

В. Ф. Канушин¹, Д. Н. Голдобин¹, Н. Н. Кобелева^{1}, И. В. Зверев¹,*

Квазигеоид как индикатор напряжений в теле Земли

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Аннотация. Глобальные модели гравитационного поля Земли (ГПЗ), созданные по данным современных космических гравиметрических миссий, позволяют исследовать тектонические процессы с высокой детализацией и точностью. Использование этих моделей помогает выявлять малые и крупные тектонические структуры, анализировать динамику литосферы и понимать механизмы, лежащие в основе землетрясений, вулканической активности и других геодинамических явлений. Тектонические движения, происходящие как на глобальном, так и на региональном уровне, оказывают значительное влияние на формирование рельефа, распределение напряжений в земной коре и развитие геологических структур. В работе рассмотрена возможность использования глобальных моделей ГПЗ для исследования разномасштабных тектонических движений, которые проявляются в геофизических и геодинамических процессах, и для обнаружения потенциальных очагов напряжений в литосфере. Для этого были созданы модели гравитационного поля Земли путем суммирования сферических гармоник в ограниченном волновом диапазоне. Приведены результаты, где было установлено, что в интервалах частот от 55 до 85 и от 80 до 120, наблюдается связь очагов землетрясений с локализациями спектрозональных моделей высот квазигеоида.

Ключевые слова: геоид, квазигеоид, сферические гармоники, тектоника, литосфера, спектральное окно

V. F. Kanushin¹, D. N. Goldobin¹, N. N. Kobeleva^{1}, I. V. Zverev¹*

Quasigeoid as an indicator of stress in the Earth's body

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Abstract. Global models of the Earth's gravitational field (EGF), created using data from modern space gravimetric missions, make it possible to study tectonic processes with high detail and accuracy. The use of these models helps identify small and large tectonic structures, analyze lithospheric dynamics, and understand the mechanisms underlying earthquakes, volcanic activity, and other geodynamic phenomena. Tectonic movements occurring both at the global and regional levels have a significant impact on the formation of relief, the distribution of stresses in the earth's crust and the development of geological structures. The paper examines the possibility of using global EGF models to study multi-scale tectonic movements that manifest themselves in geophysical and geodynamic processes and to detect potential sources of stress in the lithosphere. For this purpose, models of the Earth's gravitational field were created by summing spherical harmonics in a limited wave range. The results are presented in which it was established that in the frequency intervals from 55 to 85, from 80 to 120, there is a connection between earthquake sources and localizations of spectrozonal models of quasigeoid heights.

Keywords: geoid, quasi-geoid, spherical harmonics, tectonics, lithosphere, spectral window

Введение

Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры является одной из ключевых задач геофизики и геодинамики. Тектонические движения, вулканическая активность, землетрясения и другие геологические процессы оказывают значительное влияние на напряжения в земной коре. Традиционные методы мониторинга предоставляют важные данные о деформациях и перемещениях земной поверхности. Особое внимание в последнее десятилетие уделено наиболее перспективному и новому виду наблюдений – спутниковой градиентометрии с использованием низкоорбитальных спутников, что позволило на порядок повысить точность и разрешающую способность моделей глобального квазигеоида [1–3].

Глобальный квазигеоид, как фигура демонстрирующая распределение плотности в теле планеты, имеет поверхность, на которой наблюдается закономерное чередование подъемов и спадов разного масштаба, являющееся следствием как волнового коробления планеты в связи с ее движением по эллиптической кеплеровской орбите с периодически меняющимися ускорениями, так и следствием волнообразно чередующихся положительных и отрицательных разновозрастных структур в строении литосферы Земли. Такой волновой характер структурообразующих тектонических сил обуславливает периодическое изменение ее напряженного состояния [4–6].

Методы и материалы

Новые высокостепенные глобальные модели геоида, обладающие высокой разрешающей способностью и точностью, позволяют выявить тонкие особенности тектонической структуры Земли, которые раньше не проявлялись в глобальных спутниковых моделях. Эти особенности являются следствием различных геофизических процессов в активных тектонических зонах [7]. В данном исследовании гравитационная модель GECO используется для анализа ундуляции квазигеоидов как индикаторов напряжения в теле Земли.

Представление гравитационных полей Земли суммой сферических гармоник [4] позволяет получить их математические модели, отнесенные к ограниченному зонам волнового диапазона от степени $n = N_1$ до $n = N_2$ путем суммирования гармоник лишь из этого диапазона.

В данной работе используется алгоритм и программа разработанные на кафедре космической и физической геодезии В. Ф. Канушиным и Д. Н. Голдобиным, в которых предлагается путем последовательного объединения гармоник в отдельную группу образовать спектральное окно, действующее в качестве полосового фильтра пропускания низких или высоких гармоник от степени $n = N_1$ до $n = N_2$

$$\Delta\zeta(\varphi, \lambda) = R \sum_{n=N_1}^{N_2} \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

где φ, λ – сферические координаты пункта на физической поверхности Земли;
 a_e – большая полуось эллипсоида;
 r – радиус -вектор пункта;
 n и m – номер степени и порядка разложения соответственно;
 $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – полностью нормированный присоединенный полином Ле-жандра;
 $\Delta\bar{C}_{nm}, \Delta\bar{S}_{nm}$ – разности коэффициентов нормированных сферических функций реального и нормального полей, рассчитываются по формуле

$$\Delta\bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0, \Delta\bar{S}_{nm} = \bar{S}_{nm} - \bar{S}_{nm}^0. \quad (2)$$

При вычислении по формуле (2) коэффициент нормального геопотенциала \bar{C}_{nm}^0 отнесен к эллипсоиду WGS-84, а $\bar{S}_{nm}^0 = 0$.

Размах окна гармоник от степени N_1 до $n = N_2$ подбирается так, чтобы результат был сосредоточен на фактическом гравитирующем источнике. Полезной информацией считается такая, у которой энергия окна гармоник выше уровня шума гравитационного поля. Суммироваться может любой конечный набор сферических гармоник, если представление физического поля в таком виде имеет смысл. Такую модель гравитационного поля Земли можно рассматривать как результат действия на реальное поле полосового фильтра, пропускающего энергию поля в заданном диапазоне частот. Этот диапазон частот называют спектральным окном, а отрезок ряда, находящийся в спектральном окне, называют спектральной моделью гравитационного поля [8–11].

Манипулируя шириной спектрального окна, можно получить данные о характере пространственного распределения гравитационного поля в заданном диапазоне частот. Построение спектральных моделей аномалий силы тяжести позволяет осуществить разделение поля на составные части в координатной области по информации в волновой области, и тем самым позволяет выделять составляющие поля разного геологического происхождения [12].

Результаты

Для получения результатов были определены спектральные окна при разных степенях от $N_1=30$ до $N_2=60$, от $N_1=35$ до $N_2=100$, от $N_1=40$ до $N_2=70$, от $N_1=45$ до $N_2=100$, от $N_1=50$ до $N_2=90$, от $N_1=55$ до $N_2=85$, от $N_1=80$ до $N_2=120$, от $N_1=90$ до $N_2=150$, по гармоническим коэффициентам геопотенциала модели GECO. На рисунке 1 приведен фрагмент одной из спектральных моделей поля высот квазигеоида, построенной в частотном диапазоне $80 \leq N \leq 120$. В данном случае наблюдается корреляция с напряжениями земной коры и видно, как землетрясения попадают в градиентную зону, между поднятием и опусканием геоида.

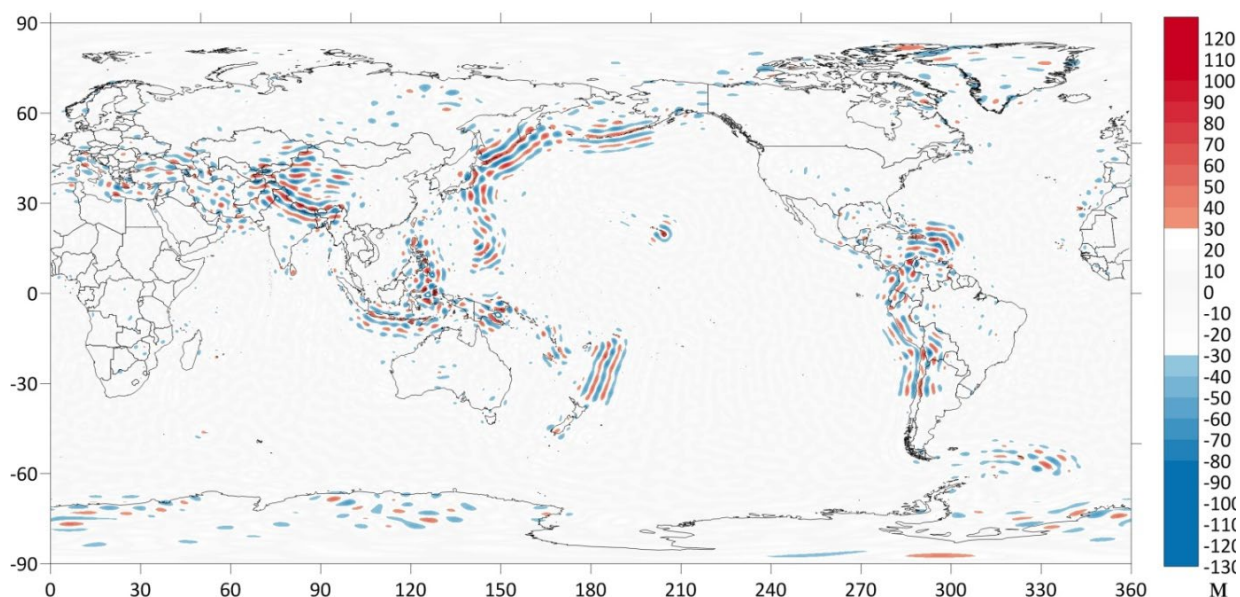


Рис. 1. Картограмма спектрального квазигеоида в диапазоне $80 \leq N \leq 120$

Анализируя спектральную модель, можно сделать вывод, о том, что модели гравитационного поля Земли возможно использовать для изучения вертикальных движений земной коры, определения напряженного состояния литосферы и сейсмической активности территорий.

Для выявления зон изменения высот спектрального геоида использовались первые производные его поверхности в заданной полосе частот.

При получении первых производных использовалось численное дифференцирование. Численные значения первых производных преобразовывались для разных спектральных поверхностей, построенных при степенях от $N_1=30$ до $N_2=60$, от $N_1=35$ до $N_2=100$, от $N_1=40$ до $N_2=70$, от $N_1=45$ до $N_2=100$, от $N_1=50$ до $N_2=90$, от $N_1=55$ до $N_2=85$, от $N_1=80$ до $N_2=120$, от $N_1=90$ до $N_2=150$ в один числовой диапазон, и по полученным значениям выполнялось определение попадания сейсмического события в зону.

На рисунке 2 приведена картограмма первых производных от спектрального квазигеоида при степени от $N_1=55$ до $N_2=85$, на ней наблюдается сильная корреляция с напряжениями земной коры. Это дает возможность определить зоны напряженного состояния земной коры.

Количество попаданий сейсмических событий в зоны первых производных определены с помощью программного обеспечения Excel. Результаты активности сейсмических событий в спектральных зонах на разных глубинах представлены в таблице 1.

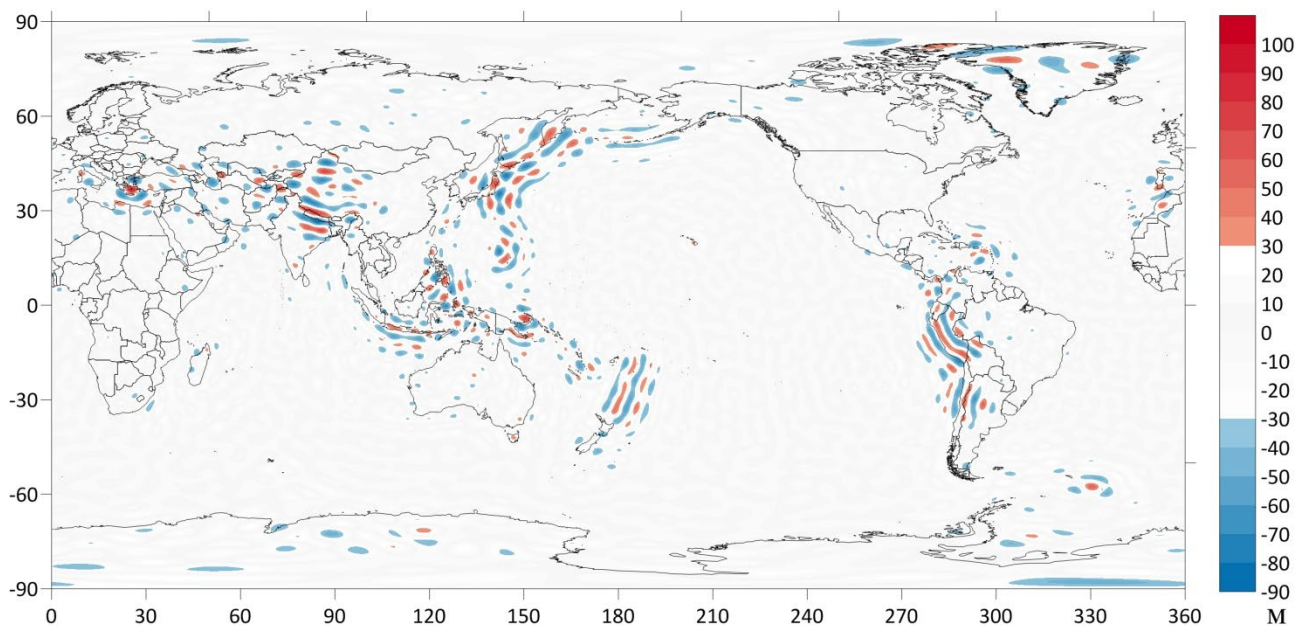


Рис. 2. Картограмма первой производной спектрального квазигеоида в диапазоне $55 \leq N \leq 85$

Таблица 1

Результаты сейсмоактивности

Диапазон гармоник Диапазон глубин гипоцентров, км	30-60	35-100	40-70	45-100	50-90	55-85	80-120	90-150
10-50	290	650	426	625	620	641	410	322
51-100	243	377	349	379	345	362	237	211
101-200	232	284	250	276	248	281	238	174
201-300	48	52	63	45	42	56	49	25
301-400	18	6	20	12	19	22	12	10
401-800	121	20	109	24	45	90	50	12
Сумма	952	1389	1217	1361	1319	1452	996	754

На рисунке 3 представлен численный график сейсмоактивности.

Приведенные в таблицах 1 и на рисунке 3 данные указывают на то, что на частоте $N=$ от 55 до 85 наблюдается наибольшее количество попаданий в зону первой производной спектрального квазигеоида.

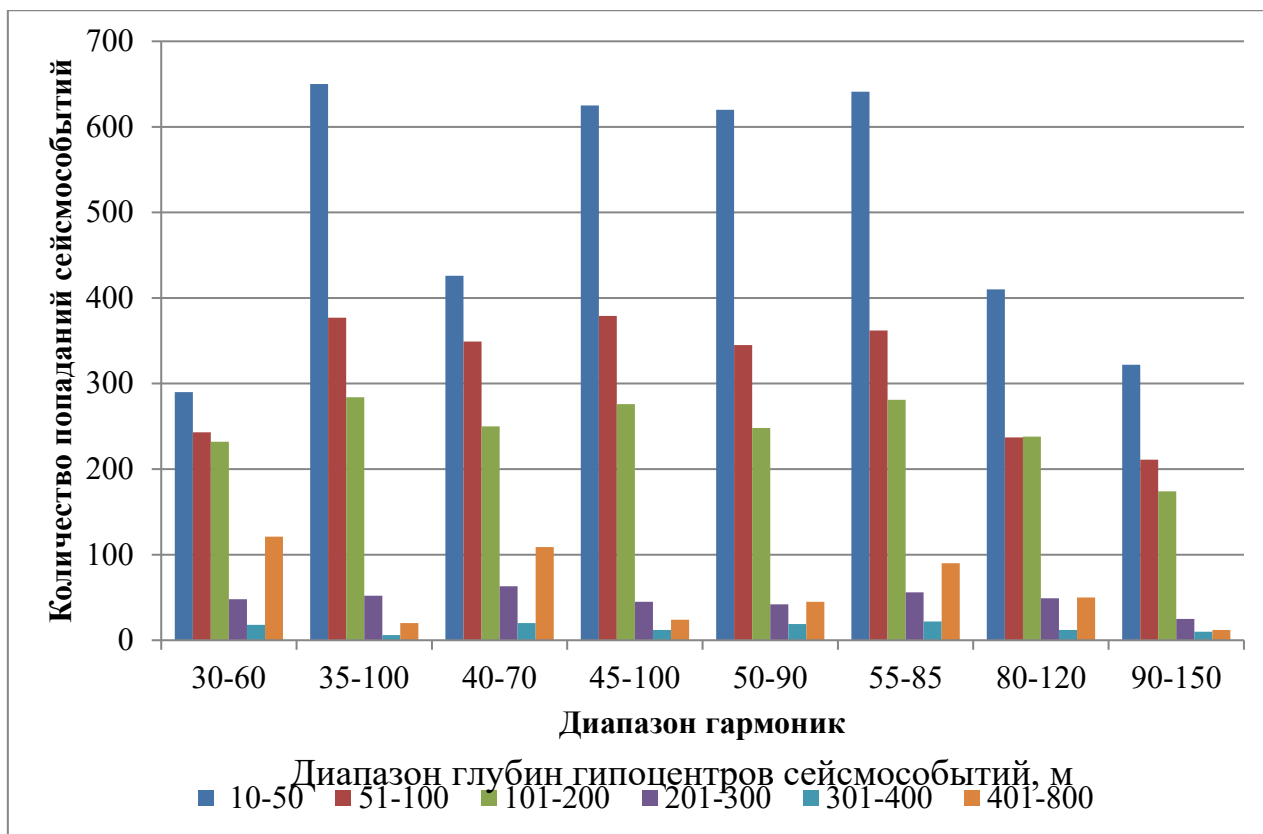


Рис. 3. Численный график сейсмоактивности

Заключение

Исследование связи между гравитационным полем и очагами тектонической активности представляет собой важное направление в геофизике и геодезии, способное значительно расширить наши знания о внутренней структуре и динамике Земли. Анализ данных, полученных с помощью современных космических гравиметрических миссий позволяет выявлять аномалии в гравитационном поле, которые коррелируют с зонами повышенной тектонической активности.

В данной работе получены спектрзональные модели аномального гравитационного поля Земли в сейсмически активной зоне. Выполнен анализ связи эпицентров землетрясений со спектрзональными высотами квазигеоида. Установлено, что в интервалах частот, $N=$ от 55 до 85, $N=$ от 80 до 120, что соответствует расположению гипоцентров землетрясений в астеносфере и верхней мантии, наблюдается связь очагов землетрясений с локализациями спектрзональных высот квазигеоида.

Таким образом, использование спектрзональных моделей глобального гравитационного поля Земли, полученных по результатам современных космических гравиметрических миссий, является перспективным, для исследования разномасштабных тектонических движений, которые проявляется в геофизических и геодинамических процессах, и для обнаружения потенциальных очагов напряжений земной коры.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-2» с целью создания высокоточных моделей геопотенциального поля Земли и его характеристик на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Мазурова Е.М., Косарев Н.С., Косарева А. М. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность // Вестник СГУГиТ – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–49.
2. Канушин В.Ф., Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарев Н.С., Косарева А. М. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
3. Канушин В.Ф., Голдобин Д.Н., Кобелева Н.Н. Исследование точности глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 на территории Российской Федерации// Вестник СГУГиТ, Т. 28, №3, 2023. – С. 16 – 22.
4. Канушин, В.Ф. Современные проблемы физической геодезии [Текст]: учебное пособие/ В.Ф. Канушин., И.Г. Ганагина; СГГА- Новосибирск, 2013. – 123 с.
5. Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н. Геоид и деформации в тектоносфере // Геодинамика и развития тектоносферы. – М.: Наука,1991. – С. 85–92.
6. Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Моментная волновая природа геологической среды // Вестник Московского университета. Геология. – 2008. – № 6. – С. 16–19
7. Тверитинов Ю.И., Тверитинова Т.Ю. Геодинамика тектонических перестроек // Вихри в геологических процессах. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. – 297 с.
8. Канушин, В.Ф. Основные принципы прогнозирования аномалий силы тяжести с учетом дополнительной информации [Текст] /В.Ф. Канушин; Деп. ОНТИ ЦНИИГАиК 28. 08. 82, №90 ГД-Д 82. РЖ. Геодезия и аэрофотосъемка, отд. вып. 1983. – 33 с.
9. Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, Д. Н. Голдобин и др. // Вестник СГУГиТ – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.
10. О результатах создания глобальной модели геоида на основе алгоритма одномерного сферического преобразования Фурье / Е. М. Мазурова, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина и др. // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 1 (92). – С. 133–142
11. Канушин, В.Ф. Дифференцированный подход к определению зависимости аномалий силы тяжести от высоты [Текст] /В.Ф. Канушин; Вопросы математического моделирования в прикладных задачах; Межвузовский сборник научных трудов/ НИИГАиК, Новосибирск. 1990. – С. 62-65
12. Bjerhammar, A.A. geodetic determination of viscosity [Текст] : / A. Bjerhammar, S. Stockl, L. Svensson // R. Inst. of Technology, Div. Of Geodesy, Stockholm

© В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева, И. В. Зверев, 2024