

*В. Ю. Тимофеев<sup>1</sup>✉, Д. Г. Ардюков<sup>1</sup>, А. В. Тимофеев<sup>1</sup>, Д. Н. Голдобин<sup>2</sup>*

## **Модели строения Монголо-Байкальского региона по данным спутниковых гравиметрических миссий**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

E-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрено глубинное строение земной коры для территории южной части Сибири России, Монголии и северо-западной части Китая от 43°N на юге до 61°N на севере и от 88°E на западе до 120°E на востоке. Построение положения границы Мохо выполнено с использованием спутниковой модели геопотенциала EIGEN-6C4, модели рельефа EARTH-2014, данных наземных гравиметрических измерений и известных сейсмических материалов. Интерпретация проводилась в рамках двухслойной модели кора-мантия при разности плотностей  $0.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Мощность земной коры для исследуемой территории изменяется от 35 км для Байкальских впадин, до 60 км, в районе Монгольского Алтая и Хангая. Ошибка определения глубины поверхности Мохо составляет от 2 км до 4 км. Наиболее контрастная часть исследуемой территории расположена на юго-западной части территории в зоне сочленения отрогов Тянь-Шаня (высоты до 4925 м) и Турфанской впадины (-155 м). Здесь мощность коры, по нашим оценкам, местами достигает 70 км.

**Ключевые слова:** гравиметрические модели, аномалии Буге, граница Мохо, Гоби-Алтай, Байкальский рифт, Сибирская платформа

*V. Yu. Timofeev<sup>1</sup>✉, D. G. Ardyukov<sup>1</sup>, A. V. Timofeev<sup>1</sup>, D. N. Goldobin<sup>2</sup>*

## **Models of Mongolia-Baikal region by space gravity mission data**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** Structure of earth crust for the territory extending from 43° to 61° north latitude and from 88° to 120° east longitude, covering south Siberia - Russia, Mongolia and south-western part of China. Position of Moho boundary constructed using data from satellite gravimetric missions as EIGEN-6C4 geopotential model with EARTH-2014 relief model, the results of ground-based gravity measurements and seismic data. Interpretation was developed in frame of two-layers model crust-mantle with density contrast  $0.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Research has shown that the depth of the Moho boundary varied from 35 km for Baikal to 60 km for Mongolian Altai and Hangai. Error of estimation vary from 2 km to 4 km. More contrast part of territory situated at south-west where Tian-Shan range (up to 4925 meters) connected with Turfan gully (-155 meters). There the thickness of the crust is maximum near 70 km.

**Keywords:** gravity models, Bouguer anomalies, Moho boundary, Gobi Altai, Baikal rift, Siberian platform

## ***Введение***

Сибирская платформа и расположенный южнее Монголо-Сибирский складчатый пояс, включающий Байкальскую рифтовую систему и западную часть Амурской тектонической плиты, имеют интересную геологическую историю, отличаются сейсмической активностью и являются предметом активного изучения современными методами геофизики [1-9]. В последние десятилетия появились новые оригинальные данные, полученные в ходе спутниковых гравиметрических миссий и многочисленные модели гравитационного потенциала Земли, что предоставляет новые возможности для геофизического изучения региона. Гравитационные модели, построенные по спутниковым данным, широко используются для изучения глубинной структуры Земли, в частности, структуры земной коры.

Задача нашей работы показать возможности спутниковых гравитационных миссий при построении гравитационного поля Земли, моделировании пространственного распределения границы Мохо для Монголо-Байкальского региона, на территории, простирающейся от 43 до 61 градуса северной широты и от 88 до 120 градуса восточной долготы, выделяющейся различным геологическими объектами (Сибирская платформа, Байкальский рифт, Алтай, Хангай и другие), сравнить и оценить результаты с известными материалами, полученными сейсмическими и гравиметрическими методами.

### ***Спутниковые миссии и модели гравитационного поля***

Современная эпоха спутниковых гравиметрических миссий стартовала в начале двухтысячных годов. С космодрома Плесецк (Россия), начиная с 2000 года, запущены последовательно спутники миссии CHAMP, миссии GRACE и спутник миссии GOCE. Спутники гравиметрических миссий GRACE и GOCE имеют высоту орбиты 260 км, 500 км и CHAMP (450 км – 300 км). Чем ниже высота полета спутников, тем точнее результаты измерений. Пространственное разрешение моделей зависит от максимальной степени разложения потенциала, так для высокостепенных моделей (степень от 2000 до 5000) оно составляет от 5 км до 12 км. Из современных моделей гравитационного поля отметим модели EGM2008 и EIGEN-6C4. По результатам тестирования многими авторами, модель EGM2008, созданная в 2008 году, до настоящего времени считается опорной для дальнейших вычислений характеристик глобального гравитационного поля Земли (Таблица 1). Тестирование моделей проводилось, используя данные наземных гравиметрических пунктов 1-4 класса, расположенных на территории Новосибирской области. Использована глобальная топографическая модель рельефа EARTH-2014 [10]. Оценки аномалии в свободном воздухе, по данным для Новосибирской области (27 пунктов), показали минимальное расхождение (3,44 мГал) модельных и наземных данных для модели EIGEN-6C4. Остальные высокостепенные модели подобны, но отличаются небольшими расхождениями (от 5 мГал до 9 мГал).

**Таблица 1.** Модели глобального геопотенциала, составленные по комплексу данных: S – данные спутниковые гравиметрических миссий, G – данные наземных гравиметрических измерений, A – данные альтиметрических измерений, Т – топография

| Номер | Модель        | Год создания | Максимальная степень разложения | Исходные данные, методы                    |
|-------|---------------|--------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| 1     | EGM2008       | 2008         | 1845                            | A, G, S (GRACE)                            |
| 2     | EIGEN-6C4     | 2014         | 2190                            | A, G, S (GOCE), S(GRACE), S (Lageos)       |
| 3     | GECO          | 2015         | 2190                            | EGM2008, S (GOCE)                          |
| 4     | GOCO05C       | 2016         | 720                             | A, G, S                                    |
| 5     | XOM2016       | 2017         | 719                             | A, G, S (GOCO05S)                          |
| 6     | SGG-UGM-1     | 2018         | 2159                            | EGM 2008, S (GOCE)                         |
| 7     | XGM2019e      | 2019         | 5540                            | A, G, S (GOCO06s), T                       |
| 8     | XGM2019e 2190 | 2019         | 2190                            | A, G, S (GOCO06s), T                       |
| 9     | XGM2019       | 2019         | 760                             | A, G, S (GOCO06s)                          |
| 10    | SGG-UGM-2     | 2020         | 2190                            | A, EGM 2008, S (GOCE), S (Grace)           |
| 11    | GOCO2025s     | 2025         | 300                             | S (GOCE), S (GRACE), S (Lageos), S (Champ) |

Используя данные по 48 пунктам России, расположенным в европейской части, на юге Сибири и Дальнего Востока, для модели EIGEN-6C4 получено отклонение 5,24 мГал, что оказалось также лучшим результатом [11-14]. Дополнительно проверка модели проводилась на шести пунктах, расположенным в Алтае-Саянской горной области. Согласно инструкции по оборудованию гравиметрических пунктов, средняя квадратическая погрешность определений ускорения силы тяжести на фундаментальных гравиметрических пунктах и исходных (главных) гравиметрических пунктах абсолютным методом, не должна превышать 0,008 мГал. Ошибка определений на пунктах Алтая составляла 0.001-0.002 мГал. Используя данные, полученные с помощью абсолютного гравиметра ГАБЛ и двухчастотных приёмников космической геодезии TRIMBLE, для разности экспериментальных и модельных значений отклонение составило  $3,6 \pm 2,9$  мГал [15]. Сравнение для трёх пунктов Байкальского региона, где, как и в Алтае-Саянском регионе, многолетние измерения на пункте выполнялось с помощью гравиметра ГАБЛ различных модификаций и двухчастотных приёмников космической геодезии, показало отклонение в  $5,8 \pm 3.3$  мГал, что обусловлено точечным характером измерений на пунктах. В результате построена карта аномалий Буге, по гравиметрической модели EIGEN-6C4 и топографической модели EARTH-2014, с учетом топографической поправки. Для расчётов выбрана плотность промежуточного слоя  $2.67 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, для воды в озёрах плотность 1.0 кг/м<sup>3</sup>. Если правильно определена средняя плотность промежуточного слоя, то аномалия Буге - это аномальное поле, отражающее на 95% пространственное распределение мощности земной коры, при однородной модели с увеличением плотности с глубиной. Отрицательные аномалии Буге выше

200 мГал зарегистрированы в области нагрузки на земную кору крупных форм рельефа. Мелкие формы рельефа с горизонтальными размерами от 10 до 100 километров не вызывают прогиба коры и не приводят к аномалиям Буге. Аномалии в свободном воздухе связаны с расчлененностью рельефа в зоне хребтов с малыми горизонтальными размерами. Контуры озера Байкал хорошо проявляется в аномальных полях Буге и в свободном воздухе. Изменение высоты рельефа, аномалии в свободном воздухе и Буге по профилю в 2000 км с юга на север по долготе 100 градусов от 43 до 61 градуса северной широты показаны на Рис. 1. На графике на широте 53.5 градуса отлично проявляется Главный Саянский Разлом - граница Сибирской платформы и расположенных южнее горных районов.



**Рис. 1.** Профиля с юга на север по долготе 100 градусов от 43 до 61 градуса широты. На графиках сверху вниз: рельеф в метрах; аномалия в свободном воздухе и Буге в мГал.

### *Определение положения границы Мохо*

Технология решения обратных задач гравиметрии рассматривается во многих работах. [16, 17]. В работе [18] для определения параметров слоя предложена аналитическая модель, описывающая корреляционные функции стохастических потенциальных полей через геометрические параметры носителя масс. В статье [19] описывается технология решения обратной структурной задачи гравиметрии на основании комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных. В этом случае способ решения основан на модифицированном методе локальных поправок. Известна классическая задача о контактной поверхности. Контактная поверхность разделяет две среды с различной плотностью, а это может быть и граница кора-мантия. Известно нелинейное интегральное уравнение для аномалии от контактной поверхности, которое имеет множество решений. Следовательно, требуется определить математическую постановку задачи, чтобы получить приближенное решение. На практике это выполняется, используя различные предположения о положении контактной поверхности. Например, в работе [20, 21] при построении моделей GEMMA принято, что глобальная гравитационная инверсия заключается в аппроксимации с использованием сферических координат: широты, долготы и радиуса Земли. Согласно такому подходу,

отклонение поверхности Мохо может определяться, как неровность поверхности относительно базовой сферы радиусом  $R$ . Это означает, что отклонение поверхности Мохо -  $D(\theta, \lambda)$  относительно радиуса  $R_E$  можно записать как:

$$D(\theta, \lambda) = R_E - [R + \delta R(\theta, \lambda)] = D - \delta R(\theta, \lambda), \quad (1)$$

где  $\delta R(\theta, \lambda)$  вариации поверхности Мохо и  $D$  глубина до референц-сферы.

Авторы работы [20, 21], используя информацию по спутниковой миссии GOCE, дополняют её данными о границе Мохо, представленной моделями CRUST-2.0 или CRUST-1.0, созданными по сейсмологическим материалам [22, 23, 24]. Таким образом, имея данные о границе Мохо на отдельном участке и карту гравитационных аномалий, задача о контактной поверхности для региона может быть решена. В вычислениях используем средние значения плотности для каждого слоя, при этом, в коре плотность монотонно возрастает с глубиной. В двухслойной модели при одной поверхности раздела используем приближенное соотношение для глубины Мохо:

$$z = z_0 + (\Delta g - \Delta g_0) / (2\pi \cdot G \cdot \Delta \sigma), \quad (2)$$

где  $\Delta g_0$  и  $\Delta g$  – аномалии Буге, над реперной точкой и точкой, лежащей на глубине  $z$ ;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – средние плотности пород выше и ниже раздела соответственно,  $\Delta \sigma$  разность плотностей слоёв,  $z_0$  и  $z$  – глубины залегания поверхности раздела на реперной точке и в точке, где оценивается глубина поверхности раздела коры и мантии.

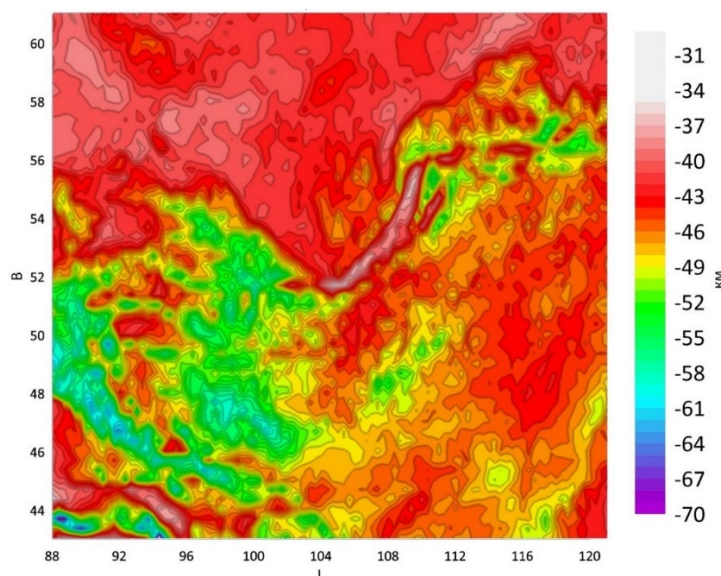


**Рис. 2.** Карта глубин поверхности Мохо в км, построенная по гравиметрическим данным.

Выбор параметров, используемых при вычислениях, проводился на основе результатов сейсмических работ на юге Западной Сибири и Горном Алтае [25,

26]. Ещё одна оценка параметров по материалам исследований методом ГСЗ, выполнена с использованием данных по профилю РИФТ на юге Сибирского кратона, полученных при мирных ядерных взрывах [27], на самой юго-восточной его части, от точки с координатами 58°N-102°E до точки 54°N-104°E, средняя глубина поверхности Мохо здесь составляет 42 км. Средние значения аномалии Буги по модели EIGEN-6C4 достигают - 40 мГал. Известно, что аномалии Буге на суше конформны пространственному распределению границы Мохо. В общем случае существует линейная связь между мощностью коры  $M$  и величиной аномалий Буге  $Ag_B$ , для суши:  $M = M_0 + K \cdot Ag_B$ , что соответствует соотношению (2) [28]. Используя соотношение (2) и данные по аномалиям Буге при разности плотностей на контакте  $0.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  построена карта глубины поверхности Мохо (Рис. 2). Авторами работ [20, 21] предложено использовать на отдельных участках другие разности, таким образом в дальнейшем можно оценки приближать к профильным сейсмическим результатам. Ошибку построения модели поверхности Мохо, учитывая сферичность Земли и приближенный характер вычислений можно оценить в 2 км - 4 км в разных частях исследуемой территории.

### Заключение

Карта мощности земной коры на территории от 43 градуса до 61 градуса широты и от 88 градуса до 120 градуса долготы, представленная на рисунках (Рис. 2), показывает большой контраст в значениях мощности земной коры от 35 км (Байкальские впадины) до 70 км (Тянь-Шань на юго-западе территории). Области Монгольского Алтая, Гоби-Алтая и Хангая отличаются глубинами Мохо 55 км - 60 км. Саяны и Прихубсугулье - глубины 45 км - 55 км, Становое нагорье - глубины 45 км - 50 км. Сибирская платформа характеризуется положением границы Мохо на уровне 40 км - 45 км. Районы к юго-востоку от озера Байкал отличаются глубинами Мохо от 45 км до 50 км.

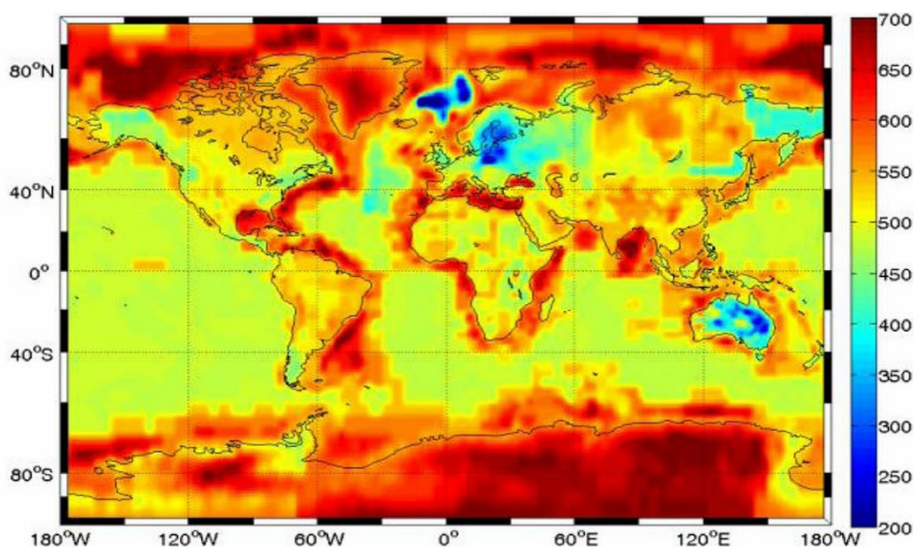


**Рис. 3.** Вариации разности плотностей коры и мантии, используемые при построении гравитационной модели GEMMA2012C для всей Земли [21].

Цветная шкала в  $\text{кг/м}^3$ .

Оценки мощности земной коры соответствуют результатам, полученным при интерпретации наземных гравиметрических съёмок [29]. По впадинам озера Байкал максимальные значения глубин с запада на восток: Южно-Байкальская – 34.5 км, Средне-Байкальская – 38.4 км, Северо-Байкальская – 38.9 км, Баргузинская – 39.0 км, Нижнеангарская – 39.5 км и Муйская – 40.9 км. Положение поверхности Мохо под впадинами озера хорошо выделяется на фоне окрестностей Байкала и в целом соответствует сейсмическим данным [30, 31, 32]. На отдельных участках территории имеются расхождения с сейсмическими данными. В Тункинской впадине его можно объяснить не учётом влияния осадков, мощность которых учитывались в Байкальских впадинах. Известно более гибкое использование контраста плотностей кора-мантия (Рис.3), что также может исправить расхождения в оценках.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН «Повышение точности сетевых методов наземных геофизических наблюдений в Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне РФ для прогноза и снижения риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» номер FWZZ-2026-0051.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molnar, P., and P. Tapponnier (1975), Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. // *Science*, 189, 419–426.
2. Zonenshain, L. P., and L. A. Savostin (1981), Geodynamics of Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. // *Tectonophysics*, 76, 1–45.
3. Logatchev, N. A., and Y. A. Zorin (1992), Baikal rift zone: Structure and geodynamics // *Tectonophysics*, 208, 273–286.
4. Складчатого пояса и зон его сочленения с Сибирским кратоном // Литосфера Центральной Азии - Новосибирск: Наука. - 1996. – С.16 – 26.
5. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта. // *Геология и геофизика*. – 2003. – Т.44. – № 5. – С.91 – 106.
6. Джурик В.И., А.В. Ключевский, С.П. Серебренников, В.М. Демьянович, Ц. Батсайхан, Г. Баяраа. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии // Иркутск: Институт земной коры СО РАН. - 2009. – 420 с.
7. Саньков В.А. А.В. Лухнев, А.И. Мирошниченко, С.В. Ашурков, Л.М. Бызов, М.Г. Дембелов, Э. Кале, Ж. Девершер. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // *Доклады РАН*. – 2009. - Т.424. - № 5. - с. 664–668.
8. Егорова Т. П., Павленкова Г.А. Сейсмоплотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям “КВАРЦ”, “КРАТОН” И “КИМБЕРЛИТ” // *ФИЗИКА ЗЕМЛИ*. – 2015. - № 2. - с. 98–115.
9. Демберел С. Сейсмичность и напряженно-деформированное состояние литосферы Монголии // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. - Улаанбаатар-2017. - Институт астрономии и геофизики Академии наук Монголии. - С. 374.
10. Hirt, C. and M. Rexer (2015), Earth2014: 1 arc-min shape, topography, bedrock and ice-sheet models - available as gridded data and degree-10,800 spherical harmonics. // *International Journal of Applied Earth Obs. and Geoinf.* 39, 103–112.
11. Shako R., C. Förste, O. Abrikosov, S. Bruinsma, J. Marty, J. Lemoine, F. Flechtner, H. Neumayer, C. Dahle. (2014) EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model

Including GOCE Data / // In Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Science Report. no. 20. p. 155–161.

12. Канушин В.Ф., Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарева А.М., Косарев Н.С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли // Монография. - Новосибирск. - СГУГиТ. - 2015. - 270 с.

13. Zingerle P., R. Pail, T. Gruber. The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94, № 66. DOI : 10.1007/s00190-020-01398-0.

14. Канушин В. Ф., Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева Исследование точности глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 на территории Российской Федерации // Вестник СГУГиТ. - Том 28. - № 3. -2023. - с. 16-22.

15. Тимофеев В. Ю., А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Д.Н. Голдобин, Д. А. Носов, И. С. Сизиков. Модели гравитационного поля и глубинное строение Алтае-Саянского региона и Северо-западной Монголии // Физика Земли. -№ 1. – 2025. – с. 151-165

16. Миронов В.С. Курс гравиразведки. – Ленинград: Недра. – 1973. - 512 с.

17. Гравиразведка. Справочник геофизика // Под ред. Е.А. Мудрецов и К.Е. Веселова. -Москва: Недра. – 1990. - 607 с.

18. В.Н. Глазнев, О.М. Муравина, Т.А. Воронова, В.М. Холин. Оценка мощности гравитационного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // ВЕСТНИК ВГУ. - СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ. – 2014. - № 4. –с.78-84.

19. П. С. Мартышко, И. В. Ладовский, А. Г. Цидаев. Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных // ФИЗИКА ЗЕМЛИ. – 2010. - № 11. - с. 23–35.

20. Reguzzoni M, Sampietro D, Sansò F (2013) Global Moho from the combination of the CRUST 2.0 model and GOCE data. // Geophysical Journal International, ggt247.

21. Reguzzoni M, Sampietro D (2015) GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35, 31-43.

22. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste Ch., Goiginger H., Schuh W.D., Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J.M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher Th., Mayrhofer R., Kras butter I., Sansò F., Tscherning C.C. (2011) First GOCE gravity field models derived by three different approaches // J. Geodesy. V. 85. P. 819–843.

23. Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. (2013) Update on CRUST1.0 -A 1-degree Global Model of Earth's Crust // Geophys. Res. Abstracts. 15. Abstract EGU2013-2658. 2013. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>

24. Sampietro D. (2016) Crustal Modelling and Moho Estimation with GOCE Gravity Data. // In Remote Sensing Advances for Earth System Science (pp. 127-144). Springer International Publishing.

25. Алексеев А.С., Геза Н.И., Глинский Б.М., Еманов А.Ф. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Цибульчик Г.М. (ред.). Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. - Фил. "Гео" изд. - 2004. - 387 с.

26. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Оценка глубины поверхности Мохо по данным МОВЗ профиля Сайлюгем – Ельцовка // Материалы международного конгресса ГЕОСИБЕРЬ. - ИНГГ СО РАН. –СГУГиТ. - г. Новосибирск. – 2017. - 121-126.

27. Pavlenkova, G. A., K. Priestley, and J. Cipar (2002), 2D model of the crust and uppermost mantle along rift profile, Siberian craton. // Tectonophysics, 355, 171–186.

28. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. М.: Наука. - 1983. - 352 с.

29. Зорин Ю.А., Новоселова М.Р., Рогожина В.А. Глубинная структура территории МНР // Новосибирск: Наука. - 1982. -93 с.

30. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / Ред. Н.Н. Пузырев, – Новосибирск: Наука. - 1981. – 105 с.

31. Suvorov, V. D., Z. M. Mishenkina, G. V. Petrick, I. F. Sheludko, V. S. Seleznev, and V. M. Solovyov (2002), Structure of the crust in the Baikal Rift Zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data // *Tectonophysics*, 351, 61–74.

32. В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников, В. В. Чечельницкий, Н. А. Гилёва, А. В. Лисейкин, А. А. Брыксин, Н. А. Галёва. Глубинное скоростное строение и сейсмичность Забайкалья (в створе опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ) // *Вулканология и сейсмология*, 2023, № 2, с. 83–96.

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Д. Н. Голдобин, 2026