blocks in the lower crust and zones of the lowered viscosity dividing them, corresponding to regional structures of stretching in the crust and subcrustal layers equally are reflected. The applicability of global spherical gravity EGM08 model for tectonic interpretation of regional anomalies Bouguer in scale M 1:1 000 000 is proved.

Keywords: land, sea, satellite gravity anomalies, Sea of Okhotsk, Priamurye.