

УДК 551

ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

© 2024 г. Академик РАН Л. И. Лобковский¹, А. А. Баранов^{2,*}, А. М. Бобров³, А. В. Чуваев⁴

Поступило 21.09.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принято к публикации 30.10.2023 г.

В работе построена геодинамическая модель современной Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN2 с акцентом на Арктический регион. Для сферической модели Земли было получено решение уравнения Стокса для вязкой жидкости на основе данных сейсмической томографии методом конечных элементов с помощью программного кода CitcomS. Полученные распределения аномалий температуры и поля скоростей мантийных течений объясняют основные особенности современной геодинамики Арктического региона. Перепад температуры в подкорковой мантии между относительно “холодным” западным арктическим шельфом (Баренцево и Карское моря) и более “теплым” восточным арктическим шельфом (от моря Лаптевых до Берингова пролива) достигает 100 градусов, что коррелирует с наблюдаемой интенсивной эмиссией метана с мелководного шельфа Восточной Арктики, вызванной деградацией мерзлоты и разрушением газогидратов на фоне повышенной температуры среды. Парниковый эффект метана в атмосфере, в свою очередь, способствует потеплению климата в Арктике. Район Исландии и восточная часть Гренландии под влиянием восходящего мантийного потока характеризуются горячей подкорковой мантией и повышенным тепловым потоком на поверхности, вызывающим нестабильность и подплавление ледяного щита Гренландии снизу.

Ключевые слова: глобальная геодинамическая модель современной Земли, трехмерное численное моделирование, мантийная конвекция, сейсмическая томография, Арктика, Гренландия

DOI: 10.31857/S2686739724020125

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная геодинамическая модель Земли позволяет объяснить основные современные геологические и геофизические процессы, развивающиеся в различных областях нашей планеты, в частности в Арктическом регионе. Теоретической основой глобальной геодинамики является моделирование мантийной конвекции для реальной Земли, что предполагает решение уравнения Стокса, описывающего течение высоковязкого мантийного вещества для неоднородного поля температур

современной Земли, полученного из сейсмической томографии.

В последние годы были разработаны региональные геодинамические модели эволюционного взаимодействия субдуцируемой тихоокеанской литосферы с верхнемантийными течениями под континентами применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии [1–5]. Однако эти модели не описывали глобальную конвекцию, охватывающую нижнюю мантию и переходный слой D'' между мантией и ядром Земли.

В настоящей работе проводится 3D-численное моделирование глобальной мантийной конвекции для современной Земли с акцентом на Арктический регион и рассмотрено полученное поле температуры для Арктического региона в контексте анализа возможного влияния тепловых аномалий на стабильность ледников и газогидратов.

УРАВНЕНИЯ И МОДЕЛЬ

Моделирование глобальной мантийной конвекции в рамках гидродинамики сильно вязкой

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской Академии наук, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва, Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*E-mail: aabaranov@gmail.com

жидкости с переменной вязкостью проводится на основе уравнения Стокса. Наиболее реалистичной является модель конвекции для современной Земли, полученная на основе данных сейсмической томографии, отражающих ее внутреннее строение. Используемая авторами модель сейсмической томографии SMEAN2 содержит вариации сейсмических скоростей в мантии [6]. Для расчета мантийной конвекции осуществляется перевод вариаций сейсмических скоростей в геосреде в температурное поле. Это делается в два этапа. Сначала вариации сейсмических скоростей в мантии Δv_s пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению: $\Delta \rho = \text{scaling} \times \Delta v_s$. Скэйлинг-фактор зависит от глубины, химического состава среды и других факторов. Различные вариации скэйлинг-фактора для мантии Земли были описаны, например, в работе [7]. Для простоты обычно принимают скэйлинг-фактор ступенчато зависящим от глубины, например, согласно [8], значения скэйлинга распределяются следующим образом: 0.05 – для литосферы 0–100 км; 0.1 – для верхней мантии 100–660 км; 0.2 – для нижней мантии 660–2500 км; 0.1 – для слоя D'' 2500–2900 км. Полученные вариации плотности переводятся в вариации температур в мантии по формуле теплового расширения: $\Delta T = -(1/\alpha) \times (\Delta \rho/\rho)$. При этом коэффициент теплового расширения α меняется с глубиной по зависимости $\alpha = (3 - 4.44 \times (1-r)) \times 10^{-5}$, где r – безразмерный радиус Земли, от 3×10^{-5} на поверхности Земли до 1×10^{-5} на дне мантии. Далее к вариациям температуры необходимо добавить адиабатическую и среднюю наадиабатическую температуру, и таким образом получается полная температура в мантии Земли [9].

Мы моделируем течения в мантии Земли в приближении Буссинеска в трехмерной сферической геометрии. Мантия нагревается от ядра и изнутри за счет распада радиоактивных элементов. Для расчетов мы используем модель с упрощенной зависимостью вязкости от температуры по закону Аррениуса [10]:

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

где T – безразмерная наадиабатическая температура, $T_{ref} = 0.5$, $T_{bot} = 1$ (температура на дне мантии), $E = \ln 10^{4.5} = 10.36$, что примерно соответствует энергии активации влажного оливина. 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).

Уравнение переноса импульса решается в естественных переменных скорость–давление конечно-элементным методом с помощью алгоритма Узавы [11, 12], что позволяет получить решение даже тогда, когда вязкость вещества меняется на много порядков. Число Рэлея в нашей модели равно $Ra = 1.2 \times 10^8$. Учитываются фазовые переходы вещества мантии на глубинах 410 и 660 км. Скачок плотности на границе 410 км $\delta \rho_{410}/\rho_0 = 0.07$, наклон кривой фазового равновесия $\gamma_{410} = 1.6$ МПа/К, на границе 660 км $\delta \rho_{660}/\rho_0 = 0.09$, а $\gamma_{660} = -1.3$ МПа/К [13]. При этих значениях параметров число Рэлея составляет $Ra_{ph410} = \delta \rho_{410} g D^3 / (\kappa \rho v_0) \approx 1.4 \times 10^8$, а $Ra_{ph660} = \delta \rho_{660} g D^3 / (\kappa \rho v_0) \approx 1.8 \times 10^8$.

Для численного моделирования мы использовали модифицированную программу CitcomS [14]. В программу был добавлен код, осуществляющий сборку данных из модели сейсмической томографии SMEAN2. На основе полной температуры с помощью виртуальной машины VMware рассчитывается трехмерная глобальная модель конвекции, отвечающая внутреннему строению современной Земли [15, 16]. Расчеты уравнения переноса импульса для скоростей течений производились на сетке $170 \times 170 \times 59$ узлов по углам и глубине, соответственно, с равномерным шагом по глубине в 50 км, сетка по углам неравномерная и состоит из 12 сферических сегментов без сингулярностей в полярных областях [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная расчетная модель современной геодинамики мантии Земли включает пространственное распределение скоростей течения, температуры, вязкости и напряжений в каждой точке сетки. Особый интерес представляют небольшие глубины и поверхность Земли. Здесь и далее мы даем рассчитанные вариации температуры, поскольку добавление адиабаты скрывает вариации температуры, вызывающие мантийную конвекцию. На рис. 1 приведено поле вариаций температуры, пересчитанных из вариаций сейсмических скоростей в модели SMEAN2 в сечении мантии Земли на глубине 75 км с наложенными контурами континентов. Видны океанические хребты – горячие области, а под большей частью континентов – холодные области. Исключения составляют Восточная Африка и район Красного

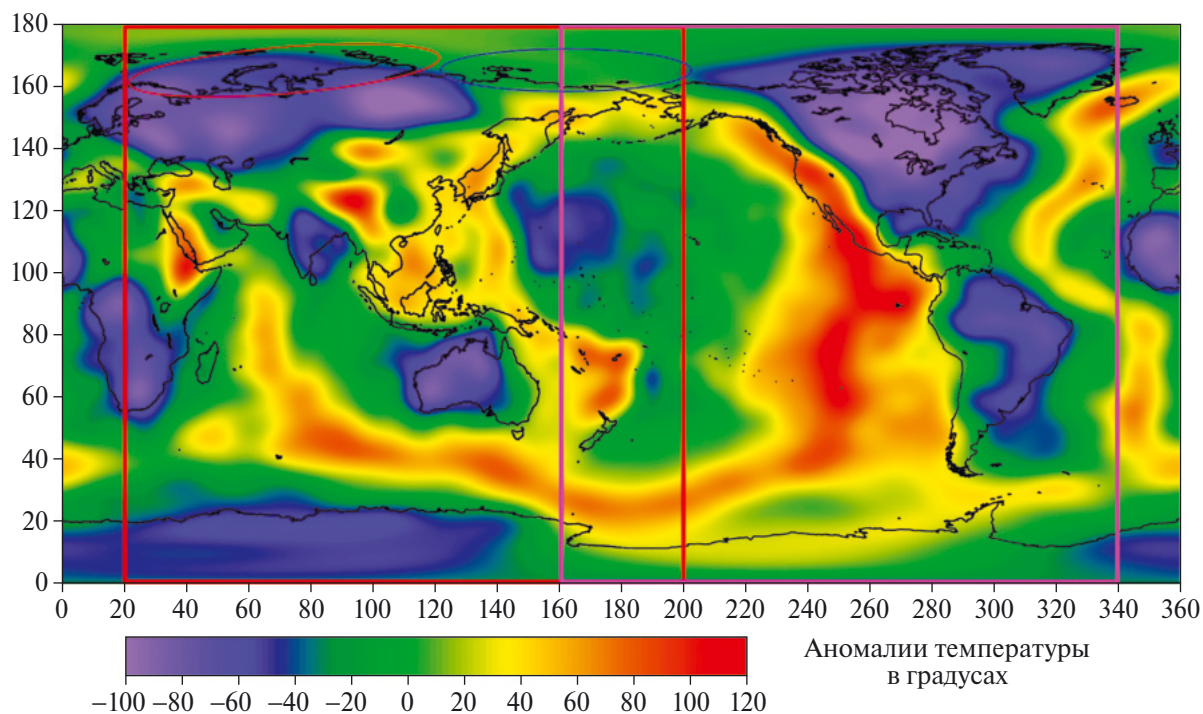


Рис. 1. Распределение аномалий температуры в мантии на глубине 75 км. Черной линией показаны контуры континентов. Красные линии – сечения Земли по 20 и 200 градусу восточной широты. Розовые линии – сечения Земли по 160 и 340 градусу восточной долготы.

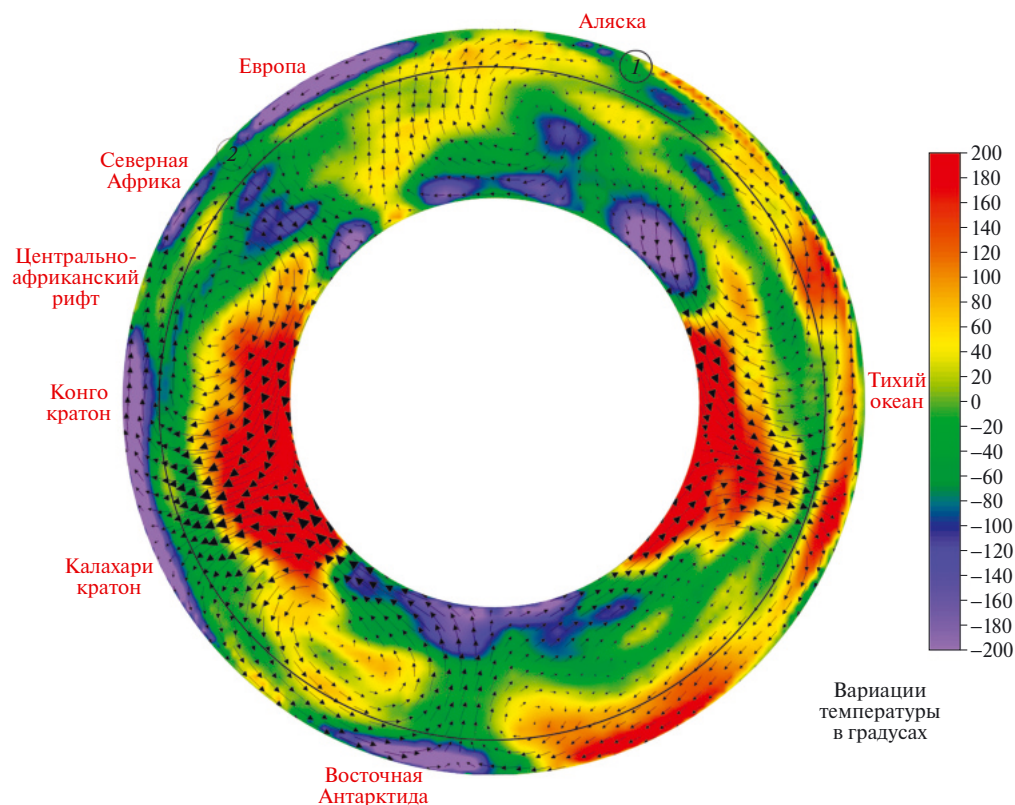


Рис. 2. Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии Земли в сечении по 20 и 200 градусу восточной долготы (красная рамка на рис. 1). Кружками показаны зоны субдукции: 1 – Алеутская, 2 – Средиземноморская.

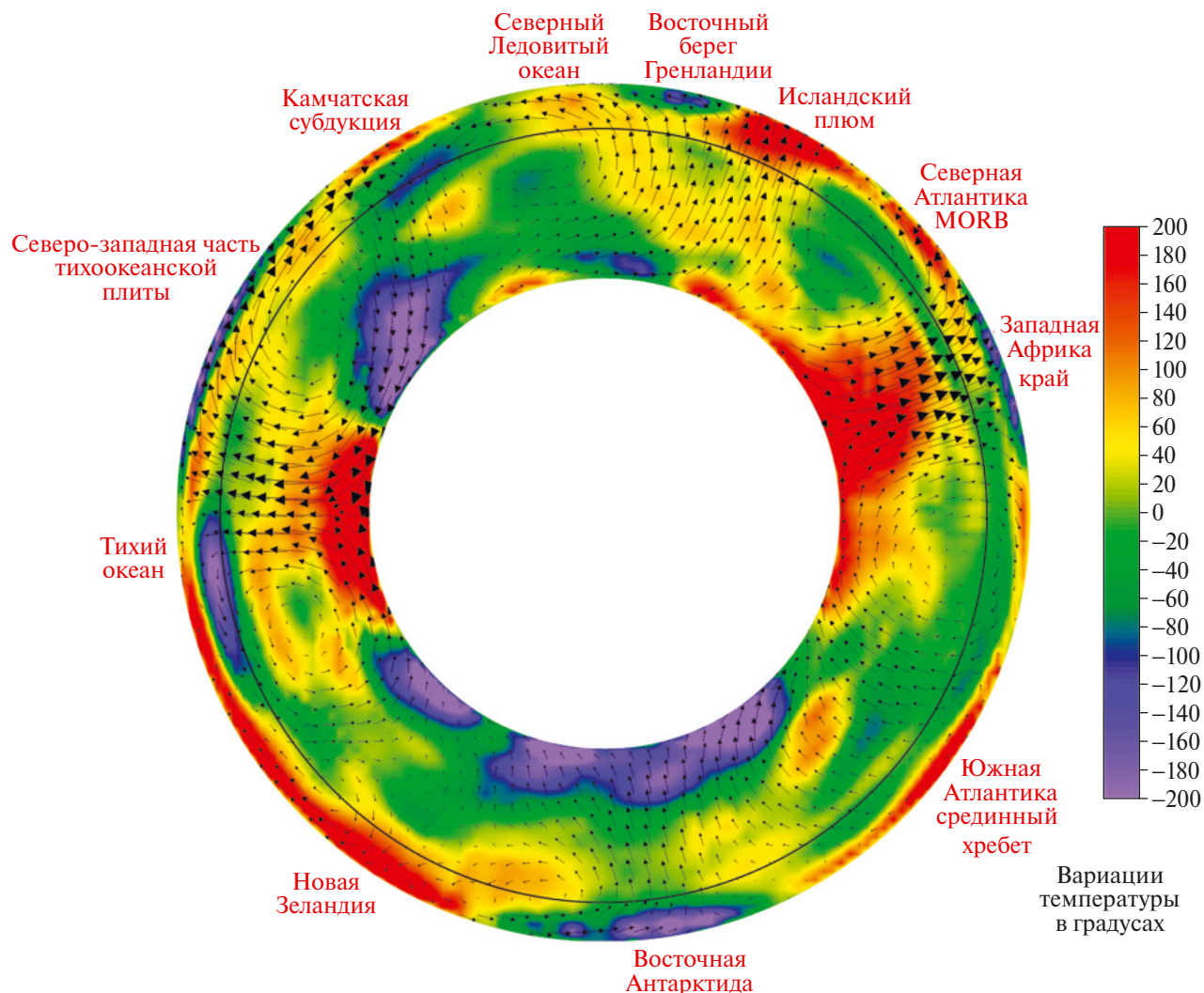


Рис. 3. Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии Земли в сечении по 160 и 340 градусу восточной долготы (розовая рамка на рис. 1).

моря, расположенные над Африканским суперплюмом, часть Центральной Азии и часть Восточной Азии, окраинные моря, а также Западная Антарктика. Синим овалом показан восточный арктический шельф Евразии от моря Лаптевых до Берингова пролива, красным овалом показана западная часть арктического шельфа Евразии от Норвегии до моря Лаптевых. Перепад температуры между этими частями арктического шельфа превышает 100 градусов. Аналогичный перепад наблюдается между Западной и Восточной Антарктидой.

Далее были выбраны 2 характерных меридиональных сечения между полюсами, проходящих через Африку и центральную часть Тихого океана (20, 200 градусов восточной долготы, рис. 2) и через северо-восточную часть Евразии, Тихий океан,

Исландию, Гренландию, Атлантический океан (160, 340 градусов восточной долготы, рис. 3).

На рис. 2 показаны вариации температуры в мантии в сферическом меридиональном сечении Земли через полюса через 20 и 200 градусов восточной долготы. Глобальные горячие восходящие потоки поднимаются из нижней мантии Земли под Тихим океаном и под Африкой. Нисходящий поток между Африкой и Евразией формирует зоны субдукции в Средиземном море. Более слабый и частично верхнемантийный поток поднимается к поверхности в Арктике. Южнее Аляски нисходящий поток приурочен к Алеутской зоне субдукции. Под Восточной Антарктидой имеет место нисходящий мантийный поток.

На рис. 3 показаны вариации температуры в мантии в сферическом меридиональном сечении

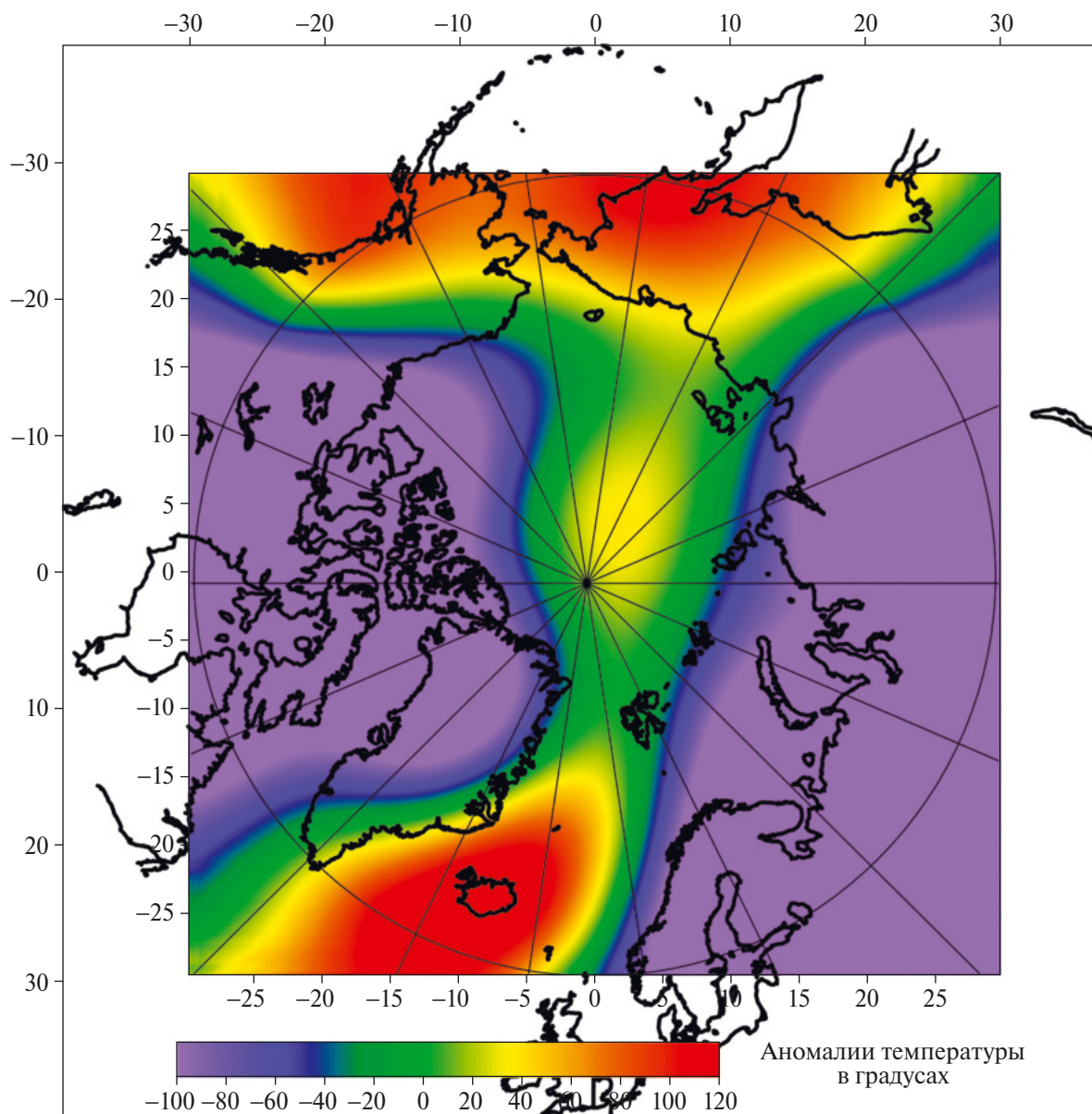


Рис. 4. Сферическая эквидистантная проекция с центром в Северном полюсе. Цветной шкалой показаны аномалии температуры в мантии на глубине 75 км, черными линиями показаны контуры континентов.

Земли через полюса через 160 и 340 градусов восточной долготы. Для Арктического региона получен восходящий мантийный поток в нижней мантии, тогда как у поверхности скорости течений становятся субгоризонтальными.

На рис. 4 показаны вариации температуры в мантии в сферической эквидистантной проекции с центром в Северном полюсе на глубине 75 км. Перепад температуры между горячей мантией в районе Исландии и мантией под западной частью Гренландии достигает 200 градусов, тогда как

разница температур между западной и восточной частями арктического шельфа России более умеренная (до 100 градусов).

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе построена глобальная геодинамическая конвективная модель Земли, которая используется для анализа аномальных природных процессов в Арктическом регионе. Согласно расчетам, в мантии Земли сформировано несколько

глобальных конвекционных ячеек, ответственных за общую геодинамику и верхнемантийные течения, связанные с общей системой литосферных плит, срединно-океанических хребтов, зон субдукции и коллизии [4, 5, 17]. Более мелкие верхнемантийные ячейки и микроплиты формируют региональные структуры на поверхности Земли. В частности, под Арктикой и под частью шельфа северо-восточной Азии имеется умеренно горячая область в верхней мантии и субгоризонтальные мантийные течения, обеспечивающие пассивный рифтинг в Северном Ледовитом океане. В то же время под северными окраинами Евразии (от Кольского полуострова до Таймыра) и Северной Америки (кроме Аляски) температура в подкорковой мантии понижена. Более горячая область с аномалиями до 100 градусов получена для района Исландии и восточного берега Гренландии, тогда как для остальной части Гренландии отрицательные аномалии температуры достигают 100 градусов. Полученные выше численные результаты для Арктики хорошо согласуются с наличием горячей точки с вулканами в Исландии, относительной стабильностью газогидратов в западной части российской Арктики (рис. 1, красный овал) и их активным разрушением с выделением метана в восточной части мелководного шельфа России (рис. 1, синий овал) [18]. С интенсивной эмиссией метана на восточной части арктического российского шельфа (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) может быть связано современное быстрое потепление климата в результате парникового эффекта. Для быстрых климатических изменений, происходящих в течение десятков-сотен лет, медленные конвективные мантийные процессы с характерными временами изменения порядка миллионов и десятков миллионов лет являются фоновыми и могут рассматриваться как стационарные.

Вместе с тем повышенная температура в подкорковой мантии за счет мантийной конвекции может способствовать таянию вечной мерзлоты и разрушению газогидратов. На временах десятки-сотни лет в настоящее время могут работать другие факторы, такие как повышение температуры арктических морей и сокращения площади морского льда, способствующие нагреву мерзлых пород сверху. В то же время там, где тепловой поток снизу меньше, стабильность гидратов в мерзлоте выше.

Для Гренландии повышенный тепловой поток также является одним из факторов нестабильности ледяного щита. Восточная часть Гренландии попадает в зону влияния восходящего потока под Исландией, что согласуется с повышенным тепловым потоком в этом районе [19]. Как показано для

Западной Антарктиды, нестабильность ледового щита и высокие скорости ледников возникают из-за нагрева снизу [20].

Представленная геодинамическая модель Арктического региона требует дальнейших уточнений. В частности, в модели не учтена роль квазижестких литосферных плит на поверхности Земли. Необходимы более детальные расчеты структуры течений в верхней мантии Земли и теплового потока на ее поверхности, введение плитной реологии на поверхности Земли и т.д.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов, чьи замечания помогли значительно улучшить рукопись.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004, частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений РАН № АААА-А19-119011490131-3 и частично в рамках госзадания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lobkovsky L.I., Shipilov E.V., Kononov M.V.* Geodynamic Model of Upper Mantle Convection and Transformations of the Arctic Lithosphere in the Mesozoic and Cenozoic // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. V. 49. P. 767–785.
2. *Lobkovsky L.I.* Deformable Plate Tectonics and Regional Geodynamic Model of the Arctic Region and Northeastern Asia // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57(3). P. 371–386.
3. *Laverov N.P., Lobkovsky L.I., Kononov M.V., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Sokolov S.D., Shipilov E.V.* A Geodynamic Model of the Evolution of the Arctic Basin and Adjacent Territories in the Mesozoic and Cenozoic and the Outer Limit of the Russian Continental Shelf // *Geotectonics*. 2013. V. 47. P. 1–30.
4. *Лобковский Л.И., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А., Владимиров И.С., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д.* Геодинамическая модель взаимодействия зоны субдукции с континентальной литосферой в области перехода от Тихого океана к Восточной Азии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 5. P. 0675.
5. *Лобковский Л.И., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А., Владимиров И.С., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д.* Geodynamic Model of the Interaction between the Continental Lithosphere and the Active Continental Margin in East Asia // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. V. 22. ES1005.
6. *Becker T.W., Boschi L.* A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2002. V. 3. 10.129/2001GC000168
7. *Lee C.K., Han S.C., Steinberger B.* Influence of variable uncertainties in seismic tomography models on constrain-

- ing mantle viscosity from geoid observations. // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2011. V. 184(1–2). P. 51–62.
8. *Megnin C., Romanowicz B.* The shear velocity structure of the mantle from the inversion of body, surface, and higher modes waveforms // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 143. P. 709–728.
 9. *Schubert G., Turcotte D.L., Olson P.* *Mantle Convection in the Earth and Planets*. Cambridge Univ. Press, New York, 2001. 940 P.
 10. *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.
 11. *Hughes T.J.R.* *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*// Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1987.
 12. *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.
 13. *Fei Y., Orman J.V., Li J., van Westrenen W., Sanloup C., Minarik W., Hirose K., Komabayashi T., Walter M., Funakoshi K.* Experimentally determined postspinel transformation boundary in Mg_2SiO_4 using MgO as an internal pressure standard and its geophysical implications // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. B02305.
 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. N. B5. P. 11063–11082.
 15. *Баранов А., Лобковский Л.И., Бобров А.М.* Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды. // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 512 № 1. С. 100–105.
 16. *Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М.* Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий // *Вычислительные технологии*. 2020. Т. 25. № 2. С. 103–117.
 17. *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. V.6 (1). P. 49–58.
 18. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Joussupov V., Kosmach D., Gustaffson O.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
 19. *Artemieva I.M.* Lithosphere thermal thickness and geothermal heat flux in Greenland from a new thermal isostasy method // *Earth-Sci. Rev.* 2019. V. 188. P. 469–481.
 20. *Lobkovsky L., Baranov A., Garagash I., Ramazanov M., Vladimirova I., Gabsatarov Yu., Alekseev D., Semiletov I.* Large earthquakes in subduction zones around the polar regions as a possible reason for rapid climate warming in the Arctic and glacier collapse in West Antarctica // *Geosciences*. 2023. V. 13. P. 171.

GLOBAL GEODYNAMIC MODEL OF THE EARTH AND ITS APPLICATION FOR THE ARCTIC REGION

Academician of the RAS **L. I. Lobkovsky^a**, **A. A. Baranov^{b,#}**, **A. M. Bobrov^c**, **A. V. Chuvaev^d**

^a*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^d*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: aabaranov@gmail.com*

A geodynamic model of the modern Earth is constructed based on the SMEAN2 global seismic tomography model with an emphasis on the Arctic region. For a spherical Earth model, a solution to the Stokes equation for a viscous fluid was obtained based on seismic tomography data using the finite element method using the CitcomS code. The resulting distributions of temperature anomalies and velocity fields of mantle flows explain the main features of the modern geodynamics of the Arctic region. The temperature difference in the subcrustal mantle between the relatively “cold” western Arctic shelf (Barents and Kara seas) and the “warmer” eastern Arctic shelf (from the Laptev Sea to the Bering Strait) reaches 100 degrees, which correlates with the observed intense methane emission from the shallow shelf of the Eastern Arctic caused by permafrost degradation and destruction of gas hydrates against the background of elevated environmental temperatures. The greenhouse effect of methane in the atmosphere, in turn, contributes to climate warming in the Arctic. The region of Iceland and eastern part of Greenland, under the influence of the mantle upwelling, is characterized by a hot subcrustal mantle and increased heat flow at the surface, causing instability and melting of the Greenland ice sheet from below.

Keywords: global geodynamic Earth’s model, three-dimensional numerical modeling, mantle convection, seismic tomography, Arctic, Greenland