

УДК 551.24.035

**ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭПОХИ***Л.И. Лобковский<sup>1,2</sup>, И.А. Гарагаш<sup>1,3</sup>, Д.А. Алексеев<sup>1,2,3</sup>*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (технический университет)<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Поступила в редакцию 05.06.18

Построена трехмерная геомеханическая модель и приводятся результаты расчета напряженно-деформированного состояния Арктики на современном этапе ее геодинамической эволюции, выполненного с использованием программного кода FLAC<sup>3D</sup> и учитывающего GPS-данные о скоростях современных горизонтальных тектонических движений. На основании полученных распределений объемных и сдвиговых деформаций установлено, что Курило-Камчатская и Алеутская зоны субдукции характеризуются высоким уровнем деформаций сжатия и сдвига. В то же время в северо-западной части изучаемой области вдоль хребта Гаккеля локализована область деформаций растяжения и сдвига, причем это растяжение формируется как силами собственного веса, так и распределением горизонтальных тектонических смещений.

*Ключевые слова:* Арктика, Амеразийский бассейн, литосфера, астеносфера, конвекция, геодинамика, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

**Lobkovsky L.I., Garagash I.A., Alekseev D.A.** A three-dimensional model of the Arctic lithosphere stress-strain state for the current epoch. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2018. Volume 93, part 4. P. 19–27.

We have created a three-dimensional geomechanical model of the Arctic lithosphere and present the stress-strain state pattern for the present-day phase of its geodynamic evolution, simulated with FLAC<sup>3D</sup> software and taking into account the velocity distribution of horizontal tectonic movements derived from GPS observations. Based on the analysis of the obtained distributions of bulk and shear strain, we conclude that Kuril-Kamchatka and Aleutian subduction zones exhibit high compression and shear strain levels. At the same time, the Gakkell Ridge region features the tensile and shear deformations, with the extensional deformation being controlled by both gravitational load and horizontal tectonic displacements.

*Key words:* Arctic, Amerasian basin, lithosphere, asthenosphere, convection, geodynamics, numerical modeling, stress-strain state.

Имеющиеся материалы и их интерпретация дают основание считать, что на кайнозойском этапе определилась новая блоковая структура литосферы в Арктическом регионе (Лобковский и др., 2013; Лаверов и др., 2013; Лобковский, 2016). Перемещение литосферного блока Амеразийского бассейна привело к формированию пояса складчатых деформаций на границе континентальной и океанической коры в южной части Канадской котловины на рубеже олигоцена и миоцена. Причина этих трансформаций, как нам представляется, лежит в глубинной геодинамике, обусловленной процессами перемещения подлитосферных мантийных масс конвективной ячейкой в сторону Алеутской зоны субдукции.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что, несмотря на значительный объем проведенных геолого-геофизических исследований океанических структур Северного Ледовитого океана (Лобковский и др., 2011, 2013, 2017, 2018; Гарагаш и др., 2012), полученные результаты все еще недостаточны для построения непротиворечивой картины геодинамической эволюции региона. В этой связи чрезвычайно важным представляется численное моделирование, одним из этапов которого являются построение геомеханической модели, отвечающей современной эпохе, и анализ пространственно-напряженного состояния литосферы с учетом происходящих в ней процессов упруго-пластической деформации, вязкого течения астеносферы, а также тектониче-

ских движений, наблюдаемых по данным космической геодезии (GPS, GNSS).

В настоящей работе приводятся некоторые результаты расчета пространственной картины деформаций литосферы Арктики на современном этапе ее геодинамической эволюции, основанного на трехмерной геомеханической модели, GPS-данных о скоростях современных горизонтальных тектонических движений и использовании программного кода FLAC<sup>3D</sup>.

### Геомеханическая модель литосферы Арктического региона

Исследуемая область в полярной стереографической проекции представляется прямоугольником с характерными размерами  $4980000 \times 7560000$  м (рис. 1). Параметры используемой полярной стереографической проекции: осевой меридиан – 150 E; базовая широта – 70 N; масштабный фактор на широте – 1; единицы измерения – метры; эллипсоид – WGS84. Координаты исследуемой области в проекции: X – от –1500000 до 3510000; Y – от –4000000 до 3350000.

По глубине область моделирования разделяется на три слоя: кору, литосферу и астеносферу. Верхней граничной поверхностью является дневная поверхность (рис. 2, а). Граница Мохо между корой и литосферой построена по материалам ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамбер-

га» (рис. 2, б). Граница астеносферы рассчитана по данным о тепловом потоке исходя из предположения о начале частичного плавления мантии по изотерме 1300° C и стационарности теплового режима литосферы. Для этого использована база данных теплового потока Геологического института РАН, дополненная данными из базы Global Heat Flow Database (<http://www.heatflow.und.edu/index2.html>). Карта теплового потока в регионе и соответствующая граница астеносферы показаны на рис. 3.

На рис. 4 показана окончательная расчетная геомеханическая модель Арктического региона с включением границы астеносферы, созданная в программном пакете FLAC<sup>3D</sup> (Itasca..., 2006).

Для расчетов были выбраны следующие характерные значения механических параметров модели с предельным условием Друкера-Прагера:

$$f^s = 0, f^s = \tau + q_\phi \sigma - k_\phi, \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  – соответствующие инварианты тензора напряжений и его девиаторной части,  $q_\phi$  – коэффициент трения,  $k_\phi$  – сцепление; условие (1) описывает поверхность в пространстве напряжений.

Кора: плотность  $\rho = 2875$  кг/м<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G = 2,085 \times 10^{10}$  Па и объемный модуль  $K = 6,254 \times 10^{10}$  Па, коэффициент трения  $q_\phi = 0,64$ , сцепление  $k_\phi = 6 \times 10^7$  Па и прочность на растяжение  $\sigma' = 3 \times 10^7$  Па.

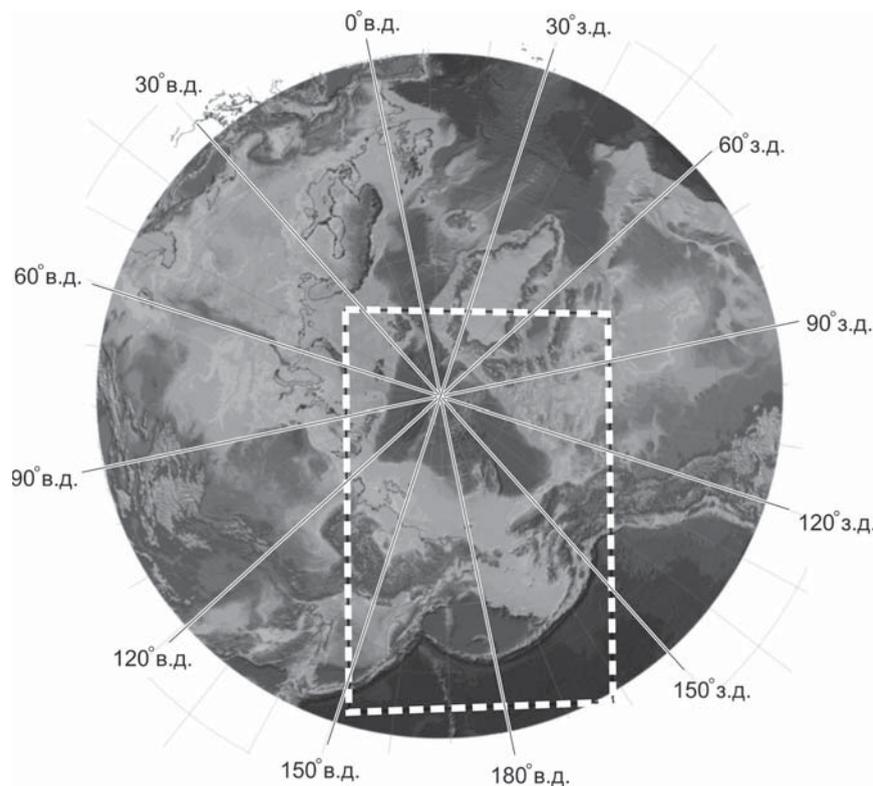


Рис. 1. Карта изучаемого района и положение области моделирования

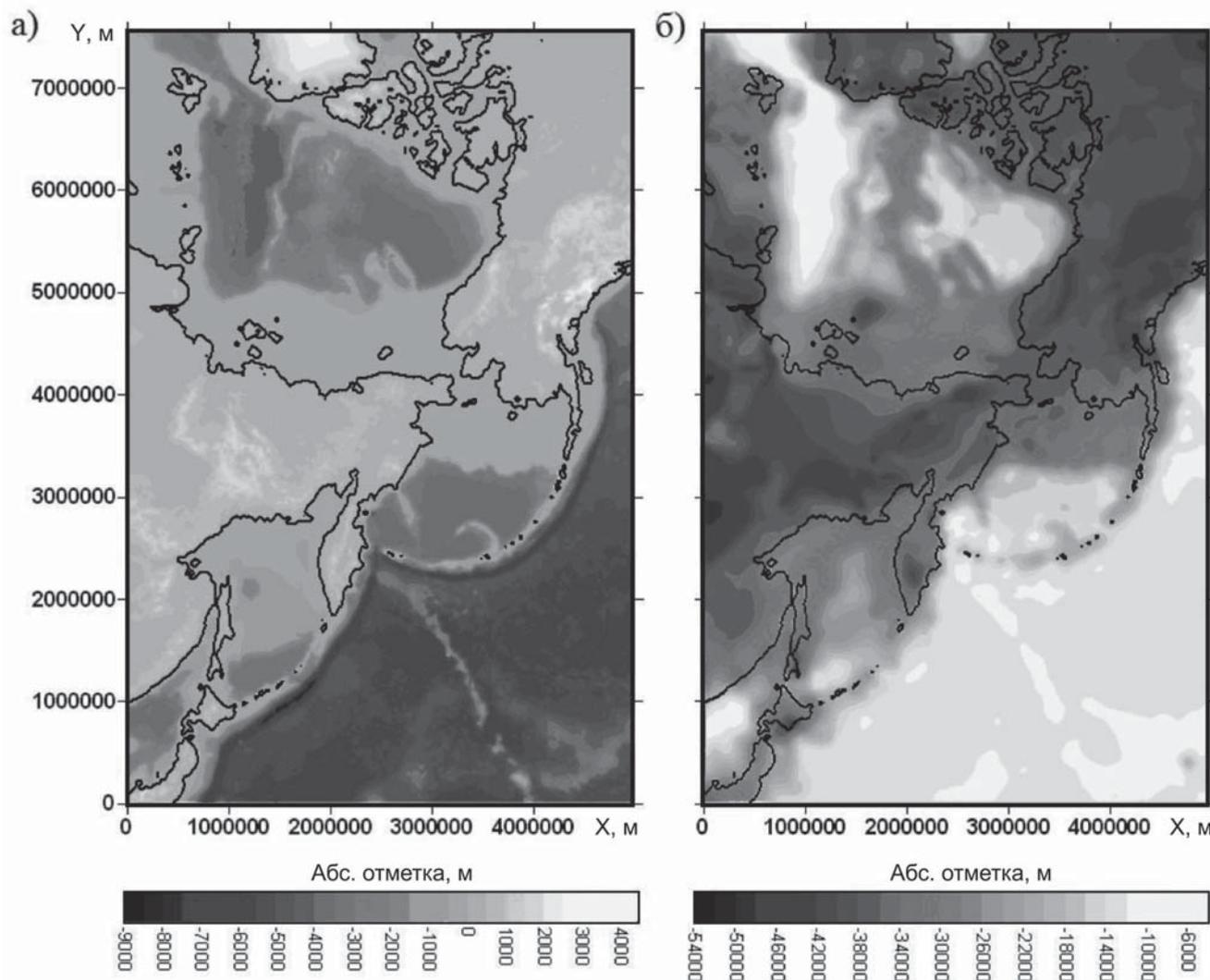


Рис. 2. Батиметрия Арктического региона (а) и поверхность Мохо (б)

Литосфера: плотность  $\rho = 3225 \text{ кг/м}^3$ , модуль сдвига  $G = 3,42 \times 10^{10} \text{ Па}$  и объемный модуль  $K = 1,025 \times 10^{11} \text{ Па}$ , коэффициент трения  $q_\phi = 0,1$ , сцепление  $k_\phi = 4 \times 10^8 \text{ Па}$  и прочность на растяжение  $\sigma' = 2 \times 10^8 \text{ Па}$ .

Астеносфера: плотность  $\rho = 3225 \text{ кг/м}^3$ , модуль сдвига  $G = 3,42 \times 10^{10} \text{ Па}$  и объемный модуль  $K = 1,025 \times 10^{11} \text{ Па}$ , вязкость  $\eta = 1,5 \times 10^{10} \text{ Па} \times \text{с}$ .

**Расчет напряженно-деформированного состояния**

Напряженно-деформированное состояние земной коры складывается под действием многих факторов. В представленном расчете учтены основные: нескомпенсированный вес горного рельефа, современные тектонические движения, ползучесть астеносферы.

*Этапы расчета*

1. На первом этапе рассчитывается начальное напряженное состояние модели под действием сил

собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере. Напряжения от сил собственного веса создают фон, на котором развиваются медленные тектонические процессы в литосфере.

2. На втором этапе выполняется нагрузка горизонтальными тектоническими усилиями, порождаемыми движениями тектонических плит. Для этого используются данные о скоростях движения тектонических плит из модели NNR (No-net-rotation velocities model, [http://gsrm.unavco.org/model/files/1.2/GPS\\_vectors\\_after\\_rotation\\_NNR.dat](http://gsrm.unavco.org/model/files/1.2/GPS_vectors_after_rotation_NNR.dat)) (рис. 5).

Для перевода скоростей движения плит из географических координат в полярную стереографическую проекцию (на плоскость) был разработан программный код, позволяющий рассчитать проекцию поля векторов, т.е. учитывающий изменение углов при проецировании. Полученное поле скоростей, используемое для расчетов, показано на рис. 6.

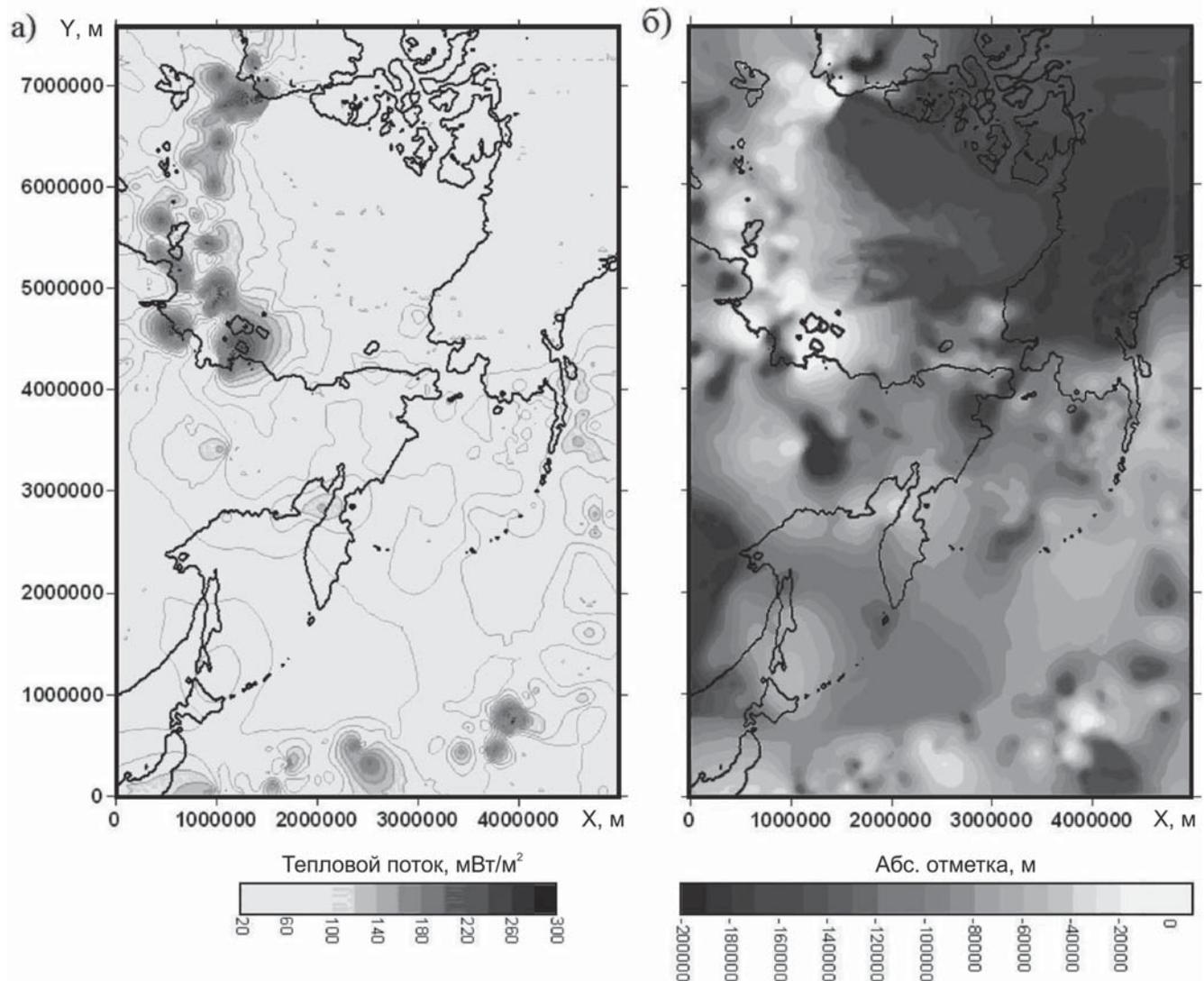


Рис. 3. Карта теплового потока Арктического региона (а) и поверхность астеносферы (б)

### Распределение параметров напряженного состояния от сил собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере

После выполнения вычислений проводился анализ ряда параметров напряженно-деформированного состояния. Прежде всего, это инварианты тензоров напряжений – среднее напряжение

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}, \quad (2)$$

и интенсивности сдвиговых напряжений

$$T = (s_{ij} s_{ij})^{1/2}, \quad (3)$$

где  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$  – компоненты девиатора напряжений.

Заметим, что второй инвариант напряжений практически совпадает по величине с максимальными касательными напряжениями.

Еще один полезный коэффициент – это параметр Лоде-Надаи, который позволяет оценить к какому типу напряженного состояния ближе всего оказывается полученное распределение напряжений. Параметр Лоде-Надаи вычисляется по формуле:

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} - 1 \quad (4)$$

и связан со вторым и третьим инвариантами девиатора напряжений.

Согласно (4), параметр меняется в пределах от  $-1$  до  $+1$ . Так, для чистого растяжения ( $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ )  $\mu_{\sigma} = -1$ , для чистого сжатия ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ )  $\mu_{\sigma} = +1$ , для чистого сдвига ( $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\sigma_1$ )  $\mu_{\sigma} = 0$ .

На рис. 7 построены распределения средних напряжений в земной коре, а на рис. 8 – интенсивности касательных напряжений.

На рис. 9 показано распределение параметра Лоде-Надаи в земной коре, отвечающее состоянию,

установившемуся под действием сил собственного веса и температуры. Согласно полученным результатам, в земной коре Арктического региона имеет место разнообразное сочетание зон растяжения и сжатия, разделенных областями сдвига. Можно отметить, что район хребта Гаккеля в северо-западной части рассматриваемой области находится в условиях растяжения (рис. 7, 9).

**Распределение параметров деформированного состояния от горизонтальных движений земной коры по данным GPS**

На рис. 10, а построены распределения средних деформаций, соответствующие полю скоростей, представленному на рис. 6, а на рис. 11, а – интенсивности касательных деформаций. На рисунках отдельно приведена картина распределения деформаций в районе хребта Гаккеля (рис. 10, б и 11, б).

Из анализа объемных (рис. 10) и сдвиговых (рис. 11) деформаций видно, что зона субдукции, как и следовало ожидать, характеризуется высоким уровнем деформаций сжатия (рис. 10, а) и сдвига

(рис. 11, а). В то же время в северо-западной части изучаемой области вдоль хребта Гаккеля локализована область деформаций растяжения (рис. 10, б) и сдвига (рис. 11, б).

**Заключение**

Построена трехмерная модель современного напряженно-деформированного состояния литосферы Арктического региона. Из анализа распределения объемных и сдвиговых деформаций следует, что зона субдукции характеризуется высоким уровнем деформаций сжатия и сдвига. В то же время на северо-западе вдоль хребта Гаккеля локализована область деформаций растяжения и сдвига, причем это растяжение формируется как силами собственного веса, так и распределением горизонтальных тектонических смещений. Как известно, хребет Гаккеля имеет срединно-океаническую природу, отличается ультра-медленным спредингом (Cochran et al., 2003) и развитие вдоль него растягивающих деформаций не вызывает удивления.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-50-00095.

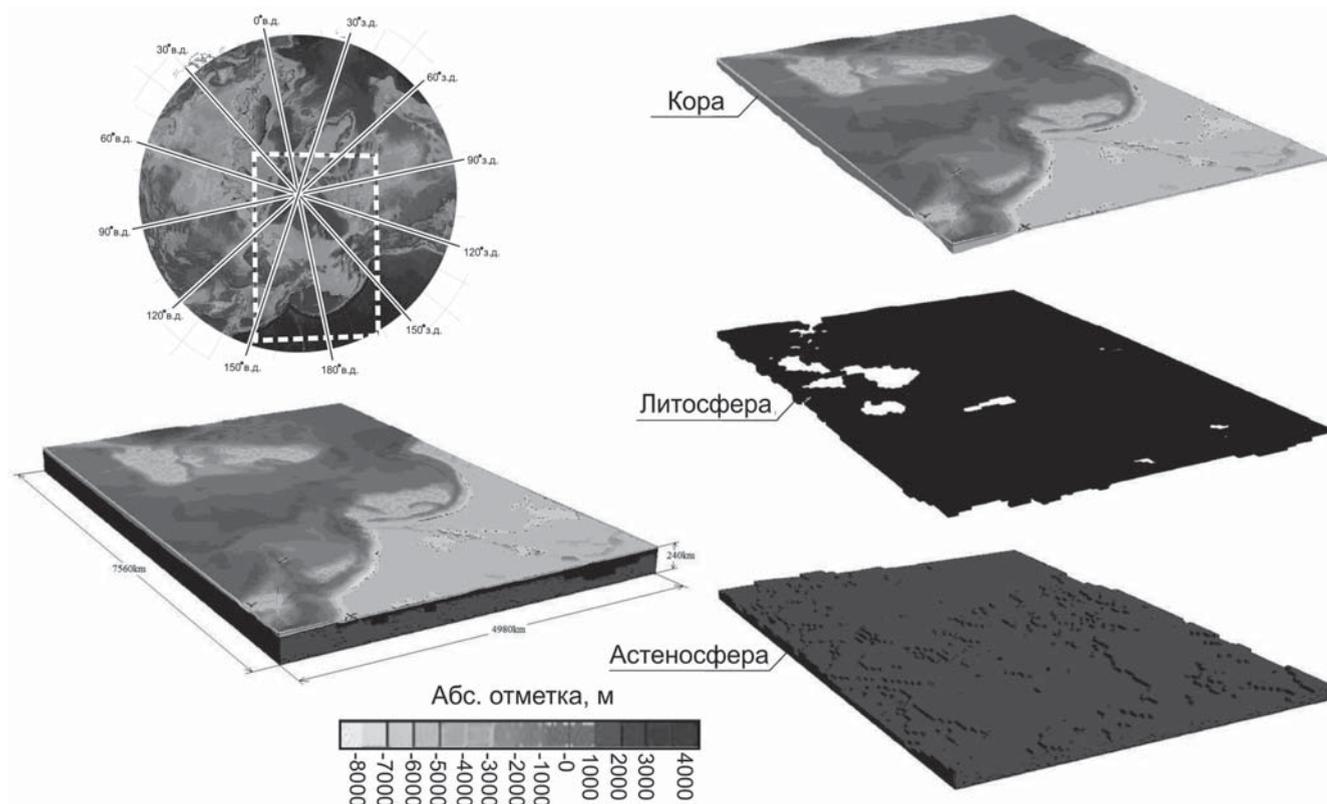


Рис. 4. Расчетная схема

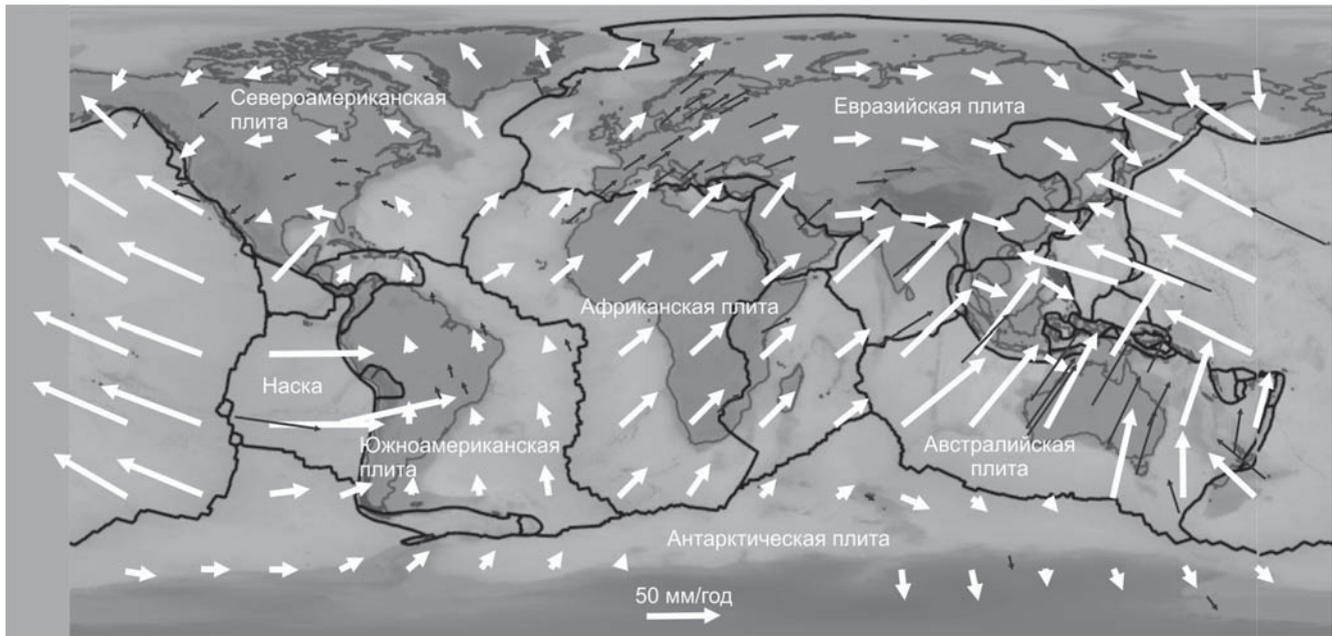


Рис. 5. Скорости движения плит. Темными стрелками показаны скорости, измеренные с помощью GPS-приемников, светлыми – скорости, вычисленные по модели движения плит NNR-NUVEL

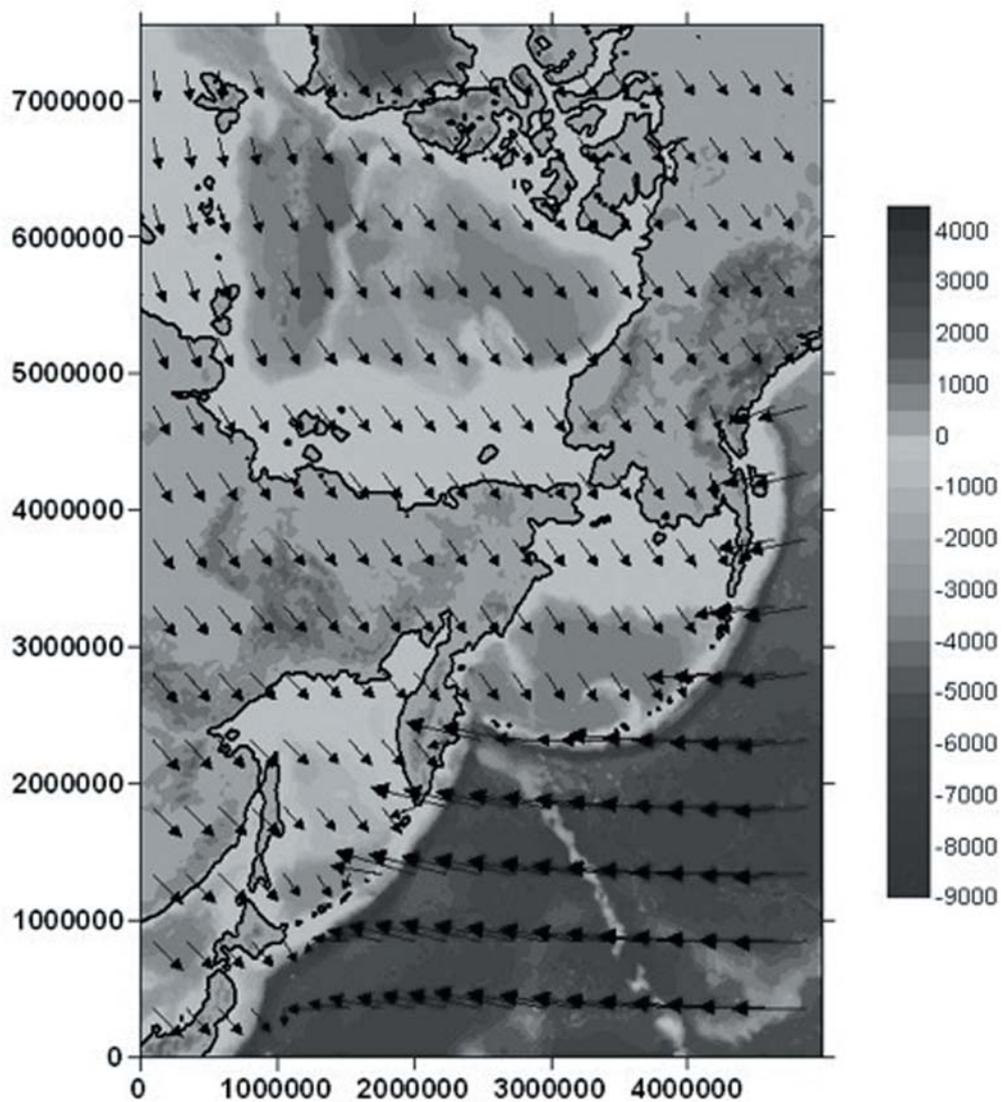


Рис. 6. Поле скоростей по данным модели NNR. Оттенками серого показан рельеф поверхности

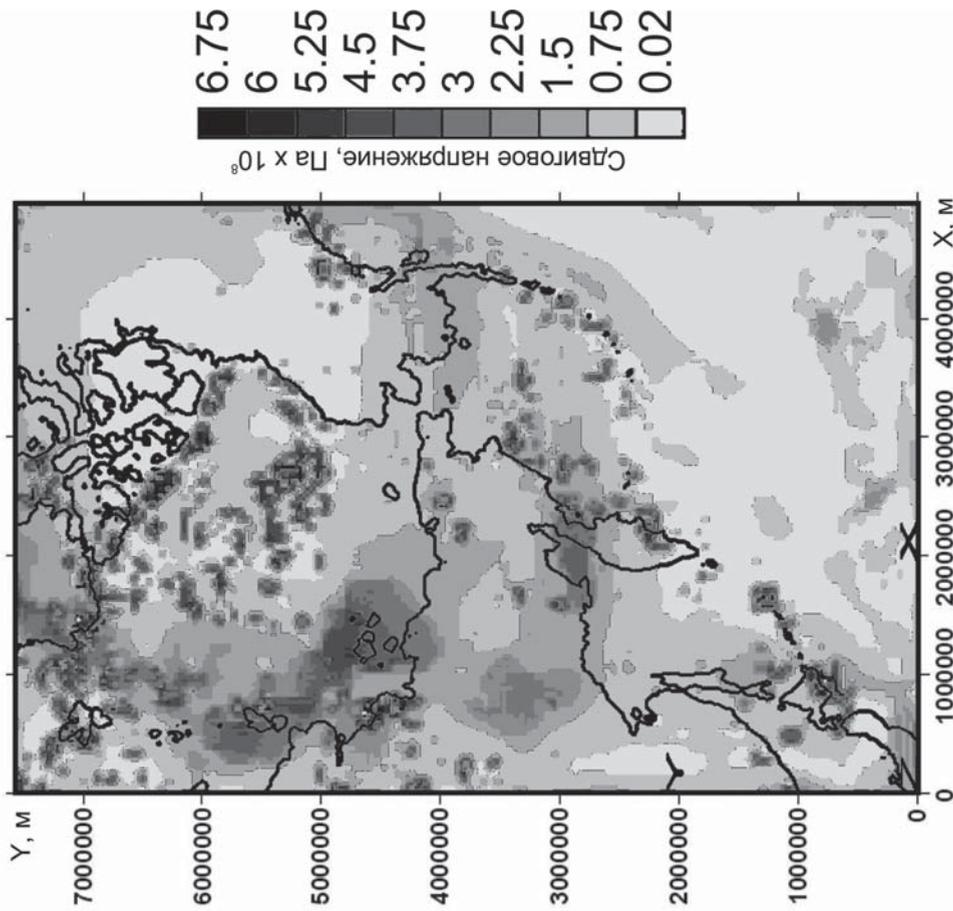


Рис. 8. Распределение интенсивности касательных напряжений в земной коре от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере

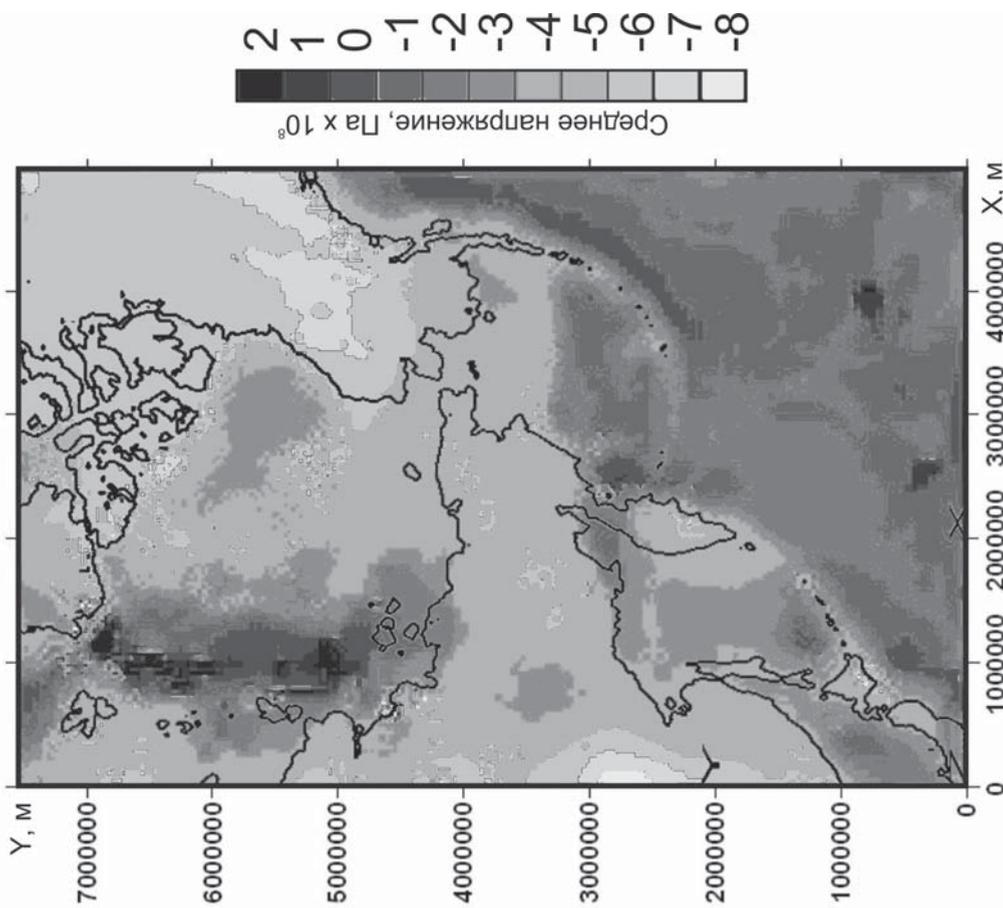


Рис. 7. Распределение средних напряжений в земной коре от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере

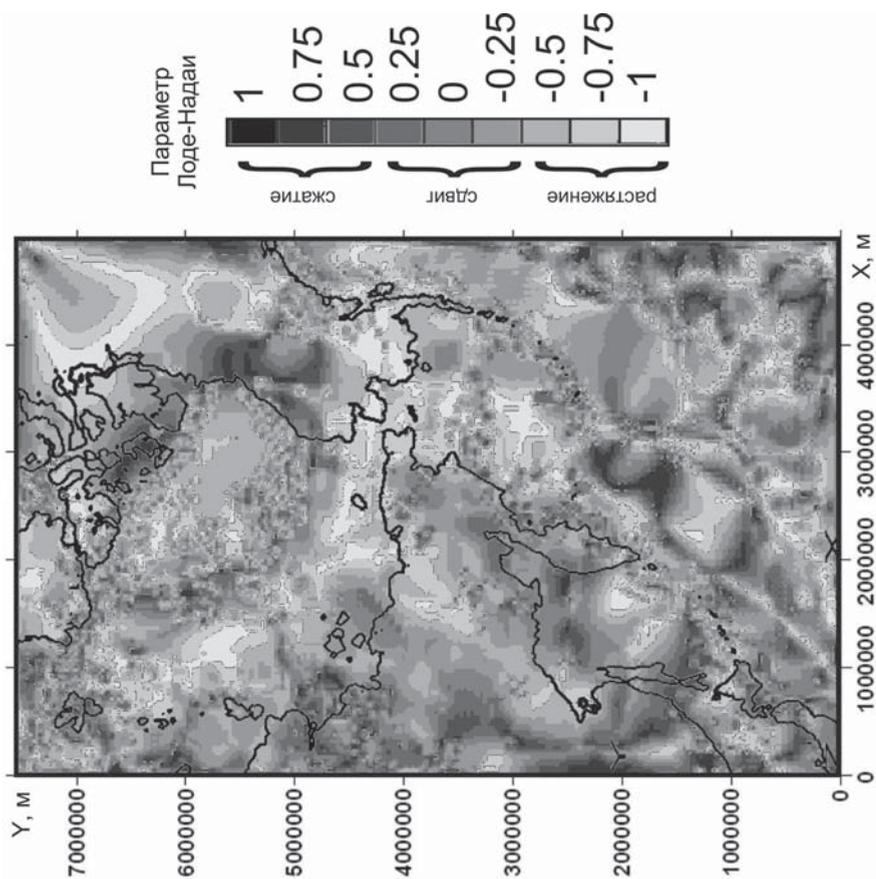


Рис. 9. Распределение параметра Лодэ-Надаи в земной коре от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере

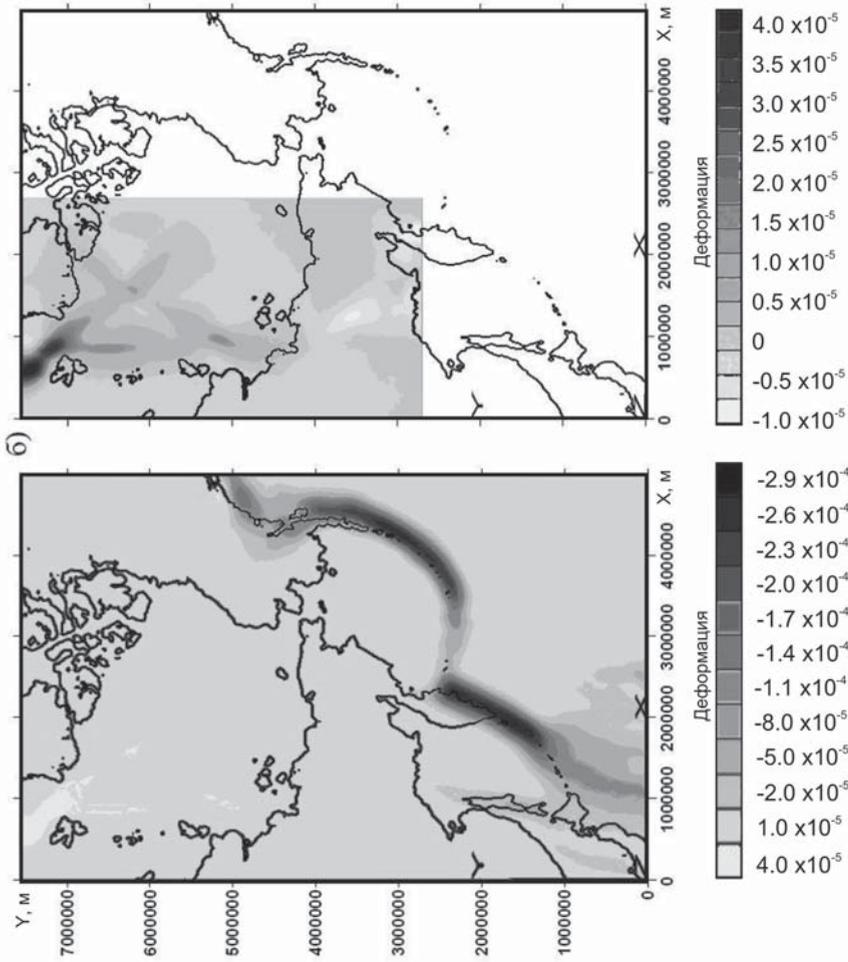


Рис. 10. Распределение объемных деформаций во всей области (а) и в северо-западной части области (б)

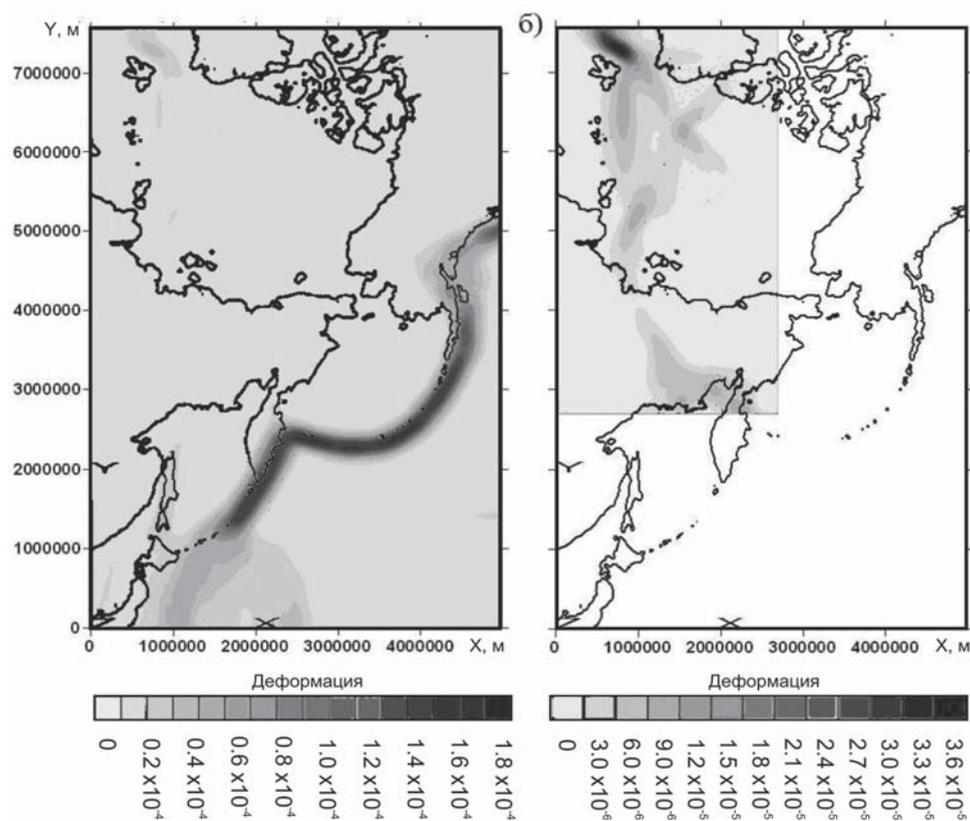


Рис. 11 Распределение сдвиговых деформаций во всей области (а) и в северо-западной части области (б)

### ЛИТЕРАТУРА

Гарагаш И.А., Лобковский Л.И., Шлезингер А.Е. Структура арктической глубоководной котловины Северного Ледовитого океана в позднем мезозое – кайнозое по данным сейсмических исследований // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 4. М.: ГЕОС. 2012. С. 11–28.

Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и прилегающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.

Лобковский Л.И., Вержбицкий В.Е., Кононов М.В. и др. Геодинамическая модель эволюции Арктического региона в позднем мезозое–кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа России // Арктика: экология и экономика. 2011. № 1. С. 104–115.

Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Моделирование геодинамической эволюции котловины

Подводников, поднятий Альфа–Менделеева и хребта Ломоносова Американо-Азиатского бассейна // Естественные и технические науки. 2017. № 12 (114). С. 120–124.

Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Геодинамическая модель эволюции основных структур Американо-Азиатского бассейна // Докл. АН. 2018. Т. 480, № 4. С. 469–473.

Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38.

Cochran J.R., Kurras G.J., Edwards M.H., Coackley B.J. The Gakkel Ridge: bathymetry, gravity anomalies and crustal accretion at extremely slow spreading rates // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. N 2116.

Itasca Consulting Group, Inc. FLAC<sup>3D</sup> – Fast Lagrangian Analysis of Continua in Dimensions. Ver. 3.1. User’s Manual. Minneapolis: Itasca, 2006.

**Сведения об авторах:** Лобковский Леопольд Исаевич – докт. физ.-мат. наук, член-корр. РАН, руководитель геологического направления ИО РАН, зав. лабораторией МФТИ, e-mail: llobkovsky@ocean.ru; Гарагаш Игорь Александрович – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. лабораторией ИФЗ РАН, e-mail: garagash@mail.ru; Алексеев Дмитрий Александрович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. МФТИ, e-mail: alexeevgeo@gmail.com