



## DEEP STRUCTURE OF THE ALTAI MOUNTAINS AND MODERN GRAVITY FIELD MODELS

V.Yu. Timofeev <sup>1</sup>, D.G. Ardyukov <sup>1</sup>✉, D.N. Goldobin <sup>2</sup>, A.V. Timofeev <sup>1</sup>,  
D.A. Nosov <sup>3,1</sup>, I.S. Sizikov <sup>3,1</sup>, E.N. Kalish<sup>3</sup>, Yu.F. Stus<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup>Siberian State University Geosystems and Technology, 10 Plakhotny St, Novosibirsk 630108, Russia

<sup>3</sup>Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** The results of the ground-based absolute gravity and space geodetic measurements for the Altai Mountains were considered in combination with EIGEN-6C4 Global Geopotential Model (ETOPO1 Global Relief Model) generated from the satellite data. Analysis was made on different kinds of data: model values for the vertical component of gravity, values of Bouguer and Faye gravity reductions, variations of the vertical gravity gradient, and changes in altitude of the measurement sites. With EIGEN-6C4 model for Bouguer reduction, the crustal thickness curve was drawn along the Novosibirsk (southern West Siberia) – Ukok Plateau (Altai Mountains) line with a length of 800 km. The Moho depth increases from 40 km in the northwest of the area to 51 km in the southeast. For the homogeneous crust model, there was obtained the Moho depth distribution in the Altai Mountains and their foothills.

The analysis of the results of modeling Bouguer and Faye reductions, the data on quasigeoid heights and the relationship between relief height and Bouguer anomalies implies that the Altai Mountains area as a whole is isostatically compensated. Non-compensated are some intermountain basins, such as, for example, the Kurai and Chuya valleys.

**KEYWORDS:** satellite and ground-based gravimetry data; absolute gravimetry; space geodesy, Moho; Altai Mountains; Bouguer and Faye reductions; isostasy

**FUNDING:** The research was done as part of the project of the INGG SB RAS (FWZZ-2022-0019).



## RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Dmitriy G. Ardyukov, [ardyukovdg@ipgg.sbras.ru](mailto:ardyukovdg@ipgg.sbras.ru)

Received: February 1, 2022

Revised: August 26, 2022

Accepted: September 10, 2022

**FOR CITATION:** Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Goldobin D.N., Timofeev A.V., Nosov D.A., Sizikov I.S., Kalish E.N., Stus Yu.F., 2023. Deep Structure of the Altai Mountains and Modern Gravity Field Models. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0681. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0681

**ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ГОРНОГО АЛТАЯ И СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ**

**В.Ю. Тимофеев<sup>1</sup>, Д.Г. Ардюков<sup>1</sup>, Д.Н. Голдобин<sup>2</sup>, А.В. Тимофеев<sup>1</sup>,  
Д.А. Носов<sup>3,1</sup>, И.С. Сизиков<sup>3,1</sup>, Е.Н. Калиш<sup>3</sup>, Ю.Ф. Стусь<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, Россия

<sup>3</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Результаты наземных измерений в районах Горного Алтая, полученные методами абсолютной гравиметрии и космической геодезии, рассматривались совместно с моделью геопотенциала EIGEN-6C4 (модель рельефа ETOPO1), построенной по спутниковым данным. Анализировались различные виды данных: модельные величины вертикальной составляющей силы тяжести, значения силы тяжести в редукциях Буге, Фая, вариации вертикального градиента силы тяжести и изменения высот пунктов. С использованием модели EIGEN-6C4 в редукции Буге построен график мощности земной коры по линии Новосибирск (юг Западной Сибири) – плато Укок (Горный Алтай) длиной 800 км. Глубина границы Мохоровичича увеличивается от 40 км на северо-западе территории до 51 км на юго-востоке. Для модели однородной коры получено распределение глубин по поверхности Мохоровичича в Горном Алтае и его предгорьях.

Анализируя результаты построений в редукциях Буге и Фая, данные о высотах квазигеоида и соотношении высоты рельефа и аномалий Буге, следует сделать вывод, что в целом территория Горного Алтая изостатически скомпенсированна. Являются некомпенсированными отдельные межгорные впадины, например Курайская и Чуйская долины.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** спутниковые и наземные гравиметрические данные; абсолютная гравиметрия; космическая геодезия; граница Мохоровичича; Горный Алтай; редукции Буге и Фая; изостазия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена по проекту НИР ИНГГ СО РАН (FWZZ-2022-0019).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Алтае-Саянская молодая горная область, расположенная в центре Азии, относится к сейсмически активным территориям России [New Catalog..., 1977; Bune, Gorshkov..., 1980; Trifonov, 1986; Zhalkovsky, 1988; Filina, 1997]. Накопленная тектоническая энергия, возможно связанная во многом с воздействием коллизии Индостан – Евразия и с существованием мантийных плюмов [Molnar, Tapponnier, 1975; Chernov et al., 1988; Dobretsov et al., 1996; England, Molnar, 1997; Buslov et al., 2003; Delvaux et al., 2013], выделяется здесь в виде сильных землетрясений. Для анализа связи особенностей глубинного строения Земли с сейсмичностью и поверхностными геологическими структурами необходимы детальные геофизические сведения о строении литосферы и, в частности, о мощности земной коры, о границе кора – мантия, т.е. о глубине границы Мохоровичича (Мохо). Важные сведения о глубинном строении были получены по данным профильных работ сейсмическим методом (рис. 1, 2). Измерения выполнены на равнинных территориях к северу от Алтае-Саянской складчатой области. Здесь глубина границы Мохо составляет около 40 км [Solovjev et al., 2000, 2005, 2018; Alekseev et al., 2004].

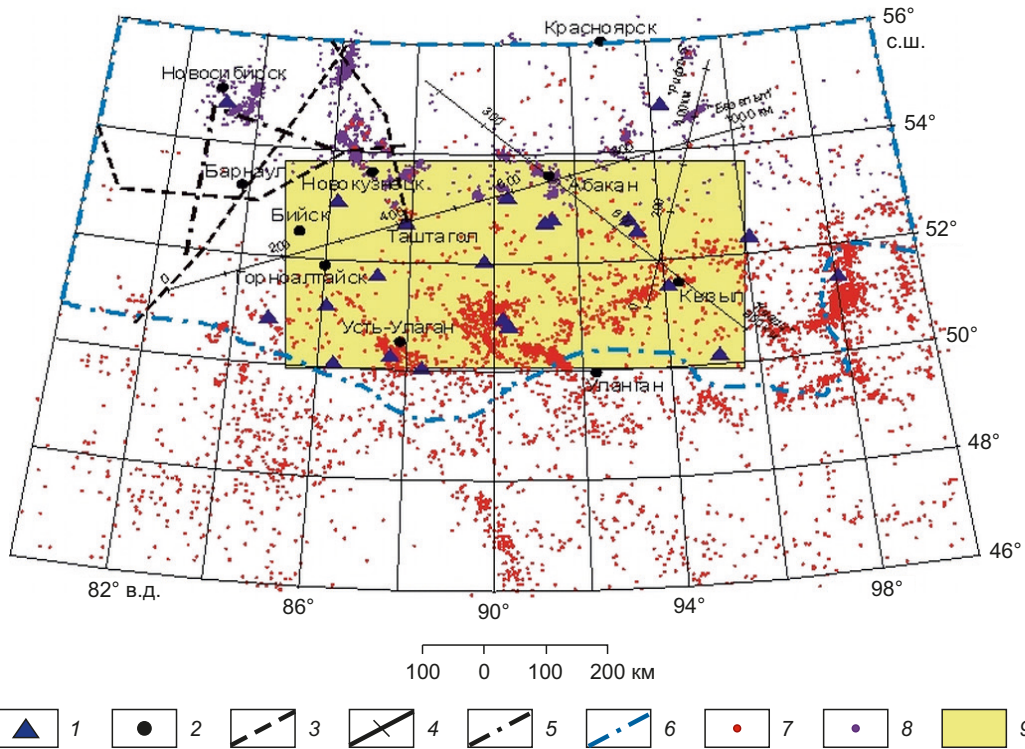
Для центральных и южных частей Алтае-Саянской области известны работы по определению строения земной коры и верхней мантии по гравитационным

данным, которые проводились под руководством Э.Э. Фотиади и В.С. Суркова [Fotiadi, 2007]. По результатам этих исследований мощность земной коры в пределах изучаемого района меняется от 38–40 км на северо-западе до 60–63 км на юге. Интерпретация гравиметрических данных в работах [Ladynin, 1970; Zorin, 1971] показала изменение глубины границы Мохо с севера на юг от 38 км (на равнине) до 50 км (в высокогорной области на крайнем юге Горного Алтая).

Согласно представлениям Н.Д. Жалковского, Г.М. Цибульчика, С.В. Крылова, А.А. Дергачева, которые определяли строение поверхности Мохо по данным о преломленных волнах от землетрясений, мощность земной коры в Алтае-Саянской складчатой области увеличивается в юго-восточном направлении от 38 до 53 км [Krylov, 2006].

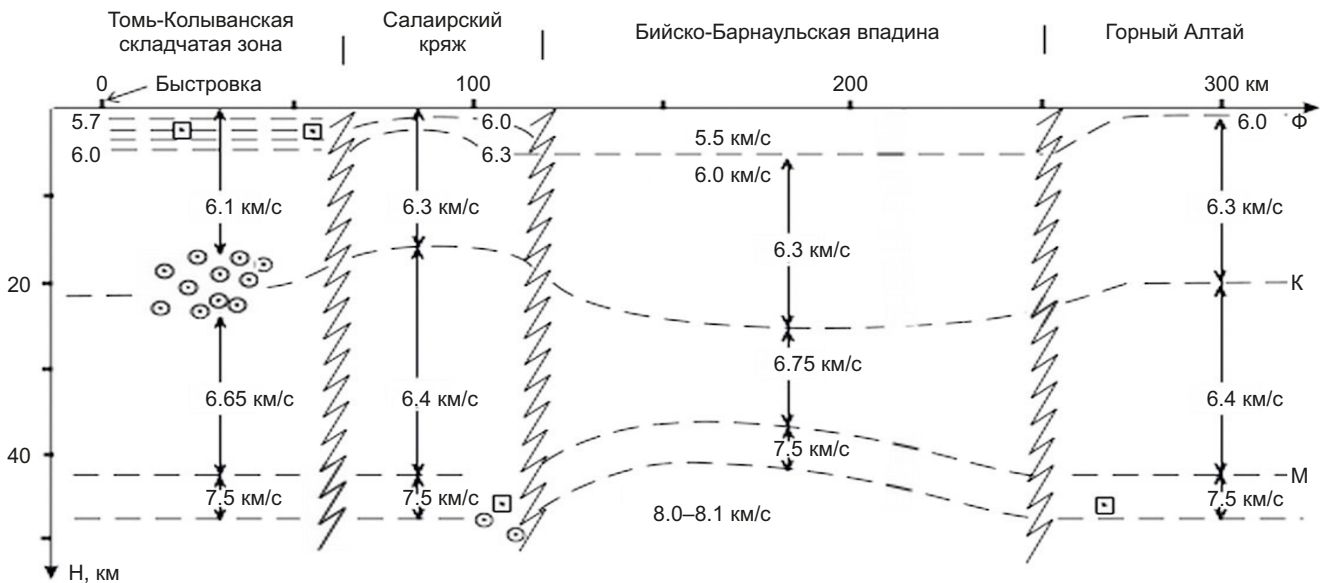
С другой стороны, в последнее время появилась возможность использовать для изучения глубинного строения материалы и модели, полученные в результате гравиметрических спутниковых миссий [Kanushin et al., 2015; Goldobin, 2019b] и тестируемые современными наземными измерениями силы тяжести и координат.

Задачами нашей работы являлись: анализ современных гравиметрических моделей для территории Горного Алтая и прилегающей области; сравнение модельных представлений, построенных по спутниковым



**Рис. 1.** Схема изученности Алтае-Саянской складчатой области методами сейсмологии и сейсморазведки. 1 – сейсмостанции; 2 – города; 3 – профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ); 4 – геотрансекты; 5 – вибросейсмические профили; 6 – граница Алтае-Саянского региона; 7 – эпицентры землетрясений ( $M > 2$ ) за период 1984–1992 и 1998–2000 гг.; 8 – эпицентры промышленных взрывов; 9 – район площадных сейсмологических исследований (по работам [Solovjev et al., 2005, 2018]).

**Fig. 1.** A scheme of seismological and seismic survey of the Altai-Sayan folded area. 1 – seismic stations; 2 – cities; 3 – deep seismic sounding (DSS) profiles; 4 – geotranssects; 5 – vibroseismic profiles; 6 – boundary of the Altai-Sayan region; 7 – epicenters of earthquakes ( $M > 2$ ) over the periods 1984–1992 and 1998–2000; 8 – epicenters of industrial explosions; 9 – areal seismological survey (after [Solovjev et al., 2005, 2018]).



**Рис. 2.** Вибросейсмический разрез на профилях Быстровка – Алейск (профиль от Новосибирска на юг на рис. 1). Буквами Ф, К и М обозначены соответственно: верхняя часть разреза, граница Конрада и граница Мохоровичича (по работам [Solovjev et al., 2000, 2005, 2018]).

**Fig. 2.** Vibroseismic section along the Bystrovka – Aleisk profiles (a profile to the south of Novosibirsk in Fig. 1). Letters Ф, К and М indicate the upper section, Conrad discontinuity and Moho discontinuity, respectively (after [Solovjev et al., 2000, 2005, 2018]).

данным, результатов абсолютных гравиметрических измерений и данных космической геодезии; определение положения границы Мохо по современным гравиметрическим данным; оценка изостазии Горного Алтая и проявление связей строения с современной сейсмичностью.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

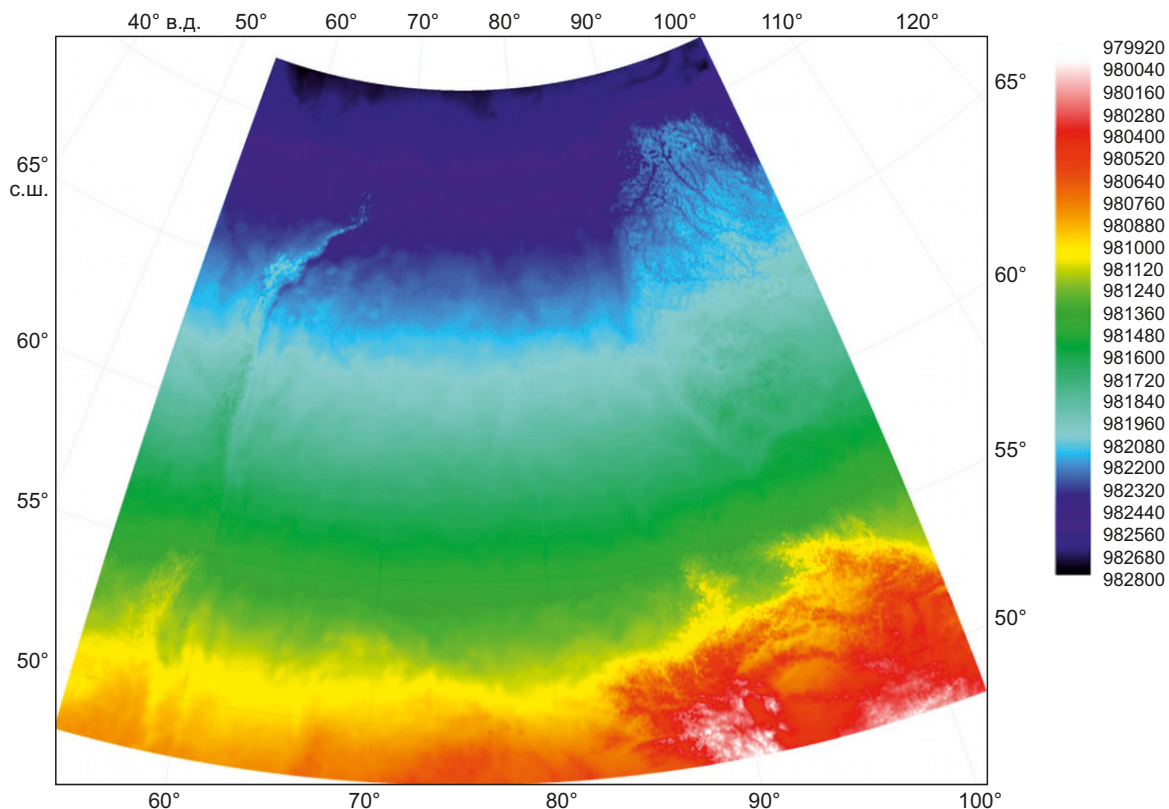
В настоящее время спутниковые системы измерений широко применяются в научных исследованиях Земли. Так, навигационные системы ГЛОНАСС-GPS применяются для изучения смещений тектонических плит Земли и отдельных районов земной поверхности, позволяют проводить высокоточное определение положения спутников различного типа и исследовать вариации и состояние ионосферы Земли. Спутниковая миссия GRACE регистрирует изменение поля силы тяжести, например, в бассейнах крупных рек или зонах катастрофических землетрясений. Известно использование данных радарных съемок InSAR в эпицентральных областях сильных землетрясений. Материалы космических съемок земной поверхности в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн (при высоте орбиты 700–850 км) использованы в рамках изучения моделей конвективного теплового потока, распространяющегося в приповерхностных горизонтах Земли, для прогнозирования контуров и положения нефтегазовых залежей. В исследованиях авторов проведено сравнение результатов гравиметрических наземных измерений с моделями поля силы тяжести, построенными по спутниковым данным. Рассматривалась территория юга Западной Сибири до южной границы Горного Алтая (от 55 до 49° с.ш.). Кратко остановимся на современных глобальных моделях гравитационного поля Земли, которые были получены с учетом данных космических гравиметрических миссий, выполняемых на высоте от 200 до 500 км. Наиболее информативные высокостепенные глобальные модели геопотенциала появились в последние годы благодаря внедрению новых методов измерений. В этот период появились различные спутниковые методы для исследования глобального поля земли (ГПЗ). Это спутниковая альтиметрия, системы «спутник – спутник» (SST-метод, проекты CHAMP, GRACE и др.), спутниковая градиентометрия (SGG-метод, проекты «Аристотель», GOCE и др.) [Goldobin et al., 2015; Goldobin, 2019a; Kanushin et al., 2014, 2015, 2016; Karpik et al., 2014, 2016; Förste et al., 2014]. Появилась возможность надежно определять гармонические коэффициенты геопотенциала высокой степени и повысить точность спутниковых и наземных измерений. Исследуемые модели геопотенциала Земли доступны на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе Потсдам (ICGEM), который является одним из шести центров Международной гравитационной службы Международной ассоциации геодезии [Shako et al., 2014].

В настоящее время на сайте центра ICGEM представлено более 170 моделей и все они доступны в виде нормированных коэффициентов сферических гармоник в стандартном формате, который был принят Европейским космическим агентством в качестве официального формата данных проекта GOCE. В Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ, г. Новосибирск) были проанализированы модели геопотенциала, созданные за последние десятилетия [Kanushin et al., 2015; Goldobin, 2019a; Karpik et al., 2016]. Рассматривалась область с измеренными значениями силы тяжести на территории Новосибирской области (от 55.8 до 53.7° с.ш. и от 77.7 до 84.4° в.д.). Анализировались 48 моделей, построенных по комплексу спутниковых данных. Все выбранные модели являются комбинированными, т.е. данные космических миссий дополнены информацией наземных измерений, имеющейся в распоряжении геофизических центров. «Чисто» спутниковые модели не рассматривались. Примеры исходных данных спутниковых миссий для разработки комбинированных моделей ГПЗ приведены на рис. 3. В табл. 1 представлена основная информация по 15 исследуемым глобальным моделям геопотенциала (ГМГ). При создании моделей использованы комбинации различных типов данных. Данные табл. 1 составлены по материалам банка ICGEM. Отметим, что хотя модели в основном строятся по данным спутниковых сессий, они дополняются данными наземных съемок. Например, модель GGM03C является комбинированной глобальной моделью гравитационного поля Земли. Она содержит гармоники геопотенциала до 360-й степени (см. рис. 1). Модель EIGEN-6C4 является типичной высокостепенной глобальной моделью гравитационного поля Земли и содержит гармоники геопотенциала до 2190-й степени. Модели гравитационного поля Земли ограничиваются максимальной степенью  $N_0$ . Из спектрального разложения гравитационного поля Земли по волнам длиной  $360^\circ/N_0$  имеем пространственное угловое разрешение:

$$\Delta = 180^\circ/N_0, \quad (1)$$

Разрешающая способность модели EIGEN-6C4 ограничена максимальным порядком сферической гармоники  $n=2190$ , что соответствует заявленному разработчиками пространственному разрешению 9 км. Пятнадцать моделей, представленных в табл. 2, были тщательно проанализированы в СГУГиТе на основе данных наземной съемки по Новосибирской области. В качестве контрольных точек использованы 27 пунктов, которые являются пунктами опорной гравиметрической сети II класса. Заявленная точность определения силы тяжести составляет  $\pm 0.05$  миллигал (мГал). Анализировались значения силы тяжести в редукции Фая. Минимальные отклонения от данных наземной съемки показала модель EIGEN-6C4 [Kanushin et al., 2015; Goldobin, 2019a; Shako et al., 2014]. Статистические параметры распределения погрешностей исследуемой модели EIGEN-6C4 приведены в табл. 2. Стандартное





**Рис. 3.** Вертикальная составляющая значения силы тяжести, полученная по модели EIGEN-6C4 с моделью рельефа ETOPO1 для территории Западной Сибири в миллигалах [Goldobin, 2019a]. Изменения значения представлены в цвете от 979920 до 982800 мГал. Максимальные значения выделяются на севере территории, а минимальные – на юге.

**Fig. 3.** Vertical component of gravity measured in milligals from the EIGEN-6C4 Model with the ETOPO1 Global Relief Model for West Siberia [Goldobin, 2019a]. Changing of the value is shown in color from 979920 to 982800 mGal. The maximum values are in the north of the area, the minimum are in the south.

**Таблица 1.** Модели глобального геопотенциала, составленные по комплексу данных

**Table 1.** Global geopotential models generated from the dataset

Номер по ICGEM	Модель	Год создания	Максимальная степень разложения	Исходные данные, методы измерений
104	EGM2008	2008	2190	A, G, S (GRACE)
105	EIGEN-5C	2008	360	A, G, S (GRACE), S (Lageos)
109	GGM04C	2009	360	A, G, S (GRACE)
114	EIGEN-51C	2010	359	A, G, S (CHAMP), S (GRACE)
125	EIGEN-6C	2011	1420	A, G, S (GOCE), S (GRACE), S (Lageos)
126	GIF48	2011	360	A, G, S (GRACE)
131	EIGEN-6C2	2012	1949	A, G, S (GOCE), S (GRACE), S (Lageos)
132	GAO2012	2012	360	A, G, S (GOCE), S (GRACE)
139	EIGEN-6C3 stat	2014	1949	A, G, S (GOCE), S (GRACE), S (Lageos)
148	EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S (GRACE), S (GRACE), S (Lageos)
152	GECO	2015	2190	EGM2008, S (GOCE)
153	GOM05C	2015	360	A, G, S (GOCE), S (GRACE)
154	GOCO05C	2016	720	A, G, S
161	XOM2016	2017	719	A, G, S (GOCO05S)
167	SGG-UGM-1	2018	2159	EGM 2008, S (GOCE)

Примечание. А – данные альтиметрических измерений, G – данные наземных гравиметрических измерений, S – данные спутниковые гравиметрических миссий.

Note. A – data of altimetric measurements, G – data of ground-based gravity measurements, S – data of satellite gravimetric missions.

**Таблица 2.** Статистические параметры распределения погрешностей модели EIGEN-6C4**Table 2.** Statistical parameters of the EIGEN-6C4 model error distribution

Параметр	Значение в миллигалах
Минимальное	-9.07
Максимальное	+4.30
Диапазон	13.37
Среднее	-2.27
Дисперсия	11.81
Стандартное отклонение	+3.44
Асимметрия	0.099
Экссесс	-0.530

Примечание. Приведено минимальное и максимальное отклонение модельного значения от гравиметрических данных, полученных из наземных измерений.

Note. There are presented the minimum and maximum deviations of the model value from the ground-based gravity measurements.

отклонение, полученное для данной модели, составило 3.4 мГал ( $1 \text{ мГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ ) при среднем значении  $E = -2.3 \text{ мГал}$ .

Следует отметить, что по результатам, представленным на рис. 1, поле вертикальной составляющей значения силы тяжести достаточно однородно с севера на юг территории. Хорошо проявляется широтная зависимость, связанная со сжатием Земли. Как представлено в правом нижнем углу карты, значимое аномальное поведение поля отмечено на территории Горного Алтая и Саян.

Модель EIGEN-6C4 в дальнейшем была использована в наших исследованиях. На рис. 3 приведена карта поля силы тяжести для территории Западной Сибири, построенная по модели EIGEN-6C4.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С АБСОЛЮТНЫМ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГРАВИМЕТРОМ И ПРИЕМНИКАМИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ В ГОРНОМ АЛТАЕ

Абсолютный лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ и его дальнейшие модификации ГАБЛ-Э, ГАБЛ-П (рис. 4), GABL-mini были разработаны в ИАиЭ СО РАН [Arnautov et al., 1994]. Конструкция гравиметра включает баллистический блок с глубоким вакуумированием и оптический блок с интерферометром, который обеспечивает получение данных о смещении падающего тела. Электронный блок проводит обработку данных, вычисляет значение силы тяжести и управляет гравиметром. Система для исключения вибрации обеспечивает стабильную систему отсчета. Программное обеспечение работает в реальном времени, проводит обработку данных, выполняет введение и учет поправок до 0.1 микрогала (мкГал). Значения вносимых в результат поправок: а) за конечность скорости света

(+dG<sub>dop</sub>) – до 0.1 мкГал; б) за остаточное давление в баллистической камере (+dG<sub>vac 0</sub>) – до 1 мкГал; в) за влияние атмосферного давления (+dG<sub>atm</sub>) – 0.3 мГал на мбар; г) за приливные изменения силы тяжести (+dG<sub>tide</sub>) – до 150 мкГал; д) за движение полюса (dG<sub>pol</sub>) – до 10 мкГал. Для отдельной модификации гравиметра учитывалось значение эффективной высоты –  $H_{eff}$ , точки над фундаментом, которой соответствует значение силы тяжести  $g$ : ГАБЛ – 0.98 м, ГАБЛ-Э – 0.89 м и ГАБЛ-П – 0.71 м. Гравиметры неоднократно участвовали в международных свертках приборов этого класса [Robertsson et al., 2001; Arnautov, 2005]. Однократные измерения гравиметром после введения всех поправок, рекомендуемых Международным центром, позволяют определить значение силы тяжести с ошибкой 4–6 мкГал. При повторных наблюдениях гравиметр дает результаты с точностью до 1 мкГал. В наших исследованиях были использованы материалы современных наземных измерений в различных районах Горного Алтая (табл. 3), полученные методами абсолютной лазерной гравиметрии (см. рис. 2) на специальных гравиметрических постах. Полученные на физической поверхности гравиметрические данные далее пересчитываются на поверхность эллипсоида или поверхность нулевой высоты с использованием различных систем высот от СК42 до WGS84. Для определения нормального значения поля  $\gamma_0$  на поверхности эллипсоида используется формула Гельмерта [Grushinsky, 1983]:

$$\gamma_0 = 978030 \cdot (1 + 0.005302 \cdot \sin^2 \varphi - 0.0000071 \cdot \sin^2 2\varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi$  – широта пункта наблюдений, значение  $\gamma_0$  в мГал.

При использовании результатов гравиметрических измерений представляют интерес не полные значения силы тяжести, а только аномальные величины, которые получают вычитанием из наблюдаемых значений нормальных значений поля с учетом редукции Фая и Буге. Редукция в свободном воздухе (редукция Фая) или поправка за высоту пункта  $H$  вычисляется с учетом вертикального градиента силы тяжести  $\delta g = -2\gamma_0/R$ :

$$\Delta g_H = -(2\gamma_0/R) \cdot H, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус Земли. Полагая для всей Земли ускорение силы тяжести равным среднему значению (980 Гал) и  $R$  равным среднему радиусу (6371 км), получаем значение нормального вертикального градиента силы тяжести  $\delta g = -0.3086$ .

Поправка Буге состоит из поправок в свободном воздухе и за промежуточный слой. Поправка за влияние промежуточного плоскопараллельного слоя учитывает влияние масс между горизонтальной плоскостью, проходящей через точку наблюдения, и уровнем моря или каким-либо условным уровнем. Поправку вычисляют по формуле:

$$\Delta g_L = 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot H, \quad (4)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $\rho$  – средняя плотность промежуточного слоя.



**Рис. 4.** Гравиметр ГАБЛ-П на гравиметрическом постаменте на пункте Усть-Кан (USTK).

**Fig. 4.** Gravimeter GABL-P on gravimetric pedestal in Ust-Kan (USTK) site.

**Таблица 3.** Координаты и высота пунктов измерений  
**Table 3.** Coordinates and height of the measurement sites

Код пункта	$\varphi$ (°)	$\lambda$ (°)	H (m)
NVSK (IGS)	54.840	83.235	123
ARTVB	51.799	87.282	460
SEMI	51.014	85.626	1483
USTK	50.939	84.769	1003
CHIK	50.644	86.313	1710
KAIT	50.145	85.464	983

Сложив обе поправки, находим поправку Буге:

$$\Delta g = (0.3086 - 0.0419 \cdot \rho) \cdot H. \quad (5)$$

Вычитая эту поправку, мы как бы освобождаем аномальное гравитационное поле от влияния видимых масс. Тогда в аномалиях более четко проявится внутреннее геологическое строение для области, расположенной ниже нулевого уровня высоты.

Аномалии, вычисленные путем введения поправок за нормальное поле и Буге, называют аномалиями Буге [Grushinsky, 1983]:

$$\Delta g_B = \Delta g_H + (0.3086 - 0.0419 \cdot \rho) \cdot H - \gamma_0. \quad (6)$$

Анализ данных по Горному Алтаю проводился с использованием поля силы тяжести в редукции Буге. Навигационные параметры для гравиметрических пунктов с точностью до сантиметров определялись с использованием двухчастотных геодезических приемников GPS типа TRIMBLE 4700 с опорой на данные пунктов

геодинамической сети космической геодезии Горного Алтая [Timofeev et al., 2019].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАЗЕМНОЙ СЪЕМКИ РАЗНЫХ ЭПОХ И МОДЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

По данным комплексных измерений были получены значения аномалий в редукции Буге для обсерватории Ключи (код пункта NVSK, номер 123019 в мировой сети IGS) и для пяти пунктов сети Горного Алтая (Артыбаш, Семинский перевал, Чикетаманский перевал, Усть-Кан и Кайтанак) (табл. 3). Было проведено сравнение результатов, полученных с использованием современной спутниковой модели EIGEN-6C4 (см. рис. 3), и данных Гравиметрической карты СССР и МНР (Горно-Алтайск) в редукции Буге (плотность  $2.3 \text{ г/см}^3$ ) в масштабе 1:1000000 (1968 г.) с сечением 5 мГал с использованием нормальной формулы Гельмерта, построенной на основе наземных съемок, выполненных в 60-х годах двадцатого столетия (табл. 4, 5). В среднем отличие составило  $-23.6 \text{ мГал}$ .

С другой стороны, из сравнений данных наших измерений по пяти пунктам и значений Гравиметрической карты получена разность в среднем  $-21.6 \text{ мГал}$  (табл. 5). Расстояние между пунктами наблюдений по профилям в горной местности составляет 5 км (см. табл. 4). Различие при использовании старых карт и современных моделей вызвано использованием другой системы высот и сменой мировых гравиметрических систем. Сравнение данных наших измерений с результатами, полученными в рамках модели EIGEN-6C4 с высотами по модели рельефа ETOPO1 (рис. 5), показало



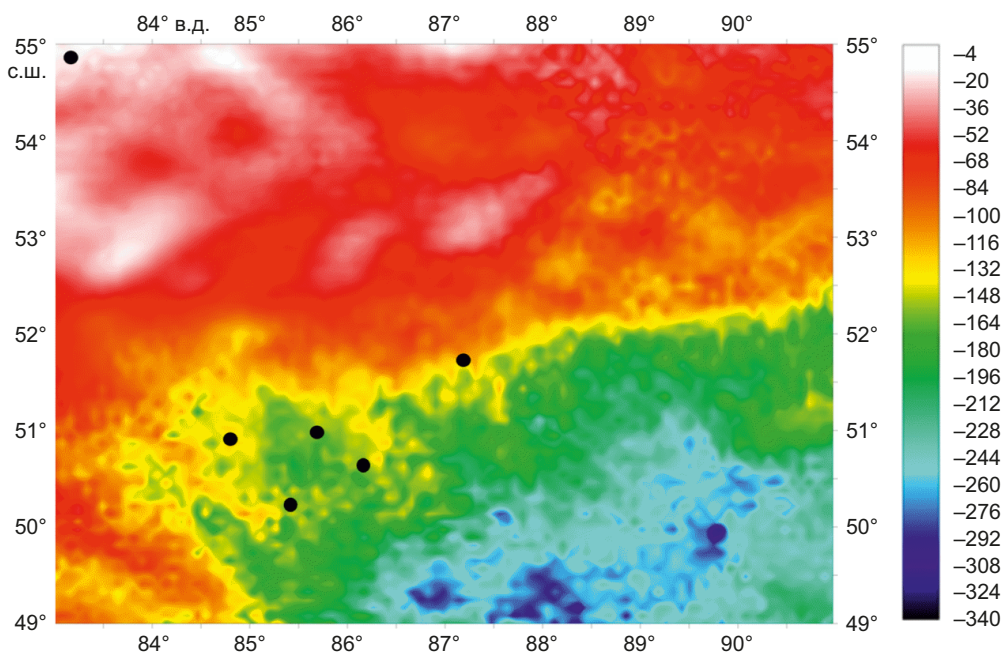
**Таблица 4.** Масштаб карты и соответствующие сечения изоаномал [Mudretsova, Veselov, 1990]  
**Table 4.** The map scale and corresponding isoanomal cross-sections [Mudretsova, Veselov, 1990]

Масштаб	Сечение изоаномал, мГал		Средняя квадратичная погрешность определения								Полная погр., мГал		Число пунктов на 1 км		1
			Буге, мГал		Наблюд. значения, мГал		Высота, м		Координаты, м						
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
1:1000000	5	5	1.5	2	0.5	0.5	5.0	-	200	-	2	2	0.01-0.1	0.01-0.1	2500-5000

Примечание. 1 – расстояние между пунктами при наблюдениях по профилям в метрах; А – для равнинных районов, Б – для горных районов.  
 Note. 1 – distance between the sites in meters during the profile observations; А – for lowland areas, Б – for mountainous areas.

**Таблица 5.** Отклонения значений силы тяжести в редукции Буге для пунктов измерений по результатам сравнения экспериментальных значений и модельных данных в мГал  
**Table 5.** Deviations of the Bouguer gravity reduction for the measurement sites based on a comparison between the experimental values and model values in mGal

Код пункта	φ (°)	λ (°)	H (м)	Спутниковая модель EIGEN-6C4	Гравиметрическая карта масштаба 1:1000000 [Gravimetric Map..., 1968]
NVSK (IGS)	54.840	83.235	123	-0.9	
ARTB	51.799	87.282	460	-2.5	+22.5
SEMI	51.014	85.626	1483	-6.7	+26.4
USTK	50.939	84.769	1003	+0.3	+21.8
CHIK	50.644	86.313	1710	-1.5	+13.0
KAIT	50.145	85.464	983	+4.2	+24.5
Среднее значение с ошибкой				-1.1±1.6	+21.6±2.4



**Рис. 5.** Аномалия силы тяжести в редукции Буге в миллигалах для юга Западной Сибири по модели EIGEN-6C4. Изменения от 0 до -340 мГал. Точками отмечено расположение пунктов наземных измерений силы тяжести и координат. Значения широты и долготы приведены в градусах. Широта от 55 до 49°, долгота от 83 до 91°.

**Fig. 5.** Bouguer gravity anomaly field reduction measured in milligals from the EIGEN-6C4 Model for southern West Siberia. The changes occur in the range from 0 to -340 mGal. The dots indicate the location of the ground-based gravity measurement sites and coordinates. The longitude and latitude values are given in degrees. The latitude ranges from 55 to 49°, the longitude – from 83 to 91°.



отклонение в  $-1.1$  мГал. Полученный результат находится в пределах среднеквадратической ошибки  $1.6$  мГал. Отличия можно объяснить тем, что наши данные получены на отдельных точках, а данные модели есть результат осреднения.

Модель EIGEN-6C4 содержит гармоники геопотенциала до 2190-й степени, т.е. отсчеты приводятся через  $9$  км, а далее применяется линейное осреднение. То же можно заметить и относительно модели рельефа.

## 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОРЫ

Известно, что рельеф нижней границы земной коры – границы Мохо – отражается в распределении и интенсивности региональных аномалий силы тяжести, поскольку вещество верхней мантии обладает повышенной плотностью по сравнению с плотностью пород земной коры. Прогибание поверхности границы Мохо создает отрицательные гравитационные аномалии, подъем – положительные аномалии. Для определения характера поверхности Мохо часто используют корреляционную связь между глубинами до нее и аномалиями Буге, из которых исключено влияние известных плотностных неоднородностей в верхней части разреза. Чем однороднее территория в геологическом смысле, тем теснее эта связь и тем точнее решается задача о форме нижней поверхности земной коры. Показательны осредненные для всей Земли соотношения. Так, известна осредненная для Земли связь мощности земной коры ( $M_3$ ) и значений аномалий Буге ( $\Delta g_b$ ):

$$M_3 = M_0 + k \cdot \Delta g_b, \quad (7)$$

где  $M_0$  – толщина земной коры в областях, где  $H=0$ , для континентальной коры  $M_0$  меняется от  $35.0$  до  $41.4$  км; коэффициент  $k$  для континентальной коры меняется от  $0.033$  до  $0.102$  км/мГал [Grushinsky, 1983].

Согласно известным представлениям [Grushinsky, 1983], в горах при вычитании составляющей, вызванной притяжением гор, аномалии уменьшаются, а поскольку горы, как правило, компенсированы, то и аномалии Буге там чаще всего будут отрицательными. Для поля аномалий Буге характерны большие, порядка сотен миллигал, положительные значения на океанах и большие, тоже порядка сотен миллигал, отрицательные значения в горах. На платформах и щитах обычно наблюдается спокойное мозаичное поле с небольшими максимумами и минимумами в диапазоне нескольких десятков миллигал.

Гравитационному полю аномалий в свободном воздухе в основном соответствует мозаичное, плавно изменяющееся в пределах  $\pm 50$  мГал поле на океанах с возрастающими положительными аномалиями над островами и островными дугами и отрицательными, порядка  $100$  мГал, над глубоководными впадинами [Grushinsky, 1983]. На континентах поле меняется более резко, в основном оставаясь мозаичным, т.е. имеются области с положительными и области с

отрицательными аномалиями. В горах появляются резко изменяющиеся в зависимости от высоты положительные аномалии, отображающие наличие избыточных масс рельефа. Однако абсолютное значение их не очень велико: в пределах первых двух – трех сотен мГал. На равнинах с малым перепадом высот оба типа аномалий ведут себя примерно одинаково и отличаются только общим уровнем.

Обратимся к результатам, полученным на территории юга Западной Сибири и Горного Алтая. Как представлено на рис. 3, значения аномалий силы тяжести в редукции Буге для района, ограниченного по широте от  $55$  до  $49^\circ$  и по долготе от  $83$  до  $91^\circ$ , изменяются в диапазоне  $0$ – $350$  мГал от северо-западного края территории до юго-восточного. Одной из уверенно решаемых гравиметрическим методом задач является задача определения глубины поверхности раздела для сред с различной плотностью и известной глубиной Мохо для эталонного участка, известной по данным ГСЗ в северной части исследуемой территории,  $z_0=40$  км. Известен простой способ построения мощностей коры по гравитационным аномалиям. Он предполагает однородное строение коры, в которой плотности монотонно возрастают с глубиной. В случае одной поверхности раздела можно написать приближенное соотношение в виде:

$$\Delta g - \Delta g_0 \approx 2\pi G(\sigma_2 - \sigma_1)(z - z_0), \quad (8)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – плотности пород выше и ниже раздела соответственно,  $z_0$  и  $z$  – глубины залегания поверхности раздела в начале координат и в произвольной точке, в которой определяется глубина,  $\Delta g_0$  и  $\Delta g$  – аномалии над исходной точкой и точкой, лежащей на глубине  $z$ .

Если разность для аномалии Буге составляет  $350$  мГал, при средней плотности земной коры  $2.3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, использованной при построении Гравиметрической карты [Gravimetric Map..., 1968] и спутниковой модели, и при плотности верхней мантии  $3.2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> получаем приращение мощности коры в  $9.3$  км, т.е. с учетом высоты рельефа  $2.0$ – $2.5$  км для дополнительной мощности коры имеем  $11.3$ – $11.8$  км. Так получаем глубину границы Мохо в высокогорной южной части Горного Алтая  $51.3$ – $51.8$  км. При более близких к современным оценкам средней плотности земной коры  $2.67 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и плотности верхней мантии  $3.37 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> получаем приращение мощности коры в  $7.8$  км, т.е. с учетом высоты рельефа  $2.0$ – $2.5$  км для дополнительной мощности коры имеем  $9.8$ – $10.3$  км. Существуют оценки параметров по модели РЕМ – континентальная Земля с вертикальным изменением плотности в коре от  $2.32 \cdot 10^3$  до  $2.72 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и изменениями плотности в мантии от  $3.320 \cdot 10^3$  до  $3.788 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [Zharkov, 1978], при этих параметрах результат существенно не изменится. В итоге получаем глубину границы Мохо в высокогорной южной части Горного Алтая  $49.8$ – $50.3$  км. Таким образом, мощность земной коры с северо-запада на юго-восток региона меняется от  $40$  до  $51$  км.

По данным ГСЗ для равнинной части территории и карты аномалий Буге по профилю в 800 км с северо-запада территории на юго-восток, приведенному на рис. 6, при помощи соотношения (8) и с моделью рельефа ЕТОРО1 был построен график изменения мощности земной коры (рис. 7).

По полученным соотношениям был определен коэффициент  $k$  для соотношения (6) для мощности коры: 0.036 км/мГал. В среднем по Горному Алтаю получаем для глубины Мохо выражение:

$$M_3 = 40 + 0.036 \cdot \Delta g_b, \quad (9)$$

где  $\Delta g_b$  – аномалия силы тяжести в редукции Буге, мощность коры в километрах.

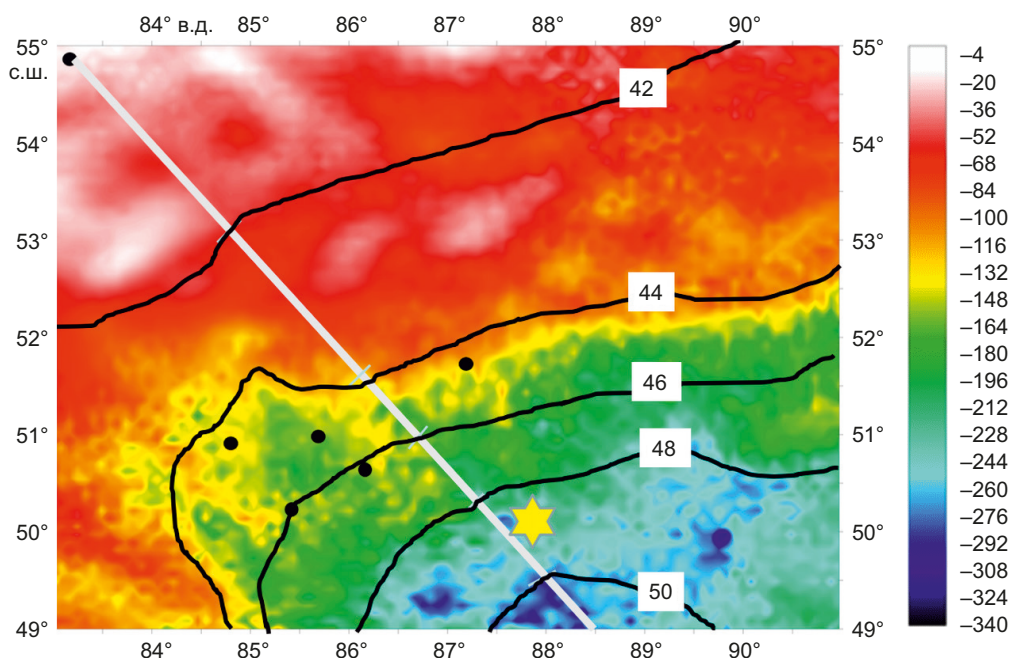
Полученное значение коэффициента  $k$  не противоречит известным значениям, приведенным в работе [Grushinsky, 1983] для континентальных районов. Используем соотношения (8) и (9) для построения изолиний глубины поверхности Мохо, приведенных на рис. 7.

Таким образом, по гравиметрическим данным построено распределение глубин по поверхности Мохоревича в Горном Алтае (см. рис. 6). Получено изменение мощности земной коры по линии профиля длиной в 800 км Новосибирск (юг Западно-Сибирской низменности) – Укок (плато Укок, Горный Алтай), оно представлено на рис. 7. Глубина поверхности Мохо изменяется от 40 до 51 км с северо-запада до юго-

востока территории. Для области Горного Алтая изменения с севера на юг составляют около 7 км (от 44 до 51 км).

Следует отметить, что в последние десятилетия при изучении строения поверхности Мохо активно использовалась площадная система наблюдений методом преломленных волн и методом сейсмической томографии, адаптированным к сейсмологическим данным для изучения строения земной коры. Получены данные о строении земной коры и верхней мантии в центральной и южной части Алтае-Саянского региона на площади 600×400 км, а также сведения о строении земной коры не изученного ранее участка южного и восточного флангов Алтае-Саянской складчатой области. Из обобщения результатов изучения глубинного сейсмического строения Алтае-Саянской области, полученных при интерпретации сейсмологических данных с площадной сейсмологической сети станций, в том числе и в районе Чуйского землетрясения 2003 г. [Gol'din et al., 2004; Starovoi et al., 2003; Arefiev et al., 2006], следует, что поверхность Мохо (рис. 8) расположена на больших резко меняющихся глубинах от 45–46 км в северо-западной части площади до 53–56 км в южной и северо-восточной части исследованных [Solovjev et al., 2005, 2018].

В итоге можно отметить соответствие сейсмических (рис. 8) и гравиметрических результатов (см. рис. 6) для территории южной части Горного Алтая.

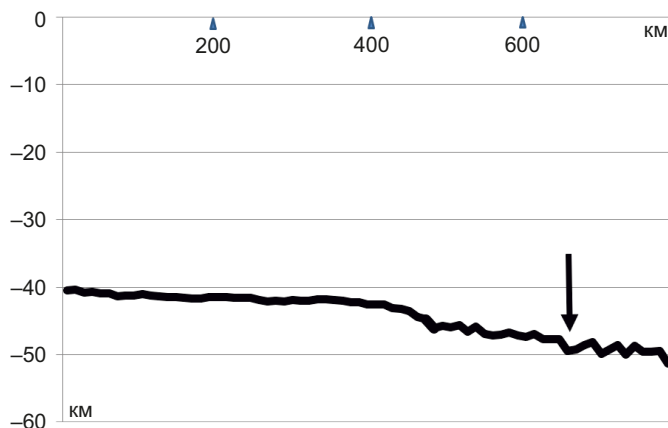


**Рис. 6.** Модель EIGEN-6C4 гравитационного поля Горного Алтая в редукции Буге (в мГалах), построенная по спутниковым данным.

Линией показано положение профиля, использованного для построения разреза мощности земной коры. Звездочка – положение эпицентра Чуйского землетрясения 27.09.2003 г.,  $M=7.3-7.5$ . Изолиниями отмечена глубина поверхности Мохо в километрах.

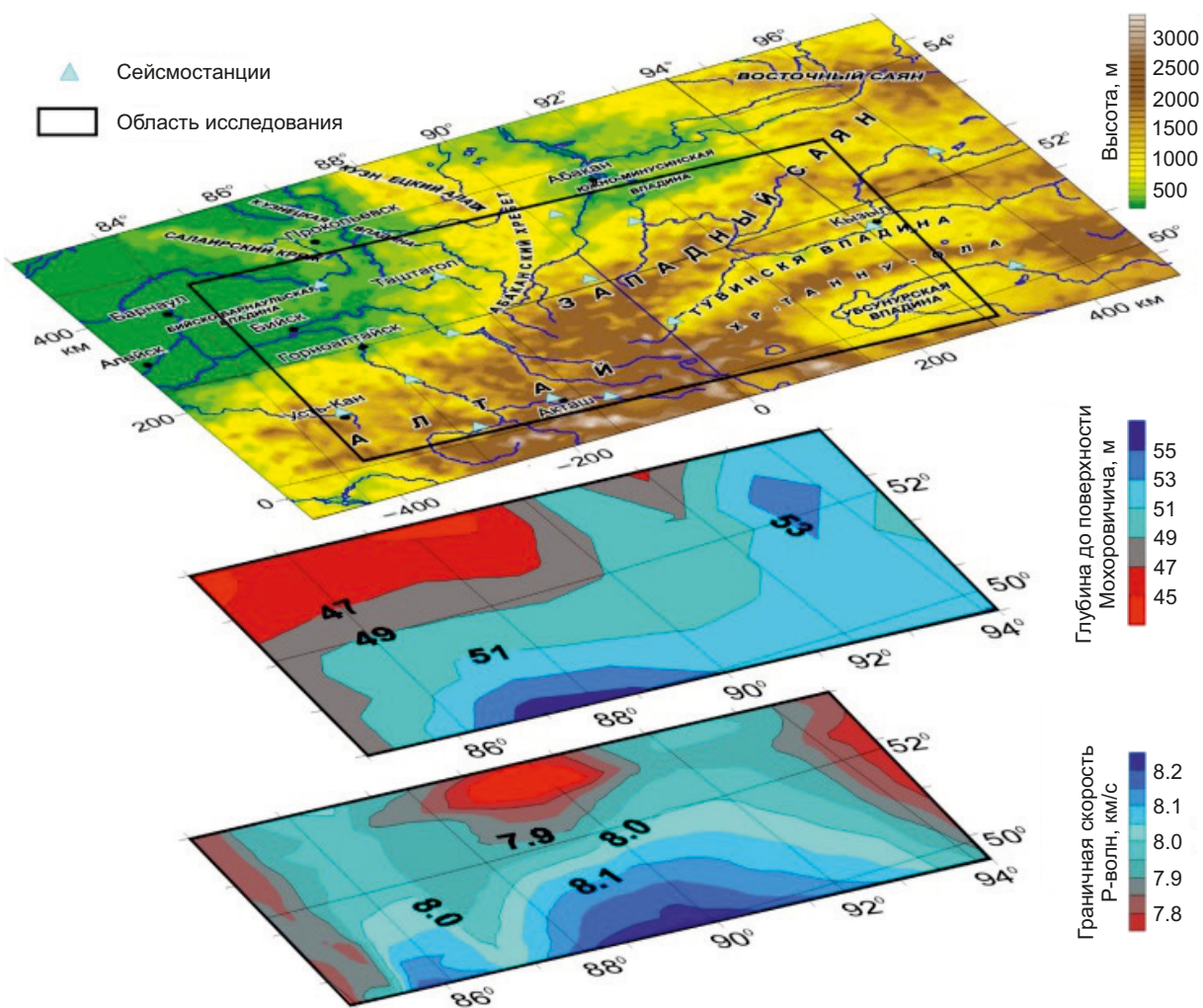
**Fig. 6.** EIGEN-6C4 Bouguer gravity field reduction in the Altai Mountains (in mGal), generated from the satellite data.

The line shows the location of the profile used to draw the cross-section depicting the crustal thickness. An asterisk indicates the epicenter of the September 27, 2003 Chuya earthquake,  $M=7.3-7.5$ . Isolines show the Moho depth in kilometers.



**Рис. 7.** Мощность земной коры, км, по профилю длиной 800 км, приведенному на рис. 11, от севера-запада территории (55° с.ш., 83° в.д.) до юго-востока (49° с.ш., 89° в.д.). Стрелкой показано положение на профиле эпицентра Чуйского (Алтайского) землетрясения 27.09.2003 г., M=7.3–7.5 [Gol'din et al., 2004; Starovoit et al., 2003].

**Fig. 7.** Crustal thickness, km, along the 800 km long profile (shown in Fig. 11) from the northwest of the area (55° N, 83° E) to the southeast (49° N, 89° E). The arrow shows the location of the epicenter of the September 27, 2003 Chuya (Altai) earthquake, M=7.3–7.5, on the profile [Gol'din et al., 2004; Starovoit et al., 2003].



**Рис. 8.** Результаты площадной интерпретации данных Pn- и Sn-волн в центральной части Алтае-Саянской складчатой области.

**Fig. 8.** The results of the areal interpretation of the data on Pn- and Sn-waves in the central Altai-Sayan folded area.



Сейсмичность, как наиболее яркое проявление современной тектонической активности, может быть связана с различными геофизическими характеристиками. В качестве одной из таких характеристик нужно признать данные об изостатическом состоянии отдельного района горной системы. Согласно современным представлениям, континентальные области находятся в гидростатическом равновесии, т.е. изостатически скомпенсированы: материки плавают в подкоровом субстрате подобно гигантским айсбергам в полярных морях. Небольшие же отклонения гравитационного поля Земли от нормального вызваны какими-либо флуктуациями плотности в коре отдельного района.

Возникновение изостатических гипотез было вызвано стремлением объяснить установленную связь аномалий Буге с рельефом – в горных районах аномалии Буге отрицательные. На рис. 9 показан приблизительно линейный характер такой зависимости для Горного Алтая. Соотношение высоты рельефа  $H$  и значений аномалий Буге получаем в виде:

$$H = -11 \cdot \Delta g - 271, \tag{10}$$

где высота в метрах, сила тяжести в миллигалах.

Согласно гипотезе Эри, плотность земной коры одинакова под континентами и океанами, а мощность различна [Mudretsova, Veselov, 1990], т.е. в каждом вертикальном столбе единичного поперечного сечения полная масса горных пород одна и та же. Столбы нужно отсчитывать от некоторого «уровня компенсации», ниже которого Землю можно считать однородной. Условие равновесия, согласно гипотезе Эри, для однородной коры выражается следующими уравнениями для континентальной колонки:

$$\sigma_1 \cdot h = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot h', \quad h' = \sigma_1 \cdot h / (\sigma_2 - \sigma_1), \tag{11}$$

где  $h'$  – мощность области компенсирующего дефекта масс;  $\sigma_2$  – плотность вещества, подстилающего

кору;  $\sigma_1$  – плотность коры;  $h$  – высота масс над уровнем моря.

Таким образом, например, при  $\sigma_2 = 3.2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_1 = 2.3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  получаем  $h' = 2.6 \cdot h$  и, имея высоту рельефа  $h = 2.5 \text{ км}$  для  $h' = 6.5 \text{ км}$  при  $\sigma_2 = 3.37 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_1 = 2.67 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , получаем  $h' = 3.8 \cdot h = 9.5 \text{ км}$ . Компенсация избытка масс ( $h > 0$ ) на континентах, возможно, осуществляется непосредственно под ними на глубине от  $T$  до  $T+h'$ , где  $T$  – глубина поверхности компенсации, в данном случае – мощность земной коры под равниной ( $h=0$ ) [Mudretsova, Veselov, 1990]. Вернее, следует глубиной компенсации принять  $T+h'$  и допустить разную плотность под равниной и горами, т.е. с дополнением построениями по Пратту-Хейфорду. Известно, что аномалии в свободном воздухе (Фая) и аномалии Буге можно рассматривать как предельные случаи изостатических аномалий при глубинах компенсации нуль и бесконечность соответственно. Обязательным показателем наличия изостатической компенсации является то, что аномалии в свободном воздухе в данной области положительны, а аномалии Буге – отрицательны.

Анализируя результаты для Горного Алтая в редукции Буге и Фая (см. рис. 5; рис. 10), следует сказать, что в целом территория Горного Алтая находится в равновесии, т.е. изостатически скомпенсирована. Значения силы тяжести в редукции Буге с севера на юг увеличиваются и отрицательны, а распределение значений в редукции Фая носят мозаичный характер, при этом средние значения аномалии Фая по широтным профилям (рис. 10, 11) составляют по 51-му градусу: +14.5 мГал; по 50-му градусу: +21.5 мГал; по 49-му градусу: +49.8 мГал. По профилю (см. рис. 6, 10) от точки с координатами 51.5° с.ш., 86.0° в.д. до точки 49° с.ш., 88.5° в.д. среднее значение составляет +28.8 мГал, т.е. условие аномалии Буге отрицательны, а Фая – положительны в целом соблюдается, и район можно признать изостатически скомпенсированным. Изостатическое

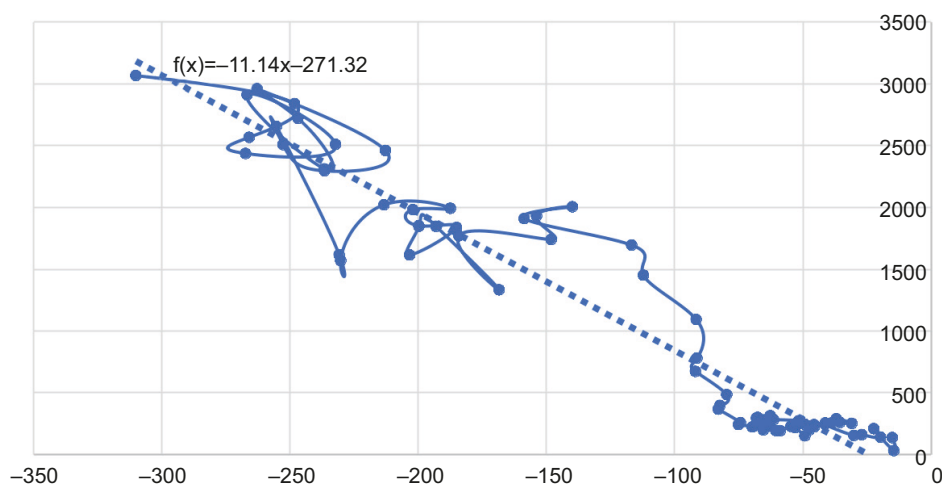
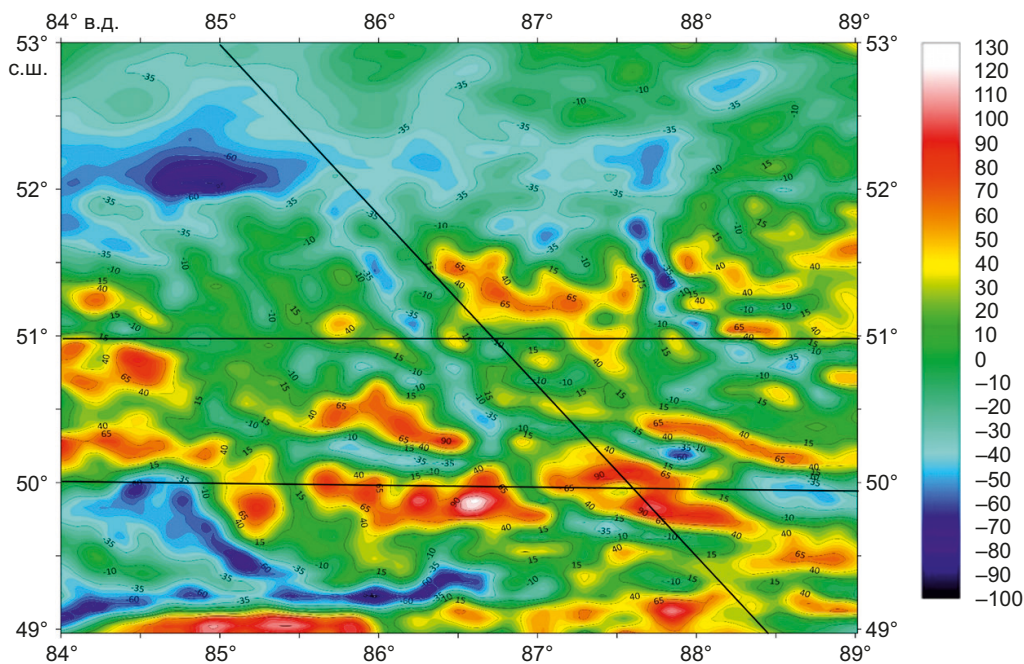


Рис. 9. Корреляция высоты пунктов Горного Алтая (от равнины до высот выше 3000 м) и аномалий в редукции Буге в миллигалах по линии профиля, приведенного на рис. 6.

Fig. 9. Correlation between the height of the Altai Mountains sites (from the lowland to the altitudes higher than 3000 m) and Bouguer anomaly reduction in milligals along the profile line shown in Fig. 6.

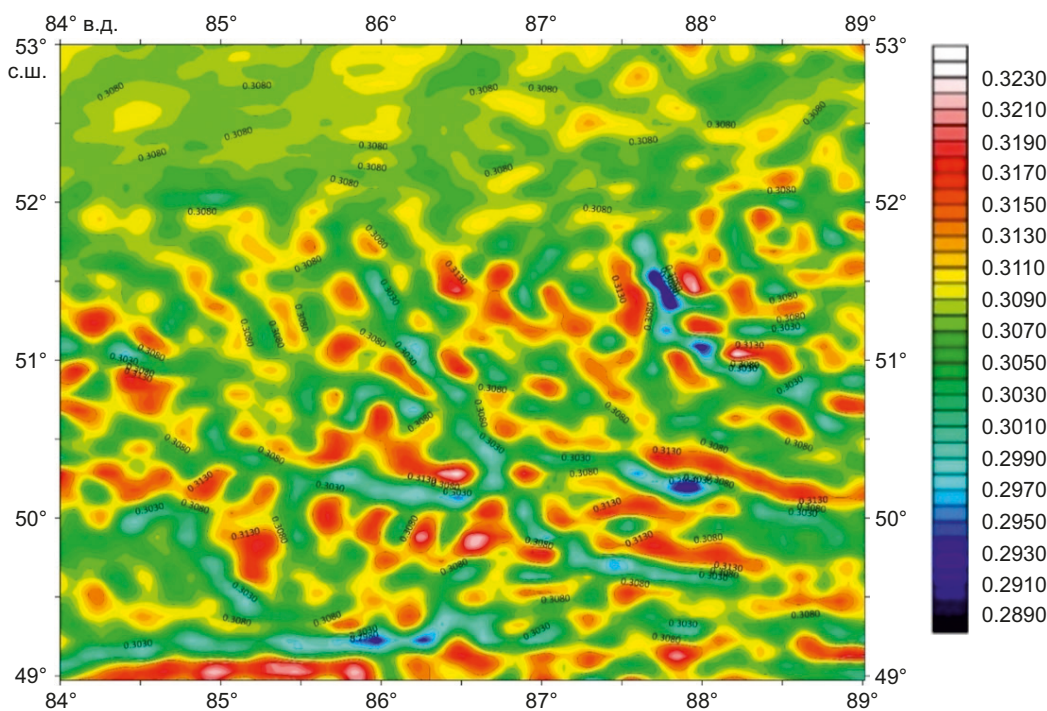


**Рис. 10.** Аномалия силы тяжести в редукции Фая в миллигалах для Горного Алтая и его северных предгорий по модели EIGEN-6C4. Изменения от +130 до -100 мГал.

Точками отмечено расположение пунктов наземных измерений силы тяжести и координат. Широта от 53 до 49°, долгота от 84 до 89°. Показаны широтные профили по 51, 50, 49° с.ш. и линейный профиль от точки с координатами: 53° с.ш., 85° в.д. до точки 49° с.ш., 88.5° в.д.

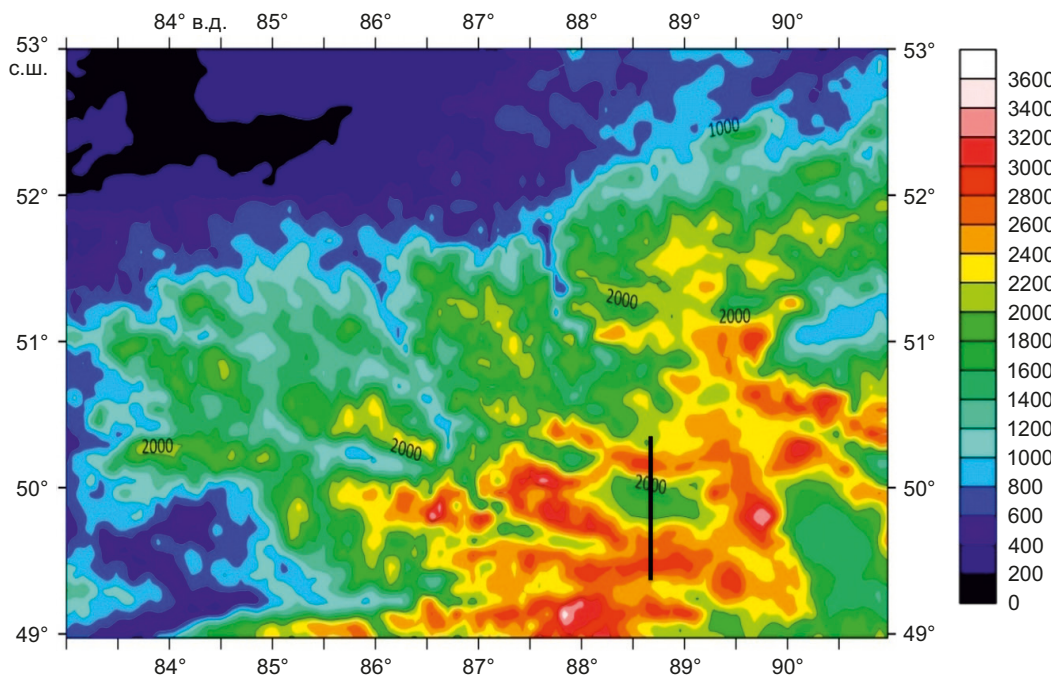
**Fig. 10.** EIGEN-6C4 Faye gravity anomaly reduction in milligals for the Altai Mountains and their northern foothills. The changes occur in the range from +130 to -100 mGal.

The dots indicate the location of the ground-based gravity measurement sites and coordinates. The latitude ranges from 53 to 49°, the longitude - from 84 to 89°. There are shown the latitudinal profiles along 51, 50, 49° N and the linear profile from 53° N, 85° E to 49° N, 88.5° E.



**Рис. 11.** Вертикальный градиент значения силы тяжести по модели EIGEN-6C4 для Горного Алтая и северных предгорий, изменения от 0.288 до 0.326 мкГал/м. Широта от 53 до 49°, долгота от 84 до 89°.

**Fig. 11.** EIGEN-6C4 vertical gravity gradient for the Altai Mountains and their northern foothills. The changes occur in the range from 0.288 to 0.326 mcGal/m. The latitude ranges from 53 to 49°, the longitude - from 84 to 89°.

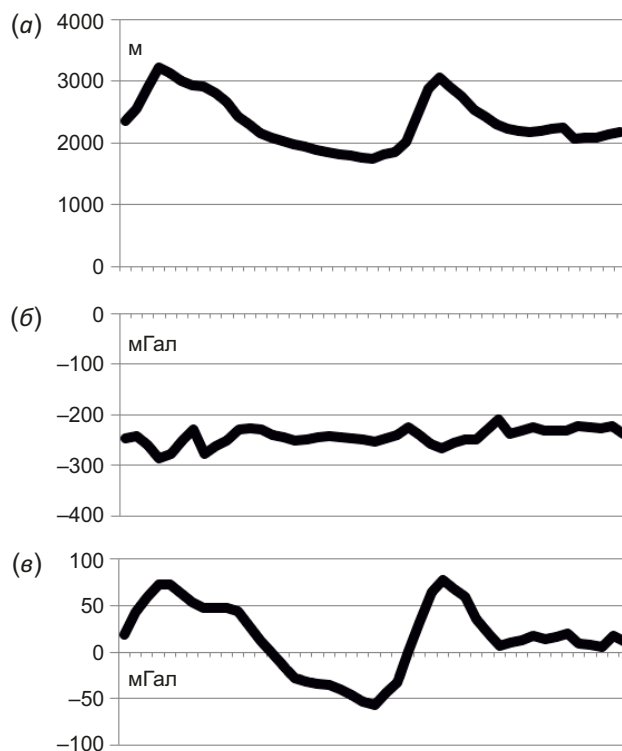


**Рис. 12.** Топографическая высотная модель ETOPO1 в метрах. Широта от 49 до 53°, долгота от 83 до 92°. Вертикальная линия пересекает Чуйскую впадину с юга на север.

**Fig. 12.** ETOPO1 Global Relief Model in meters. The latitude ranges from 49 to 53°, the longitude – from 83 to 92°. The vertical line intersects the Chuya basin from south to north.

равновесие Горного Алтая подтверждается отсутствием ярко выраженной аномалии в высотах квазигеоида, построенного по спутниковым данным [Goldobin, 2019a], и линейным характером связи высот рельефа и аномалий Буге (см. рис. 8).

Ситуация может быть другой на отдельных небольших участках территории Горного Алтая, в частности в районах межгорных впадин. Известно, что сейсмический разрыв земной поверхности, возникший в результате Чуйского землетрясения, находится на границах Курайской и Чуйской впадин. Глубина границы Мохо по нашим оценкам здесь достигает 50 км (см. рис. 7). В этих межгорных долинах аномалии Фая и Буге отрицательны. Здесь имеет место нарушение равновесия и межгорные впадины являются нескомпенсированными (рис. 12, 13). Возможно, это отражение постледниковых процессов, результаты которых представлены на территории широких межгорных впадин Алтая моренными отложениями. Известны и данные по мощности осадочных пород, слагающих Чуйскую впадину Горного Алтая, они изменяются от метров до 1 км [Chernov et al., 1988]. Нарушения равновесия отражаются в интенсивности неотектонических движений. Высокая сейсмичность Горного Алтая согласуется с большими амплитудами вертикальных движений в неоген-четвертичное время по Курайскому разлому, ограничивающему Курайскую впадину. Здесь они достигают 2500 м [Devyatkin, 1965]. Косейсмические горизонтальные смещения при Чуйском землетрясении (27.09.2003 г., M=7.3–7.5) достигали 2 м на сейсмическом разрыве и сантиметров на расстоянии 100 км



**Рис. 13.** Профиль через Чуйскую впадину длиной 135 км по меридиану 88.6 в.д. и от 49.4 до 50.6° с.ш. (см. рис. 9). (а) – изменение высоты в метрах; (б) – вариации аномалии Буге в миллигалах; (в) – вариации аномалии Фая в миллигалах.

**Fig. 13.** A 135 km long profile across the Chuya basin along the meridian at a longitude of 88.6° E and from 49.4 to 50.6° N (see Fig. 9). (a) – change of height in meters; (б) – Bouguer anomaly variations in milligals; (в) – Faye anomaly variations in milligals.



[Nazarian et al., 2008; Timofeev et al., 2019]. Вертикальные смещения достигали максимума в области окончания разрыва и составляли несколько сантиметров.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые результаты наземных измерений в районах Горного Алтая, полученные методами абсолютной лазерной гравиметрии и космической геодезии, исследовались совместно с данными гравиметрических карт (масштаб 1:1000000) и спутниковой моделью геопотенциала EIGEN-6C4 (с моделью рельефа ETOPO1). Проанализированы гравиметрические карты, построенные по материалам наземных измерений в 60-е годы прошлого столетия. Получены отличия, связанные с изменением Потсдамской системы и системы высот. Впервые по гравиметрической модели EIGEN-6C4 в редукции Буге построена карта распределения глубин по поверхности Мохоровичича в Горном Алтае. Получено изменение мощности земной коры по профилю длиной 800 км, простирающемуся с северо-запада на юго-восток изучаемой территории (Новосибирск – юг Западно-Сибирской низменности – плато Укок, Горный Алтай). Глубина границы Мохо по профилю меняется от 40 до 51 км. Мощность земной коры для территории Горного Алтая изменяется с севера на юг от 44 до 51 км. Ошибка, связанная с оценкой плотности земной коры, может достигать 2 км. Сделан анализ спутниковой модели в редукциях Буге и Фая на предмет изостатического равновесия территории Горного Алтая. Эпицентральная зона Чуйского землетрясения (27.09.2003 г.,  $M=7.3-7.5$ ) и область сейсмического разрыва, проходящего по краю Курайской и Чуйской долин, выделяется мощной корой в 50 км. Курайская и Чуйская межгорные впадины по данным спутниковых гравиметрических миссий являются изостатически нескомпенсированными, что может быть связано с составом и структурой верхней части разреза долин. Современные модели гравитационного поля активно и плодотворно применяются в геологических построениях [Dobretsov et al., 2016, 2017, 2021], при этом в основном используются построения в редукции Фая, хорошо отражающие морфологию региона. Нами в настоящей работе для изучения границы Мохо использована редукция Буге, поле при этом плавно изменяется с севера на юг с исключением влияния небольших приповерхностных геологических структур.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

Alekseev A.S., Glinsky B.M., Geza N.I., Emanov A.F., Kashun V.N., Kovalevsky V.V., Manstein A.K., Seleznev V.S. et al., 2004. Active Seismology with Powerful Vibration Sources. GEO, Novosibirsk, 350 p. (in Russian) [Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геца Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Селезнев В.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: Гео, 2004. 350 с.]

Arefiev S.S., Aptekman Zh.Ya., Bykova V.V., Matveev I.V., Mikhin A.G., Molotkov S.G., Pletnev K.G., Pogrebchenko V.V., 2006. The Source and Aftershocks of the Altai (Chuya) Earthquake of 2003. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 42, 167–177. <https://doi.org/10.1134/S1069351306020091>.

Arnautov G.P., 2005. Results of International Metrological Comparison of Absolute Laser Ballistic Gravimeters. *Avtometria* 41 (1), 126–136 (in Russian) [Арнаутов Г.П. Результаты международных метрологических сравнений абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автметрия. Т. 41. № 1. С. 126–136].

Arnautov G.P., Kalish E.N., Smirnov M.G., Stus' Yu.F., Tarasyuk V.G., 1994. Laser Ballistic Gravimeter GABL-M and Gravity Observation Results. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 3, 3–11.

Bune V.I., Gorshkov G.P. (Eds), 1980. Seismic Zoning of the USSR: Methodological Basis and Regional Description of the Map of the 1978. Nauka, Moscow, 308 p. (in Russian) [Сейсмическое районирование территории СССР: Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.]

Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L.V., Fujiwara I., Iwata K., de Grave I., Semakov N.N., Travin A.V., Kir'yanova A.P., Kokh D.A., 2003. Role of Strike-Slip Faults in Late Paleozoic – Early Mesozoic Tectonics and Geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan Folded Zone. *Russian Geology and Geophysics* 44 (1–2), 49–75.

Chernov G.A., Vdovin V.V., Okishev P.A., Petkevich M.V., Mistryukov A.A., Zyatkova L.A., Milyaeva L.S., 1988. Relief of the Altai-Sayan Mountain Range. Nauka, Novosibirsk, 206 p. (in Russian) [Чернов Г.А., Вдовин В.В., Окишев П.А., Петкевич М.В., Мистрюков А.А., Зяткова Л.А., Милеева Л.С. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1988. 206 с.]

Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E., 2013. Basin Evolution in a Folding Lithosphere: Altai-Sayan and Tien Shan Belts in Central Asia. *Tectonophysics* 602, 194–222. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.010>.

Devyatkin E.V., 1965. Cenozoic Deposits and Neotectonics of the Southeastern Altai. Nauka, Moscow, 244 p. (in Russian) [Девяткин Е.В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. М.: Наука, 1965. 244 с.]

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D., 1996. Meso- and Cenozoic Tectonics of the Central Asian Mountain Belt: Effects of Lithospheric Plate

Interaction and Mantle Plume. *International Geology Review* 38 (5), 430–466. <https://doi.org/10.1080/00206819709465345>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vasilevsky A.N., Vetrov E.V., Nevedrova N.N., 2016. Cenozoic History of Topography in Southeastern Gorny Altai: Thermochronology and Resistivity and Gravity Records. *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1525–1534. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.001>.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vasilevskiy A.N., Zhmodik S.M., Kotlyarov A.V., 2021. First Results and Prospects of a New Approach to the Study of Active Geologic Processes by Space and Ground Instrumental Measurements (by the Example of Kamchatka and the Central Asian Orogenic Belt). *Russian Geology and Geophysics* 62 (1), 44–67. <https://doi.org/10.2113/RGG20204227>.

Dobretsov N.L., Vasilevsky A.N., Buslov M.M., Rubanova E.S., Kulikova A.V., Bataleva E.A., 2017. Middle-Late Paleozoic Geodynamic Complexes and Structure of Gorny Altai and Their Record in Gravity Data. *Russian Geology and Geophysics* 58 (11), 1277–1288. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.12.012>.

England P., Molnar P., 1997. Active Deformation of Asia: From Kinematics to Dynamics. *Science* 278 (5338), 647–650. <https://doi.org/10.1126/science.278.5338.647>.

Filina A.G., 1997. Earthquakes in the Altai and Sayan Mountains. In: *Earthquakes in the USSR in 1991*. Nauka, Moscow, p. 35–36 (in Russian) [Филина А.Г. Землетрясения Алтая и Саян // Землетрясения в СССР в 1991 г. М.: Наука, 1997. С. 35–36].

Fotiadi E.E., 2007. Regional Geophysical Studies of the Platform and Folded Areas of Russia. Selected Works IPGG SB RAS. Vol. 1. GEO, Novosibirsk, 353 p. (in Russian) [Фотиади Э.Э. Региональные геофизические исследования платформенных и складчатых областей России. Избранные труды ИНГГ СО РАН. Новосибирск: Гео, 2007. Т. 1. 353 с.].

Förste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R., 2014. EIGEN-6C4 The Latest Combined Global Gravity Field Model Including GOCE Data up to Degree and Order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.

Goldobin D.N., 2019a. Determination of Geometric Structure of Gravitation Field on the Territory of Western Siberia on the Data of Modern Global Geopotential Models. *Vestnik of SSUGT* 24 (2), 19–34 (in Russian) [Голдобин Д.Н. Определение геометрической структуры гравитационного поля на территории Западной Сибири по данным современных глобальных моделей геопотенциала // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24. № 2. С. 19–34]. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-2-19-34>.

Goldobin D.N., 2019b. Development of the Comprehensive Method to Determine the Characteristics of Gravitational Field from the Global Geopotential Model. PhD Thesis (Candidate of Technical Sciences). Novosibirsk, 201 p. (in Russian) [Голдобин Д.Н. Разработка методики комплексного определения характеристик гравитационного

поля по данным глобальных моделей геопотенциала: Дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2019. 201 с.].

Goldobin D.N., Mazurova E.M., Kanushin V.F., Ganagina I.G., Kosarev N.S., Kosareva A.M., 2015. One-Dimensional Spherical Fourier Transformation and Its Implementation for the Calculation of the Global Model Quasigeoid with Accuracy of the Zero Approach of Molodensky's Theory. *Vestnik of SSUGT* 31 (3), 45–52 (in Russian) [Голдобин Д.Н., Мазурова Е.М., Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Косарев Н.С., Косарева А.М. Одномерное сферическое преобразование Фурье и его реализация для расчета глобальной модели квазигеоида в нулевом приближении теории Молоденского // Вестник СГУГиТ. 2015. Т. 31. № 3. С. 45–52].

Gol'din S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Novikov I.S., Vysotskii E.M., Fateev A.V., Kolesnikov Yu.I., Podkorytova V.G., Leskova E.V., Yarygina M.A., 2004. The Chuya Earthquake and Its Aftershocks. *Doklady Earth Sciences* 395 (3), 394–396.

Gravimetric Map of the USSR and MPR (Gorno-Altaysk) in the Bouguer Reduction (Density 2.3 g/cm<sup>3</sup>) 1:1000000, 1968. TsNIIGAiC, Moscow (in Russian) [Гравиметрическая карта СССР и МНР (Горно-Алтайск) в редукции Буге (плотность 2.3 г/см<sup>3</sup>) 1:1000000. М.: ЦНИИГАИК, 1968].

Grushinsky N.P., 1983. *Fundamental Steps in Gravimetry*. Nauka, Moscow, 352 p. (in Russian) [Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. М.: Наука, 1983. 352 с.].

Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Kosarev N.S., Kosareva A.M., 2016. The Influence of Regularization Methods on the Accuracy of Modern Global Geopotential Models. *Gyroscopy and Navigation* 7 (4), 337–342. <https://doi.org/10.1134/S2075108716040040>.

Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Mazurova E.M., Kosareva A.M., Kosarev N.S., 2014. Comparison of the GOCE Project Satellite Models with Different Sets of Independent Terrestrial Gravimetry Data. *Vestnik of SSUGT* 3 (27), 21–35 (in Russian) [Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Мазурова Е.М., Косарева А.М., Косарев Н.С. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных // Вестник СГУГиТ. 2014. Вып. 3 (27). С. 21–35].

Kanushin V.F., Karpik A.P., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Kosareva A.M., Kosarev N.S., 2015. Study of the Present-Day Global Gravitational Models of the Earth. *SSUGT, Novosibirsk*, 270 p. (in Russian) [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. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. 270 с.].

Karpik A.P., Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Kosarev N.S., Kosareva A.M., 2016. Evaluation of Recent Earths Global Gravity Field Models with Terrestrial Gravity Data. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 46 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1515/congeo-2016-0001>.

Karpik A.P., Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N., Mazurova E.M., 2014. Studies of Spectral Characteristics of CHAMP, GRACE, and GOCE Global Gravity Field Models.

Gyroscopy and Navigation 4 (87), 34–44 (in Russian) [Карпик А.П., Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Мазурова Е.М. Исследование спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (87). С. 34–44]. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2014.22.4.034-044>.

Krylov S.V., 2006. Seismic Study of the Lithosphere of Siberia. Selected Works. GEO, Novosibirsk, 345 p. (in Russian) [Крылов С.В. Сейсмические исследования литосферы Сибири: Избранные труды. Новосибирск: Гео, 2006. 345 с.].

Ladynin A.V., 1970. Mountain Isostasy in the South of Siberia and Its Relationship with Deep Structure and Neotectonics. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 190 p. (in Russian) [Ладынин А.В. Особенности изостазии горных областей юга Сибири и их связь с глубинным строением и новейшей тектоникой: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1970. 190 с.].

Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision. *Science* 189 (4201), 419–426.

Mudretsova E.A., Veselov K.E. (Eds), 1990. Gravity Survey. Handbook of Geophysics. Nedra, Moscow, 607 p. (in Russian) [Гравиразведка. Справочник геофизика / Ред. Е.А. Мудрецова, К.Е. Веселов. М.: Недра, 1990. 607 с.].

Nazarian A.N., Mikhailov V.O., Kisseleva Ye.A., Smolyaninova Ye.I., Timoshkina Ye.P., Diaman M., Shapiro N., 2008. The Use of Differential Satellite Interferometry While Earth Crust Deformations Studies: Chuisk Earthquake, September 27, 2003. *Geophysics* 5, 69–75 (in Russian) [Назарян А.Н., Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П., Диаман М., Шапиро Н. Применение метода дифференциальной спутниковой интерферометрии для изучения деформаций земной поверхности на примере Алтайского землетрясения 27.09.2003 // Геофизика. 2008. № 5. С. 69–75].

New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times to 1975, 1977. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.].

Robertsson L., Francis O., vanDam T.M., Faller J., Ruess D., Delinte J.-M., Vitushkin L., Liard J. et al., 2001. Results from the Fifth International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG'97. *Metrologia* 38 (1), 71–78. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/1/6>.

Shako R., Förste C., Abrikosov O., Bruinsma S., Marty J., Lemoine J., Flechtner F., Neumayer H., Dahle C., 2014. EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model Including GOCE Data. In: F. Flechtner, N. Sneeuw, W.D. Schuh (Eds), *Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions. Advanced Technologies in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 155–161. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32135-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32135-1_20).

Solovjev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Liseikin A.V., Galeva N.A., 2018. Deep Seismic Structure of the Altai-Sayan

Folded Area. In: E.A. Rogozhin, L.I. Nadezhka (Eds), *Results of the Integrated Study of the Largest Altai (Chuya) Earthquake of 2003 as One of the Major Seismic Events of the XXI Century in Russia. Proceedings of the XXI Scientific and Practical Shchukin Conference with International Participation (October 1–4, 2018, Moscow)*. IPhE RAS, Moscow, p. 363–368 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Лисейкин А.В., Галева Н.А. Глубинное сейсмическое строение Алтае-Саянской складчатой области // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием (1–4 октября 2018 г., Москва) / Ред. Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2018. С. 363–368].

Solovjev V.M., Seleznev V.S., Liseikin A.V., Zhemchugova I.V., 2005. Earth's Crust and Upper Mantle of the Altai-Sayan Region Obtained by Areal Seismological Observation Systems. *NNC RK Bulletin* 2, 101–108 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Жемчугова И.В. Земная кора и верхняя мантия Алтае-Саянского региона по данным площадных сейсмологических систем наблюдений // Вестник ИФЗ РАН. 2005. Вып. 2. С. 101–108].

Solovjev V.M., Seleznev V.S., Zhemchugova I.V., Liseikin A.V., 2000. Deep Structure of the Altai-Sayan Region from the Data on the Areal Seismological Observation Systems. In: *Seismology in Siberia at the Turn of the Millennium. Proceedings of the International Geophysical Conference (September 27–29, 2000)*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 222–228 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Жемчугова И.В., Лисейкин А.В. Глубинное строение Алтае-Саянского региона по данным площадных сейсмологических систем наблюдений // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий: Материалы международной геофизической конференции (27–29 сентября 2000 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 222–228].

Starovoit O.E., Chepkunas L.S., Gabsatarova I.P., 2003. Parameters of the September 27, 2003 Altai Earthquake from the Instrumental Data. *Herald of the Earth Sciences Department of RAS* 1 (21), 1–11 (in Russian) [Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П. Параметры землетрясения 27 сентября 2003 года на Алтае по инструментальным данным // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2003. № 1 (21). С. 1–11].

Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V., Boiko E.V., 2019. Modern Movements of the Crust Surface in Gorny Altai from GPS Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (1), 123–146 (in Russian) [Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В. Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 1. С. 123–146]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0407>.

Trifonov V.G. (Ed.), 1986. *Map of Active Faults of the USSR and Adjacent Areas, Scale 1:8000000*. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow–Irkutsk (in Russian) [Карта активных разломов СССР и сопредельных



территорий. Масштаб 1:8000000 / Ред. В.Г. Трифонов. М.-Иркутск: АН СССР, 1986].

Zhalkovsky N.D., 1988. The Earthquake Recurrence Law and Some of Its Consequences (Preprint 21). Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, 29 p. (in Russian) [Жалковский Н.Д. Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия (препринт, № 21). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1988. 29 с.].

Zharkov V.N., 1978. Internal Structure of Earth and Other Planets. Nauka, Moscow, 192 p. (in Russian) [Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. 192 с.].

Zorin Yu.A., 1971. Neo-Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Adjacent Areas. Nauka, Moscow, 168 p. (in Russian) [Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М.: Наука, 1971. 168 с.].