

УДК 551.241+551.2.03

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОДНЯТИЯ АЛЬФА-МЕНДЕЛЕЕВА И КОТЛОВИНЫ ПОДВОДНИКОВ В СРЕДНЕМ МЕЛУ

© 2022 г. Л. И. Лобковский^{1, 2, *}, В. Д. Котелкин^{1, 3}, В. А. Поселов⁴, С. Н. Кашубин⁵, О. Е. Смирнов⁴, Ю. В. Габсатаров^{1, 2, **}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. акад. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия

⁵Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: llobkovsky@ocean.ru

**e-mail: yuryg@gsras.ru

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 16.08.2022 г.

Предлагается геодинамическая модель, объясняющая формирование особенностей строения земной коры Амеразийского бассейна. Модель связывает эволюцию коры поднятия Альфа-Менделеева и котловины Подводников в меловой период с динамикой изометричной конвективной ячейки в верхней мантии, которую можно трактовать как верхнемантийный плюм. Приведены результаты численного моделирования, которые показывают применимость представленного подхода для объяснения геодинамической эволюции континентальной коры поднятия Альфа-Менделеева и окружающих его котловин Амеразийского бассейна в мелу.

Ключевые слова: Арктика, поднятие Альфа-Менделеева, котловина Подводников, конвекция, магматизм, растяжение коры, коровая эрозия, погружение литосферы

DOI: 10.31857/S0030157422060077

Одним из дискуссионных вопросов эволюции Амеразийского бассейна Арктики является происхождение земной коры поднятия Альфа-Менделеева и прилегающей к нему котловины Подводников. Большинство арктических геологов и геофизиков относят кору этих структур к континентальному типу. Однако убедительного геодинамического объяснения наблюдаемых различий в строении и эволюции указанных тектонических структур, к которым, в частности, относятся различия в мощности коры, магматических проявлениях, вертикальных движениях и т.д., до последнего времени не было. С этим обстоятельством связаны часто высказываемые прямо противоположные мнения об амплитуде растяжения коры котловины Подводников и других тектонических структур Амеразийского бассейна. Так, например, существует точка зрения, высказанная А.М. Ни-

кишиным [15] о большом растяжении континентальной коры котловины Подводников (порядка 100%), которое необходимо принять, чтобы объяснить пониженную мощность ее кристаллического слоя (около 15 км). Альтернативная точка зрения, основанная на данных МОГТ и сейсмического зондирования МПВ в котловине Подводников, которую отстаивает В.А. Поселов [12, 16], наоборот, заключается в признании незначительного растяжения коры котловины (порядка 10%).

На рис. 1 показан сейсмический разрез коры вдоль профиля, проходящего через котловину Подводников, понятие Менделеева и Чукотскую впадину (см. врезку), полученный в результате исследований ГСЗ, выполненных ОАО «Севморгео» в 2012 г. Обработка данных ГСЗ выполнялась в ФГБУ «ВСЕГЕИ» [3] под руководством С.Н. Кашубина. Основной целью обработки и интерпре-

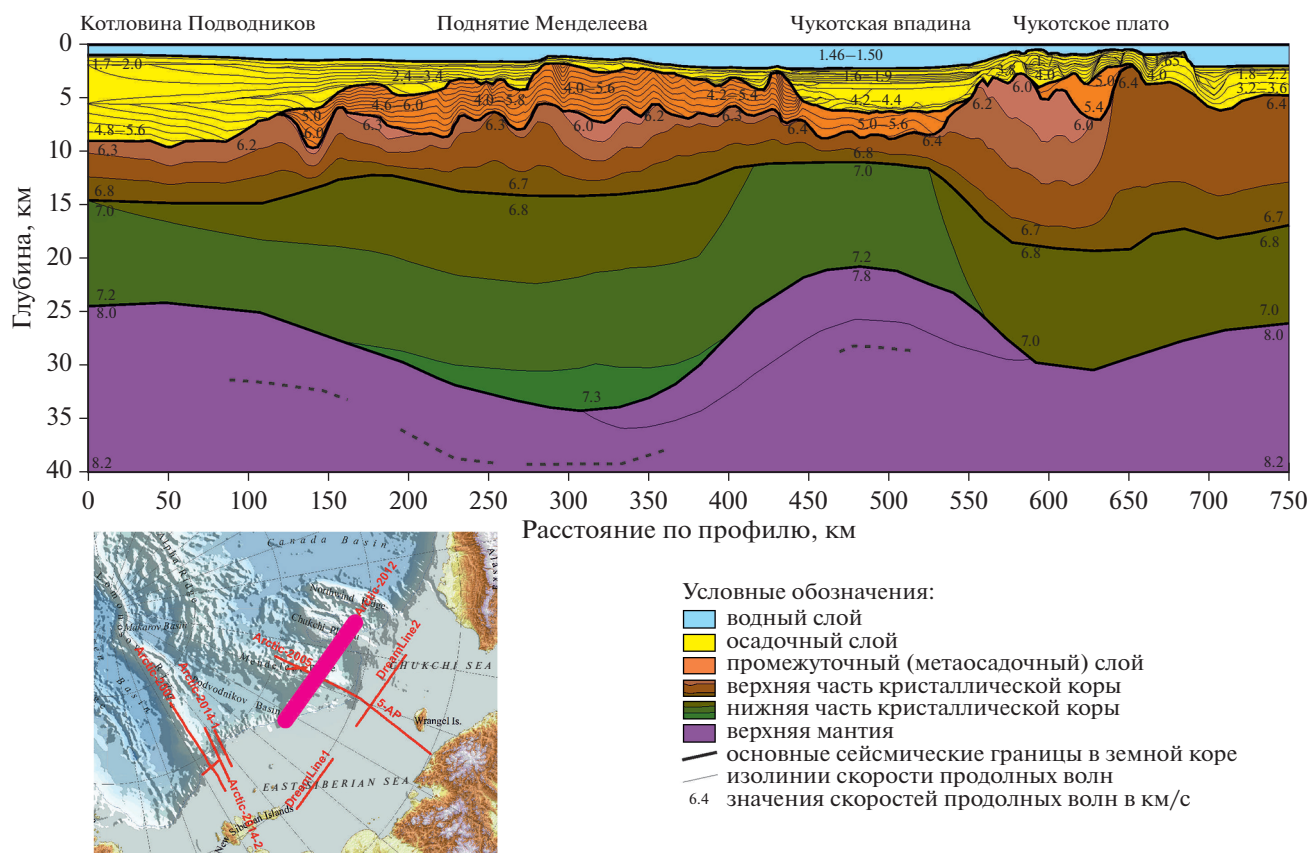


Рис. 1. Глубинный разрез ГСЗ профиль Арктика-2012 (по [15], модифицировано).

тации являлось изучение структуры земной коры вдоль линии профиля для усиления доказательной базы российского пересмотренного Представления на расширение внешней границы континентального шельфа в Северном Ледовитом океане, поэтому работа выполнялась в тесном сотрудничестве с ФГБУ «ВНИИОкеангеология» — организации, ответственной за подготовку материалов к Представлению (под руководством В.А. Поселова), с увязкой с другими разрезами ГСЗ в районе работ [16].

При работах ГСЗ использовались пневмоисточник большой мощности СИН-6М (120 л) и самовсплывающие автономные донные сейсмические станции (М-К4-СМ-26М) с многокомпонентной регистрацией (X , Y , Z -компоненты и гидрофон H). Профиль отработан по плотной системе наблюдений: интервал между донными станциями составлял 10–20 км; расстояние между возбуждениями (сейсмическими трассами) — 315 м. Отметим некоторые характеристики регионального строения земной коры. Мощность верхней кристаллической коры, определяемой по значениям скоростей продольных волн (от 6.0–6.3 км/с в верхней и до 6.7 км/с в нижней частях), меняется от 15 км под Чукотским плато до 2 км

под Чукотской впадиной. На поднятии Менделеева мощность верхней коры составляет 7–8 км, а в котловине Подводников — около 5 км. Нижняя кристаллическая кора характеризуется значениями скоростей продольных волн от 6.8 до 7.2 км/с. Под поднятием Менделеева в низах кристаллической коры скорости продольных волн возрастают до 7.3 км/с. Мощность нижней коры вдоль профиля составляет около 10 км под котловиной Подводников и Чукотской впадиной и достигает почти 20 км под поднятием Менделеева. Наблюдаемое значительное утонение нижней коры (в два раза) в котловинах, обрамляющих поднятие Менделеева, требует объяснения в рамках реалистичной геодинамической модели образования коры Американо-Азиатского бассейна.

Ниже предлагается физическое объяснение данного явления, основанное на предлагаемой нами конвективной модели эволюции коры, которая является частью разработанной в последние годы общей геодинамической модели эволюции Арктики в период от поздней юры до современности [7, 8]. Согласно этой модели, эволюция Арктического региона вместе с примыкающей к нему Восточной Азией, определяется развитием верхнемантийной циркуляции под литосферой

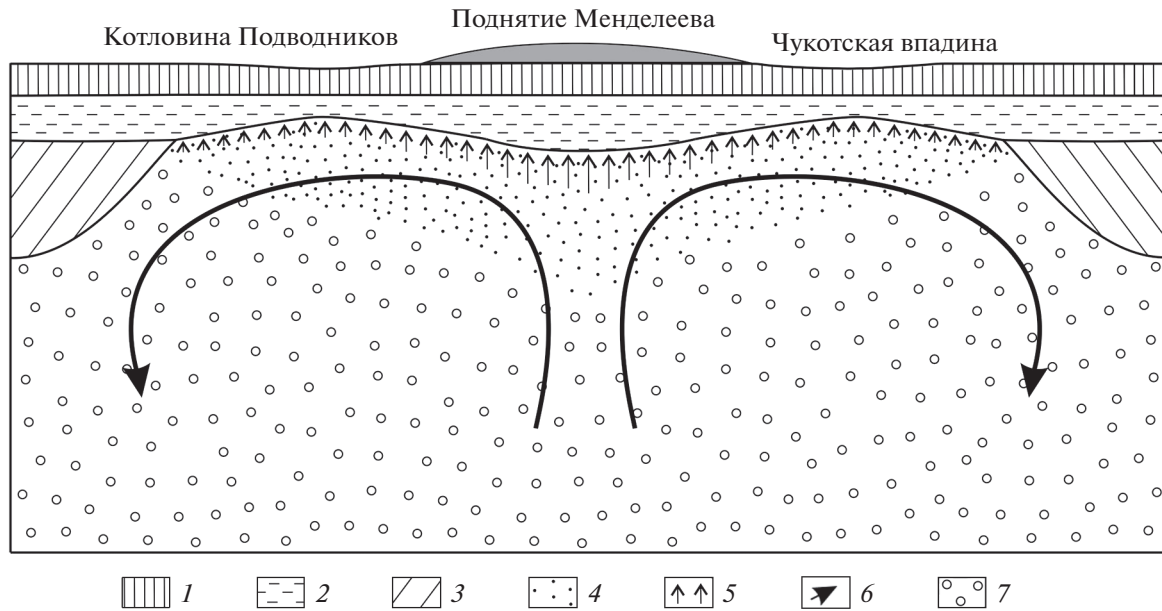


Рис. 2. Модель верхнемантийного плюма в области поднятия Менделеева. 1 – Верхняя консолидированная кора; 2 – нижняя пластичная кора, насыщенная магматическими интрузиями; 3 – литосфера; 4 – частично расплавленная область астеносферы; 5 – потоки фильтрации магмы в кору из астеносферы; 6 – направления течения вещества верхней мантии в области плюма; 7 – астеносфера.

этих регионов, сопряженной с зоной субдукции Тихоокеанской литосферы. В последующих работах [9, 10] было показано, что наряду с горизонтально вытянутой конвективной ячейкой, определяющей общую направленность эволюции литосферы Арктики, в первую очередь, ее смещение в сторону Тихоокеанской зоны субдукции, в верхней мантии могут возникать изометричные конвективные ячейки, которые можно трактовать как верхнемантийные плюмы. Эти наложенные на горизонтальные течения плюмы приводят к образованию крупных магматических провинций, возникновению значительных вертикальных движений коры, изменению ее мощности и т.д. [11].

Рассмотрим идеализированную схему верхнемантийного плюма, представляющего собой восходящий поток конвективной ячейки, расположенный под формирующейся структурой поднятия Альфа-Менделеева (рис. 2).

С подобного рода плюмами большинство исследователей связывает образование крупных магматических провинций, в данном случае, возникновение так называемого события HALIP в Американо-Арктическом бассейне Арктики в мелу [1, 2]. Поднимающееся вещество мантии приносит дополнительное тепло к подошве литосферы, смещая ее вверх, как фазовую границу, ниже которой находится вещество астеносферы в частично расплавленном состоянии. Поскольку верхняя ман-

тия под литосферой Арктики, согласно общей геодинамической модели [7, 8], испытывает циркуляцию, сопряженную с субдукцией Тихоокеанской литосферы, то ее вещество с течением времени постепенно насыщается компонентами водосодержащей океанической коры, которые проникают в мантию вместе с погружающейся литосферой. Как известно, даже небольшое количество воды приводит к резкому падению температуры солидуса литосферы, снижая ее на величину порядка 200°C. Отсюда следует, что фазовая граница “литосфера–астеносфера” в центральной части плюма, вследствие пониженной температуры солидуса литосферы, может достигнуть подошвы коры, приведя к полному исчезновению подкоревой литосферы (рис. 2). В этом случае в конвективной геодинамической системе возникают два дополнительных процесса: во-первых, интенсивное плавление вещества астеносферы из-за эффекта декомпрессии при его подъеме к границе коры, сопровождаемое вертикальной фильтрацией магмы, ее интрузивным проникновением в кору и экструзивным излиянием на поверхность; во-вторых, механическая эрозия коры снизу на ее подошве вследствие сцепления веществом коры с горизонтально растекающимся веществом астеносферного плюма. Эрозия нижней коры, очевидно, будет приводить к уменьшению ее мощности фактически без заметного растяжения верхнего хрупкого слоя коры. Такой эрозионный механизм значительного утонения ниж-

ней коры без заметного растяжения верхнего слоя коры позволяет объяснить наблюдаемые различия в строении коры котловины Подводников и поднятия Менделеева, а именно: значительное утонение, примерно в 2 раза, нижнего пластичного слоя коры котловины Подводников по сравнению с нижним слоем коры поднятия Менделеева (см. рис. 1). Относительно повышенная мощность коры поднятия Менделеева, расположенного над осевой зоной восходящего астеносферного течения, объясняется тем, что, во-первых, здесь происходит наиболее интенсивное наращивание коры вследствие внедрения в нее большого количества базальтового расплава, и, во-вторых, в приосевой зоне механизм горизонтальной эрозии нижнего слоя коры не является эффективным из-за близких к нулю скоростей горизонтального растекания астеносферы (см. рис. 2).

Таким образом, предлагаемая конвективная геодинамическая модель эволюции коры Американо-Азиатского бассейна в меловое время полностью снимает отмеченное выше кажущееся противоречие между небольшой величиной растяжения верхнего слоя коры в котловине Подводников и ее значительно меньшей толщиной по сравнению с мощностью коры поднятия Альфа-Менделеева.

Необходимо также отметить еще один важный вывод общей геодинамической модели эволюции Арктики, касающийся объяснения относительно быстрого погружения коры котловины Подводников, а также поднятия Альфа-Менделеева и других тектонических структур Американо-Азиатского бассейна, начавшегося около 45 млн лет назад. Согласно нашей модели [4], примерно в это время резко снизилась интенсивность верхнемантийной циркуляции под Арктикой, так как именно в этот момент Тихоокеанская плита, погружающаяся под литосферу Арктики в Алеутской зоне субдукции, достаточно резко изменила направление своего движения с северного на западное и стала погружаться под Азиатский континент, в частности, в Курило-Камчатской и Японской зонах субдукции. Резкое замедление верхнемантийной циркуляции под Арктикой привело к ультрамедленному спредингу в хребте Гаккеля, общему охлаждению литосферы и астеносферы, что, в свою очередь, привело к началу погружения коры на всей территории Американо-Азиатского бассейна примерно 45 млн лет назад.

Рассмотрим теперь вышеописанную качественную геодинамическую модель с позиций численного математического моделирования. Численное 2D-моделирование региональной верхнемантийной конвективной ячейки, создающей эффект верхнемантийного плюма, проводилось в рамках термохимической модели вязкой жидкости в приближении Буссинеска с учетом движения и

эволюции корового слоя [5, 6]. Модель учитывает следующие геодинамические факторы и характеристики среды: 1) двухслойное строение коры (с верхним холодным высоковязким слоем и нижним значительно менее вязким слоем); 2) увеличение общей мощности коры в результате магматической деятельности (магматические интрузии и вулканические извержения); 3) эффект солидуса, определяющий подошву литосферы; 4) экзотермический фазовый переход оливина в шпинель, усиливающий конвекцию в верхней мантии. Реология мантийного вещества включает как регулярную зависимость вязкости от температуры и давления, так и ее скачкообразные изменения при физико-химических превращениях.

Коровый слой моделируется как относительно легкое, т.е. обладающее силой плавучести F_{cr} , вещество, которое “дрейфует” вдоль верхней поверхности мантии со скоростью, определяемой в ходе моделирования, так что граница Мохо со временем изменяет свое положение [5, 6]. Исходя из условия изостазии, определялся рельеф верхней поверхности коры. Кроме того, хрупкий верхний слой коры считается на порядок более вязким, чем нижний коровый слой. Действие вулканических извержений и внутрикоровых интрузий моделируется как эффект приращения общей мощности корового слоя в области действия горячего плюма. При этом, в нашей упрощенной математической постановке место, время и скорость наращивания коры задаются параметрически как результат магматической деятельности без явного описания процессов фильтрации магмы, ее застывания и т.д., что предвзывает собой отдельную достаточно сложную задачу, требующую специального рассмотрения.

Фазовая граница солидуса, связанная с частичным плавлением мантийного вещества в тонком межзеренном пространстве, зависящим от ($p-T$) условий в мантии, геодинамически проявляется в резком изменении вязкости среды, что определяет подошву литосферы. При расчетах задавался 10-кратный скачок вязкости среды, происходящий при достижении температуры со-

лидуса $T_{sol} = 900^{\circ}\text{C} \left(1 + 0.5 \frac{H_{km}}{660_{km}} \right)$, и в результате численного моделирования определялась конфигурация литосферы. Отметим, что в принятой формуле для температуры солидуса учтен эффект ее понижения примерно на 200°C из-за присутствия воды. Фазовый переход, происходящий на глубине 410 км, является экзотермическим, и соответствующее ему смещение фазовой границы (скачка плотности) приводит к появлению поверхностной силы, усиливающей конвекцию $F_{ph}(x, z) \sim \delta(z - 410) \Gamma T_{410}(x)$ [5, 6]. Мы также полагаем, что скачок плотности, сопровождается

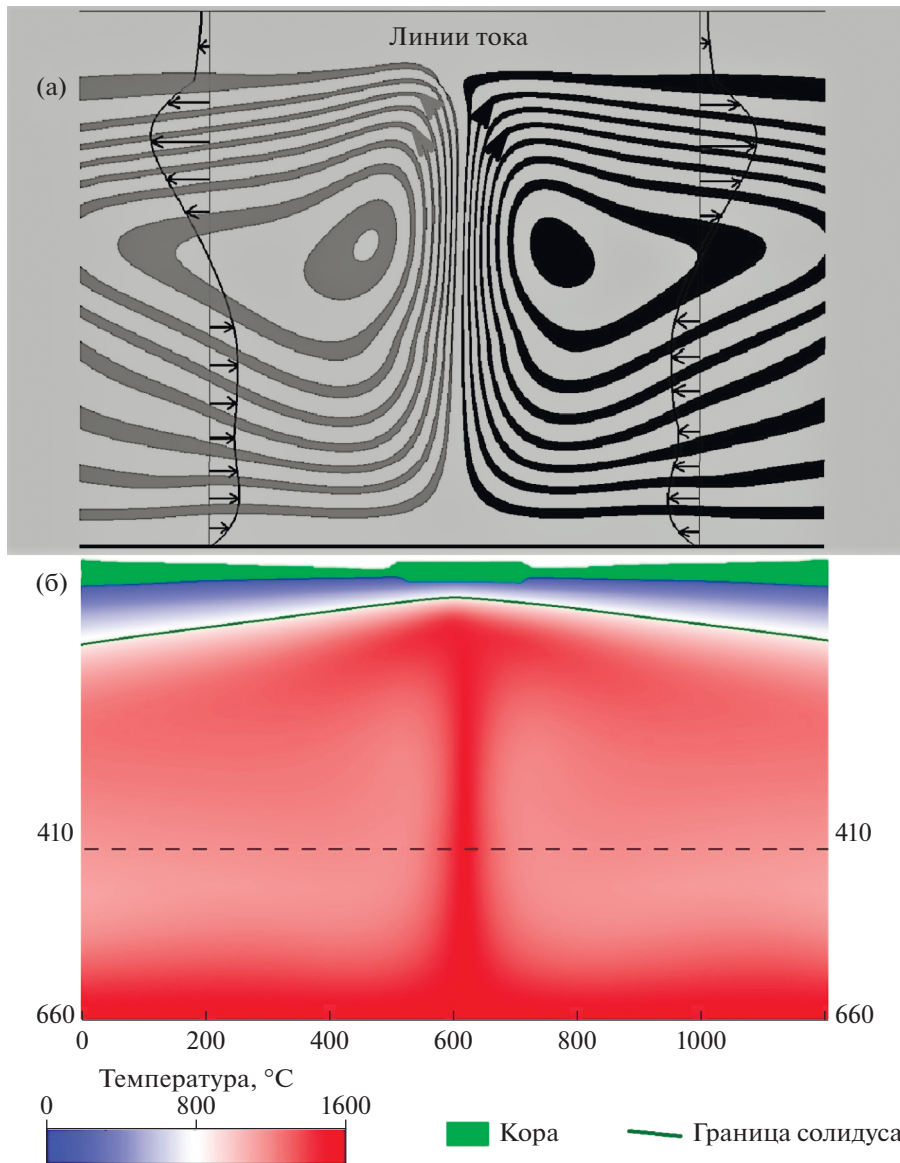


Рис. 3. Результаты численного моделирования: (а) линии тока и профили горизонтальной скорости, (б) распределения температуры и коры.

третьим (в расчете 4-кратным) скачком вязкости. Наше моделирование учитывает влияние этих фазовых изменений на результирующую форму конвекции. Регулярная зависимость вязкости от температуры и давления, которое линейно растет с глубиной H , моделируется экспонентой $\mu_0(p, T) = \exp(\beta p - \alpha T)$ [13]. Скачки вязкости учитываются как значения, приписываемые предэкспоненциальному множителю μ_n в соответствии с указанными выше физико-химическими условиями.

Таким образом, в уравнение движения вязкой среды с переменной вязкостью

$$\nabla_i p = F_i + \nabla^j \mu (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i)$$

входят три силы: $F_z = Gr(T + Crust + \delta(z - Z_{410}) \times \Gamma T_{410})$ – термическая, химическая и фазовая, характеризующиеся тремя коэффициентами – числом Грасгофа Gr , плавучестью коры $Crust$ и параметром фазового перехода Γ . Итоговая зависимость для вязкости $\mu(p, T) = \mu_n \mu_0(p, T)$ включает еще пять коэффициентов – $\alpha, \beta, \mu_1, \mu_2, \mu_3$. Еще один параметр – число Пекле Pe – входит в уравнение теплопроводности. Значения этих параметров находятся по известным физическим характеристикам вещества верхней мантии.

При моделировании выставляются “традиционные” граничные условия [5, 13, 14]. На горизонтальных границах прямоугольной расчетной области это условие постоянства температуры и условие непротекания. На боковых границах задается отсутствие каких-либо возмущений, т.е. это скользкие теплоизолированные стенки. Основному моделированию предшествует продолжительный расчет начального состояния, отвечающего конвекции с квазистационарным плюмом в центре расчетной области. Потом включается механизм магматических извержений и проводится моделирование всех вышеперечисленных процессов, в результате взаимодействия которых находится толщина коры и форма рельефа в области действия плюма. Полученные при таком моделировании распределения расчетных величин показаны на рис. 3.

Из эпюры скоростей на верхней панели рис. 3а видно, что скорости горизонтальных смещений в верхней части коры ничтожно малы по сравнению со скоростями смещений в подкоревой астеносфере, которые ответственны за эрозию нижнего слоя коры, показывая незначительное растяжение поверхностного слоя коры при существенном утонении ее нижнего слоя. На нижней панели рис. 3б показан зеленым цветом профиль мощности коры с утолщенным в центре слоем, моделирующим поднятие Менделеева, и примыкающими к нему смежными утоненными участками коры, моделируемыми котловину Подводников и Чукотскую впадину. Таким образом, построенная модель региональной верхнемантийной конвективной ячейки хорошо воспроизводит основные особенности строения земной коры Американо-Тихоокеанского бассейна.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В. и др. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107.
2. Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В. и др. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1126–1144.
3. Кашибин С.Н., Петров О.В., Артемьева И.М. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012 // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 16–36.
4. Кононов М.В., Лобковский Л.И. Влияние верхнемантийной конвективной ячейки и связанной с ней субдукции Тихоокеанской плиты на тектонику Арктики в позднем мелу–кайнозое // Геотектоника. 2019. № 6. С. 27–45.
5. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Регуляризация геодинамических задач с помощью геологических данных // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 3. С. 15–26.
6. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Обоснование геодинамической модели эволюции Арктического региона // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т. 4: Материалы симпозиумов. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 63–65.
7. 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. Т. 31. С. 3–30.
8. 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(1). С. 104–115.
9. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М. Исследование конвекции в верхней мантии, термомеханически связанной с зоной субдукции, и геодинамические приложения к Арктике и Восточной Азии // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 3. С. 139–150.
10. Лобковский Л.И., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д. Развитие модели верхнемантийной конвекции, сопряженной с субдукцией, с приложениями к мел-кайнозойской геодинамике Центрально-Восточной Азии и Арктики // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 455–470.
11. Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Сорохтин Н.О. Образование основных тектонических структур и магматических провинций Арктики в позднем мелу–кайнозое с позиций субдукционно-конвективной модели ее эволюции // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 5–10.
12. Поселов В.А., Буценко В.В., Жолондз С.М. и др. Структуры растяжения в Комплексе Центрально-Арктических подводных поднятий // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 1. С. 3–17.
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. P. 3545–3656.
14. Chervov V.V., Chernykh G.G. Numerical Modeling of Convection in the Zone of Spreading and Subduction // Journal of Engineering Thermophysics. 2019. V. 28. № 1. P. 14–25.
15. Nikishin A.M., Malyshev N.D., Petrov E.I. Geological structure and history of the Arctic Ocean. The Netherlands: EAGE Publ., 2015. 88 p.
16. Russian Arctic Geotranssects (Results of Geological and Geophysical Studies) / Kaminsky V.D., Poselov V.A., and Avetisov G.P. (Eds.). I.S. Gramberg VNIIOkeangeologia. St.-Petersburg, 2014. 164 p.

Geodynamic Model of the Evolution of the Earth's Crust of the Alpha-Mendeleev Rise and Podvodnikov Basin in the Middle Cretaceous

L. I. Lobkovsky^{a, b, #}, V. D. Kotelkin^{a, c}, V. A. Poselov^d, S. N. Kashubin^e,
O. E. Smirnov^d, Y. V. Gabsatarov^{a, b, ##}

^a*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia*

^c*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^d*I. S. Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, Saint-Petersburg, Russia*

^e*Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint-Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: llobkovsky@ocean.ru*

^{##}*e-mail: yuryg@gsras.ru*

We propose a geodynamic model capable to explain the formation of structural features of the Earth's crust in the Amerasian basin. The model relates the evolution of the crust of the Alpha-Mendeleev Rise and the Podvodnikov Basin in the Cretaceous to the dynamics of an isometric convective cell in the upper mantle, which can be interpreted as an upper mantle plume. The presented results of numerical modeling confirm the applicability of the presented approach for explaining the geodynamic evolution of the continental crust of the Alpha-Mendeleev Rise and the surrounding basins of the Amerasian Basin in the Cretaceous.

Keywords: Arctic, Alpha-Mendeleev Rise, Podvodnikov basin, convection, magmatism, crustal extension, erosion of the crust, subsidence of the lithosphere