

УДК 551.2

## ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНТАРКТИДЫ

© 2023 г. А. А. Баранов<sup>1,\*</sup>, Академик РАН Л. И. Лобковский<sup>2</sup>, А. М. Бобров<sup>1</sup>

Поступило 06.05.2023 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принято к публикации 23.05.2023 г.

В работе построена геодинамическая модель современной Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2. Исходя из распределения мантийных температурных аномалий из этой модели, выполнено численное моделирование трехмерного течения вязкой мантии с учетом зависимости вязкости от температуры и глубины для сферической Земли. Уравнение Стокса решается методом конечных элементов с помощью программного кода CitcomS. Полученная картина распределения аномалий температуры, динамической топографии и поля скоростей в мантии используется для анализа особенностей строения и геодинамики Западной Антарктиды, а также наблюдаемого в этой области аномального ускорения движения и разрушения ледников. В частности, дается объяснение существованию и современной активности Западно-антарктической рифтовой системы, включающей одну из крупнейших вулканических провинций на Земле, что согласуется с повышенным тепловым потоком на поверхности. Повышенный тепловой поток и вулканическая активность в этом регионе приводят к нестабильности и ускорению стока в океан покровных ледников Западно-антарктического ледового щита, что создает потенциальную угрозу значительного повышения уровня Мирового океана.

*Ключевые слова:* глобальная геодинамическая модель современной Земли, мантийная конвекция, сейсмическая томография, Антарктида

**DOI:** 10.31857/S2686739723600911, **EDN:** INDBAK

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач геофизики является получение самосогласованной геодинамической модели современной Земли. Необходимо объяснить происхождение глобальных тектонических структур, таких как срединно-океанические хребты, континентальные рифты, вулканические провинции, коллизионные пояса, зоны субдукции, литосферные плиты и другие структуры. Теоретической основой глобальной геодинамики является исследование мантийной конвекции для реальной Земли, что предполагает, как минимум, решение уравнения Стокса, описывающего трехмерное течение вязкой жидкости с вязкостью, зависящей от температуры среды. Мы здесь не рассматриваем геодинамическую эволюцию Земли, что предполагает, наряду с уравнением движения Стокса, решать уравнения переноса тепла, а также химических компонентов

среды. В данном случае мы ограничимся исследованием современной “мгновенной” картины течений в мантии, отталкиваясь от наличия трехмерной картины сейсмической томографии Земли, которая пересчитывается в распределение температуры и плотности мантийной среды.

Математическое моделирование трехмерной мантийной конвекции в сферической Земле для произвольного поля температуры и переменной вязкости возможно только численными методами [1]. На протяжении последних лет было проведено множество численных экспериментов по изучению конвекции в мантии в двух- и трехмерных вариантах, для различных параметров Земли и для разных геодинамических обстановок (см., например, [2–8]). Были рассчитаны и мгновенные трехмерные геодинамические модели Земли на основе сейсмической томографии, например [9, 10]. В настоящей работе на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2 [11] построена геодинамическая сферическая модель современной Земли и приведены ее следствия для Антарктики, касающиеся потенциально опасных процессов ускоренного сползания ледников в океан и их разрушения, наблюдаемых в последние десятилетия.

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии Российской академии наук,  
Москва, Россия

\*E-mail: baranov@ifz.ru

## ЧИСЛЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Мгновенная сферическая структура глобальных вязких мантийных течений может быть рассчитана по уравнению Стокса на основе данных сейсмической томографии. Используемая авторами модель сейсмической томографии SMEAN 2 [11] является одной из лучших и содержит вариации поперечных сейсмических скоростей во всем объеме мантии. Для того чтобы использовать данные этой модели для численных расчетов, необходимо перевести вариации скоростей поперечных волн в мантии в температурные аномалии. Вариации сейсмических скоростей в мантии  $\Delta v_s$  пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению:  $\Delta \rho = 0.3 \times \Delta v_s$ , исходя из геофизических соображений [12]. В свою очередь, по вариациям плотности определяется поле вариаций температур в мантии по формуле теплового расширения:  $\Delta T = - (1/\alpha) \times (\Delta \rho/\rho)$ , с учетом зависимости коэффициента теплового расширения  $\alpha$  от глубины. При этом коэффициент теплового расширения  $\alpha$  меняется с глубиной по зависимости  $\alpha = (3 - 4.44 \times (1 - \gamma)) \times 10^{-5}$ , где  $\gamma$  — безразмерный радиус Земли. Таким образом, коэффициент теплового расширения  $\alpha$  меняется от  $3 \times 10^{-5}$  на поверхности Земли до  $1 \times 10^{-5}$  на дне мантии на границе с ядром. При добавлении к полученным таким образом вариациям температуры адиабаты и потенциальной температуры получается полная температура в мантии Земли.

Мы моделируем мантию Земли в приближении Буссинеска в трехмерной сферической геометрии. Мантия нагревается от ядра и изнутри за счет распада радиоактивных элементов (внутренний нагрев). Для расчетов мы используем модель с упрощенной зависимостью вязкости от температуры по закону Аррениуса [13]:

$$\eta_T = \exp(2E/(T + T_{\text{bot}}) - 2E/(T_{\text{ref}} + T_{\text{bot}})),$$

где  $E$  — безразмерный параметр, определяющий перепад вязкости в модели,  $T$  — безразмерная наадиабатическая температура,  $T_{\text{ref}} = 0.5$ ,  $T_{\text{bot}} = 1$  (температура на дне мантии). В настоящей работе  $E = \ln 10^{4.5} = 10.36$ , что примерно соответствует энергии активации влажного оливина. В нашей модели скачок вязкости на границе между верхней и нижней мантией принят равным 30. Приведенный закон вязкости дает вариации вязкости, как по глубине, так и по латерали в несколько порядков. У поверхности за счет малой температуры возникает слабая океаническая литосфера, тогда как континенты дают высоковязкие области до глубины 200 км (за счет пониженной температуры). Число Рэлея равно  $Ra = 1 \times 10^8$ . Для численного моделирования мы использовали модифицированную программу CitcomS [14]. В программу был добавлен код, осуществляющий сборку данных из модели сейсмической томографии

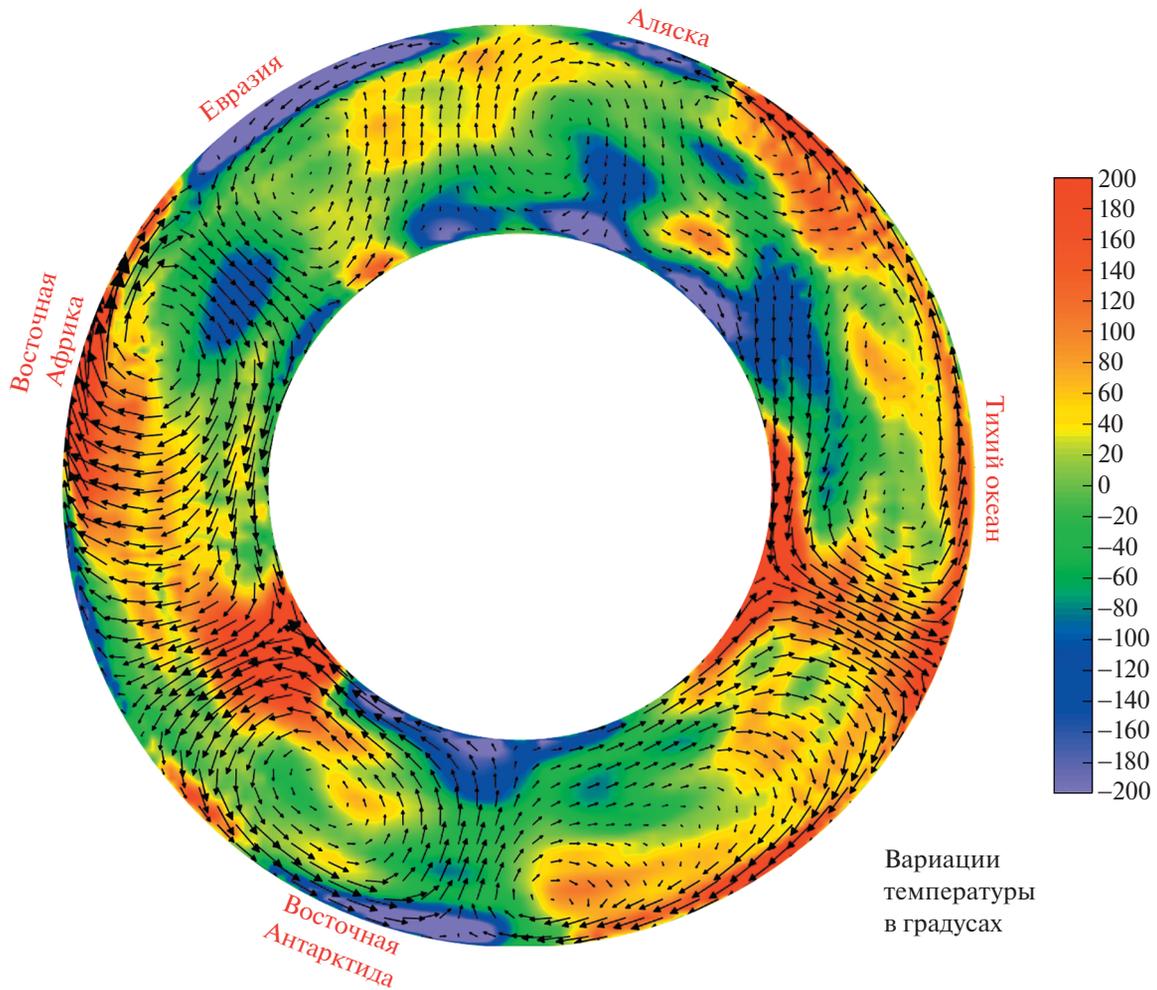
SMEAN 2. В этой модели данные были разложены по сферическим гармоникам, чтобы не зависеть от расчетной сетки. Расчеты производились на сетке  $170 \times 170 \times 59$  узлов по углам и глубине, соответственно, с равномерным шагом по глубине в 50 км. В используемой нами программе CitcomS сетка по углам неравномерная и состоит из 12 сферических сегментов. Для такой сетки сингулярностей в полярных областях не возникает. Более подробно сетка описана в работе [14].

На входе считываются 58 файлов, содержащих вариации сейсмических скоростей в Земле, разложенных по сферическим гармоникам, и вариации скоростей переводятся в вариации температуры в каждой точке сетки. Таким образом, формируется начальное поле температуры. Далее к нему добавляются адиабата и потенциальная температура. Затем решается уравнение переноса импульса (уравнение Стокса) для скоростей течений в естественных переменных скорость—давление конечно-элементным методом с помощью алгоритма Узавы [15], что позволяет получить решение даже тогда, когда вязкость вещества меняется на много порядков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для интерпретации результатов и их графического представления было выбрано характерное меридиональное сечение между полюсами, проходящее через восточную Африку и центральную часть Тихого океана (40, 220 градусов восточной долготы, рис. 1). На рис. 1 показаны вариации температуры в мантии в сферическом меридиональном сечении Земли через полюса через 40 и 220 градусов восточной долготы. Видно, что глобальные горячие восходящие потоки поднимаются от ядра Земли под Тихим океаном и под Африкой. Более слабый и частично верхнемантийный поток поднимается к поверхности в Арктике. Нисходящий поток между Африкой и Евразией на рис. 1 отвечает зоне субдукции в области Средиземного моря. Южнее Аляски нисходящий поток приурочен к Алеутской зоне субдукции. Под Восточной Антарктидой имеет место нисходящий мантийный поток.

На рис. 2 показаны вариации температуры для Антарктического региона на глубине 100 км. Черными контурами показана динамическая топография, черными точками — вулканы на подледной поверхности. Восточная Антарктида характеризуется большими отрицательными температурными аномалиями до 400 градусов и динамической топографией до  $-900$  м, что подтверждает наличие под Восточной Антарктидой нисходящего мантийного потока. Для Антарктического полуострова, Западно-антарктической рифтовой системы, района ледника и моря Росса характерны положительные температурные аномалии до  $350^\circ$  и поло-



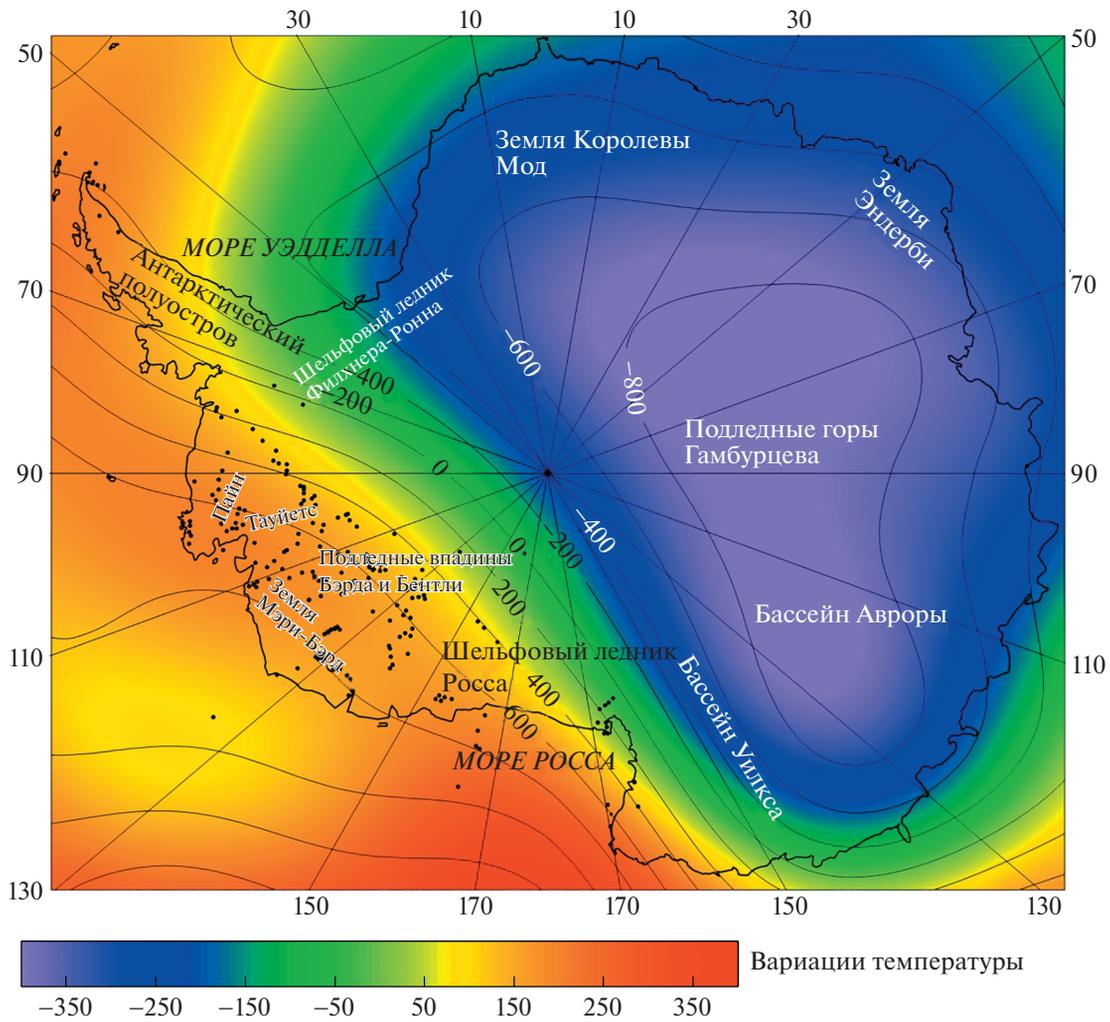
**Рис. 1.** Распределение аномалий температуры и скоростей в мантии Земли в сечении по 40 и 220 градусу восточной долготы.

жительная динамическая топография до 600 м, что согласуется с измеренным повышенным тепловым потоком на поверхности и современным вулканизмом Западно-антарктической рифтовой системы и части Антарктического полуострова. В то же время для другой части Западной Антарктиды – ледника Филхнера-Ронна аномалии температуры и динамическая топография отрицательны. Этот результат согласуется с наблюдаемыми данными об отсутствии рифтинга в настоящее время, небольшим тепловым потоком под этой областью и отсутствием вулканов.

#### ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате численного моделирования результаты, основанные на сейсмической модели вариаций поперечных сейсмических скоростей SMEAN 2, дают распределение температуры, вязкости и мгновенную структуру глобальных мантийных течений, рассчитанных по

уравнению Стокса. Расчеты показывают согласие полученных результатов с теорией тектоники плит. Под континентами, кроме Восточной Африки, Юго-Восточной и Восточной Азии, и Западной Антарктиды, находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры. Под Восточной Африкой имеют место положительная температурная аномалия и восходящий верхнемантийный поток, ответственный за систему рифтов на поверхности африканского континента. Похожая высокотемпературная аномалия и восходящие течения обнаруживаются и для Западной Антарктиды. Глобальные восходящие мантийные потоки находятся под Тихим океаном и под Южной Африкой. В мантии Земли показаны две области с большими латеральными перепадами температуры и вязкости: 1) перепад между горячей астеносферой и холодной континентальной литосферой кратонов на глубине около 200 км; 2) перепад между горячими восхо-



**Рис. 2.** Вариации температуры для Антарктического региона на глубине 100 км. Черными контурами показана динамическая топография в метрах, черными точками показаны вулканы.

дьящими плюмами и холодными зонами опустившихся слэбов в слое D" на границе с ядром (рис. 1).

Антарктида четко делится на две части по аномалиям температуры и динамическому рельефу. Западная Антарктида, кроме ледника Филхнера-Ронна характеризуется положительными аномалиями температуры в подлитосферной мантии и положительным динамическим рельефом. В то же время под Восточной Антарктидой и ледником Филхнера-Ронна температура в подлитосферной мантии понижена, а динамический рельеф отрицателен (рис. 2).

Полученные выше численные результаты хорошо согласуются с наблюдаемым тепловым потоком на поверхности Антарктиды [16] и наличием большого массива вулканов в районе Западно-антарктической рифтовой системы и части Антарктического полуострова [17]. Таким образом, рассчитанная модель современных мантийных течений дает вполне логичное объяснение суще-

ствованию Западно-антарктической рифтовой системы и множеству вулканов Западной Антарктиды. Повышенный тепловой поток и вулканизм под Западно-антарктической рифтовой системой способствуют подплавлению подошвы ледяного щита Западной Антарктиды, что облегчает скольжение льда из внутренних областей Западной Антарктиды в море по коренному основанию. Наступление фаз быстрого скольжения и разрушения ледников на фоне повышенного теплового потока происходит за счет триггерного эффекта активизации подледных вулканов, вызванного деформационными волнами, приходящими в Западную Антарктику, которые генерируются сильнейшими землетрясениями в окружающих Антарктиду зонах субдукции [18–20]. Это может привести к быстрому сползанию громадных масс покровных ледников в море (например, ледник Судного Дня) и глобальному повышению уровня

Мирового океана на несколько десятков сантиметров и даже первые метры.

Представленная глобальная модель мантийных течений требует дальнейших уточнений. В частности, в нашей модели не учтены вариации химического состава в мантии, континентальной коре, в слое D". Необходимы более детальные расчеты структуры течений в верхней мантии Земли, введение плитной реологии на поверхности Земли и т.д.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента, чьи замечания помогли значительно улучшить рукопись, профессора Т. Беккера за модель сейсмической томографии и коллектив разработчиков программного комплекса CitcomS за программу, позволяющую посчитать сложные эффекты в мантии Земли.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования частично выполнены за счет средств бюджетного финансирования Института физики Земли РАН и частично за счет средств бюджетного финансирования Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубицын В.П., Баранов А.А., Евсеев А.Н., Трубицын А.П. Точные аналитические решения уравнения Стокса для тестирования уравнений мантийной конвекции с переменной вязкостью // Физика Земли. 2006. Т. 42. № 7. С. 3–11.
2. Lobkovsky L.I., Kotelkin V.D. Numerical analysis of geodynamic evolution of the Earth based on a thermochemical model of the mantle convection // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. № 6 (1). P. 49–58.
3. Бобров А.М., Баранов А.А. Модель мантийной конвекции с неньютоновской реологией и фазовыми переходами: структура течений и поля напряжений // Физика Земли. 2016. Т. 52. № 1. С. 133–148.
4. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2001. 408 с.
5. Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. Влияние скорости движения океанической литосферы на свободноконвективные течения в астеносфере под срединно-океаническим хребтом // Физика Земли. 2008. № 4. С. 35–47.
6. Трубицын В.П., Баранов А.А., Харыбин Е.В. Численные модели субдукции океанической коры с базальтовыми плато // Физика Земли. 2007. № 7. С. 3–10.
7. Lobkovsky L., Kotelkin V. The history of supercontinents and oceans from the standpoint of thermochemical mantle convection // Precambrian Research. 2015. V. 259. P. 262–277.
8. Червов В.В., Черных Г.Г., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю. Численное моделирование трехмерной конвекции в верхней мантии Земли под литосферой Евразии // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 101–114.
9. Trubitsyn V.P. Evolutionary models of floating continents // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. V. 6. № 5. P. 311–322.
10. Becker T. On the effect of temperature and strain-rate dependent viscosity on global mantle flow, net rotation and plate-driving forces // Geophys. J. Int. 2006. № 167. P. 943–957.
11. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models, Geochem. Geophys. Geosyst. 2002. V. 3. <https://doi.org/10.129/2001GC000168>
12. Paulson A., Zhong Sh., Wahr J. Modelling postglacial rebound with lateral viscosity variations // Geophys. J. Int. 2005. V. 163. P. 357–371.
13. Bobrov A.M., Baranov A.A. Thermochemical Mantle Convection with Drifting Deformable Continents: Main Features of Supercontinent Cycle // Pure and Applied Geophysics. 2019. V. 176. № 8. P. 3545–3565.
14. Zhong S., Zuber M.T., Moresi L.N., Gurnis M. Role of temperature-dependent viscosity and surface plates in spherical shell models of mantle convection // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. V. 105. № B5. P. 11063–11082.
15. Ramage A., Wathen A.J. Iterative solution techniques for the Stokes and Navier-Stokes equations // Int. J. Numer. Methods. Fluids. 1994. V. 19. P. 67–83.
16. Löising M., Ebbing J., Szwillus W. Geothermal heat flux in Antarctica: Assessing models and observations by Bayesian inversion // Front. Earth Sci. 2020. V. 8. P. 105.
17. van Wyk de Vries M., Bingham R., Hein A. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // Geol. Soc. Spec. Publ. 2018. V. 461 (1). P. 231.
18. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм активизации разрушения ледников, эмиссии метана и потепления климата в Антарктиде // Океанология. 2023. Т. 63. № 1. С. 1–11.
19. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм эмиссии метана, разрушения ледников и потепления климата в Арктике и Антарктике // Физика Земли. 2023. № 3. С. 33–47.
20. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation // Geosciences. 2022. № 12. P. 372.

## GLOBAL GEODYNAMIC MODEL OF THE EARTH AND ITS APPLICATION FOR ANTARCTICA

**A. A. Baranov<sup>a,#</sup>, Academician of the RAS L. I. Lobkovsky<sup>b</sup>, and A. M. Bobrov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: baranov@ifz.ru*

A geodynamic model of the modern Earth is constructed based on the SMEAN 2 global seismic tomography model. On the basis of mantle temperature anomalies, numerical modeling of spherical mantle convection is performed for the parameters of the real Earth. For Antarctica, an explanation was obtained for the existence of the West Antarctic Rift System, which contains one of the largest and least known volcanic provinces on Earth, which is consistent with the increased surface heat flow and modern volcanism of the West Antarctic Rift System and part of the Antarctic Peninsula. The increased heat flow and volcanoes in this region are causing instability and accelerating the flow of glaciers from the West Antarctic Ice Sheet into the ocean, which could lead to a significant rise in global sea level.

*Keywords:* global geodynamic Earth's model, spherical mantle convection, seismic tomography, Antarctica