

УДК 551.24.02

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТКОЛЛИЗИОННЫХ ГРАНИТОВ КАРСКОГО ОРОГЕНА (СЕВЕРНЫЙ ТАЙМЫР, ЦЕНТРАЛЬНАЯ АРКТИКА): ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2025 г. Академик РАН В. А. Верниковский<sup>1,3</sup>, А. Н. Семенов<sup>2,3</sup>, О. П. Полянский<sup>2</sup>,  
А. В. Бабичев<sup>2,3</sup>, А. Е. Верниковская<sup>1,3</sup>, Н. Ю. Матушкин<sup>1,3,\*</sup>

Поступило 26.09.2024 г.

После доработки 30.09.2024 г.

Принято к публикации 30.09.2024 г.

В работе рассматривается формирование постколлизионных гранитоидов Карского орогена на Северном Таймыре в условиях повышенного теплового потока вследствие распада орогена на предплюмовом этапе его развития (280–250 млн лет назад) на основе применения трёхмерного численного моделирования. Начальная геометрия модельной области, граничные условия и физические свойства для коры и мантии подобраны соответствующими строению земной коры зоны сочленения Карского, Центрально-Таймырского и Сибирского блоков. Проведено сравнение результатов моделирования в двух- и трёхмерной постановке при полностью идентичных параметрах модели и физических свойств веществ, характеризующихся числом Рэлея. Установлено, что 3D-моделирование является более реалистичным и корректным способом описания соответствующих магматических процессов относительно 2D-постановки. Показано, что в основании земной коры в области моделирования на глубине около 50 км устанавливается зона плавления континентального корового материала, возможно при участии небольшого вклада мантийного компонента, генерирующая подъём магмы и формирование группы пространственно сближенных гранитоидных массивов. Становление массивов с диаметром 10–20 км происходило на глубинах от 14 до 8 км на протяжении 15 млн лет, что близко к реальному геологическому положению постколлизионных штоков Карского орогена.

**Ключевые слова:** Арктика, Карский ороген, Северный Таймыр, Сибирский кратон, коллизия, плюм, граниты, термальная модель, 3D-моделирование

DOI: 10.31857/S2686739725010097 EDN: GWPJHV

### ВВЕДЕНИЕ

Карский ороген представляет собой одну из ключевых структур Арктики, простирающуюся вдоль северной части Таймырского полуострова почти на 1000 км. Его формирование

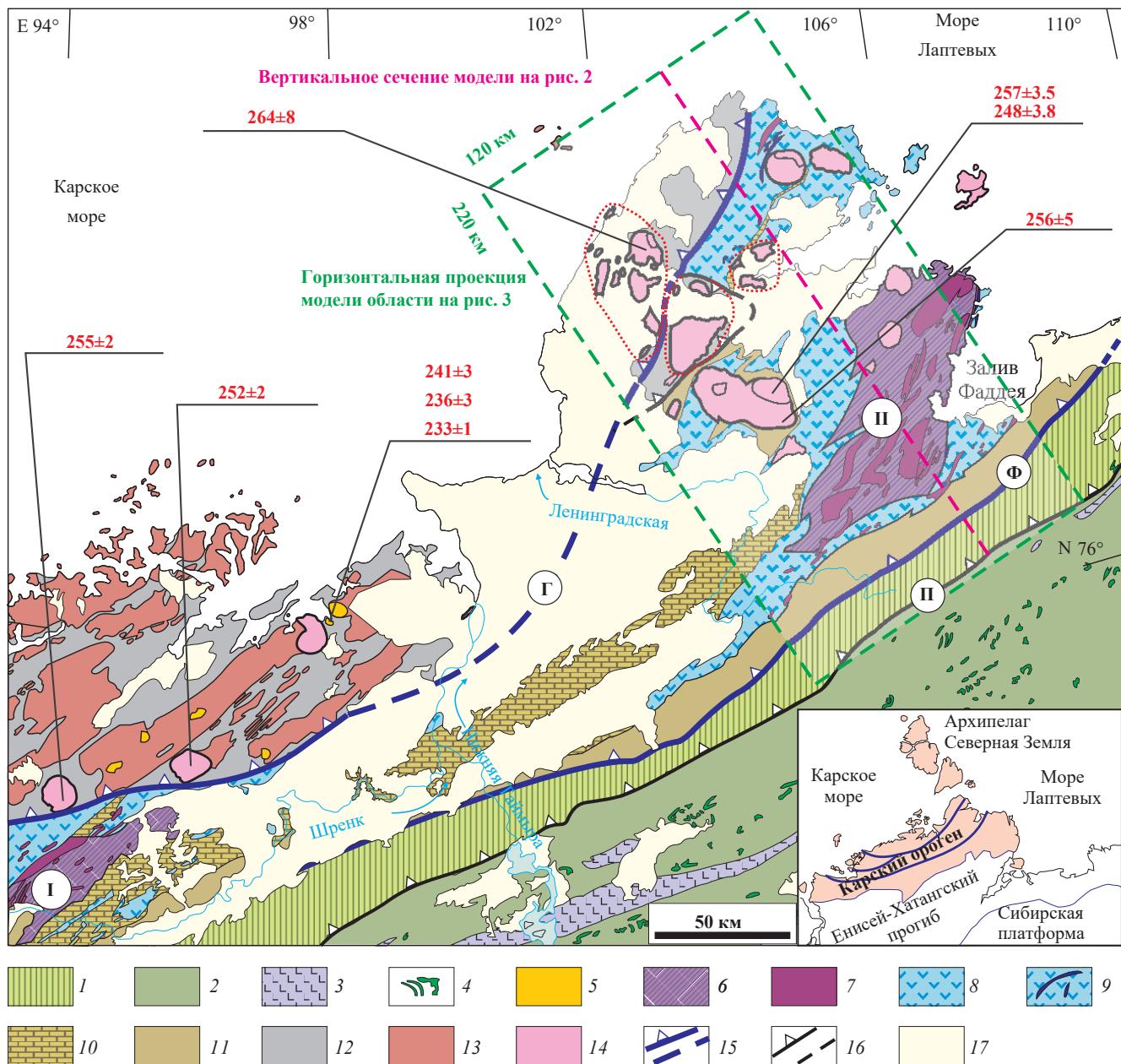
произошло в результате косой коллизии Карского микроконтинента с Сибирью в течение каменноугольного–триасового периодов (обзор литературы в [1, 2]). Орогенный пояс вмещает большой объём гранитоидов и метаморфических пород разных фаций (рис. 1). На основе геолого-структурных, петро-геохимических и U–Th–Pb-изотопных данных для цирконов из гранитов выделены стадии синколлизионного (315–282 млн лет), и постколлизионного (264–248 млн лет), гранитоидного магматизма ([3, 4] и обзор литературы в них). В структуре Карского орогена гранитоиды размещены зонально – в западной и центральной частях региона – преимущественно синколлизионные, а в восточной части – постколлизионные (см. рис. 1). Синколлизионные гранитоиды

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: MatushkinNY@ipgg.sbras.ru



**Рис. 1.** Геолого-тектоническая схема северо-восточной части Карского орогена по [2] с изменениями. 1–2 – Южный домен (Южно-Таймырский складчатый пояс) – деформированная пассивная окраина Сибирского палеоконтинента: 1 – преимущественно доломиты и известняки Северо-Быргрангской зоны ( $O-C_2$ ); 2 – преимущественно песчаники, аргиллиты и угленосные отложения Южно-Быргрангской зоны ( $C_3-P_2$ ); 3–5 – образования Сибирских траппов ( $P_3-T_1$ ): 3 – базальты и туфы; 4 – долеритовые силлы; 5 – щелочные и субщелочные сиениты, граниты и монцониты (249–233 млн лет); 6–10 – Центральный домен (Центрально-Таймырский аккреционный пояс): 6 – Мамонто-Шренковский (I) и Фаддеевский (II) гранитно-метаморфические терреинсы (PP–MP); 7 – неопротерозойские гранитоиды (940–850 млн лет); 8 – островодужные комплексы ( $NP_{1-3}$ ); 9 – офиолиты, включая плагиограниты (750–730 млн лет); 10 – карбонатные терреинсы; 11 – деформированный чехол Сибирского палеоконтинента ( $NP_3-C_1$ ); 12 – Северный домен (Северо-Таймырский (Карский) блок) – пассивная окраина Карского микроконтинента ( $NP_3-E$ ); 13 – синколлизионные граниты (315–305 и 287–282 млн лет); 14 – постколлизионные граниты (264–248 млн лет) (красным пунктиром – предполагаемые контуры интрузий); 15 – тектонические швы – надвиги (Г – Главный Таймырский, Ф – Пясино-Фаддеевский); 16 – П – Пограничный надвиг; 17 – перекрывающие отложения (J–Q). Значения U–Pb-возраста по цирконам взяты из [1, 2, 5, 6]

локализуются в зонах мигматизации среди пород амфиболитовой фации метаморфизма и представлены, в основном, гранодиоритами и гранитами, менее диоритами. Они формируют разные по размеру неправильной формы тела – линзообразные от первых метров среди мигматитов до крупных (несколько сотен км<sup>2</sup>) массивов, часто вытянутой формы, согласно простирации складчатых и сдвигово-надвиговых структур (обзор литературы в [3]).

Постколлизионные гранитоиды прорывают породы и северного, и центрального доменов, в том числе неметаморфизованные палеозойские отложения чехла Центрально-Таймырского аккреционного пояса, формируя отчёлочные контактовые ореолы роговиков [1, 2]. Они имеют овальную и округлую форму plutонов, небольшие размеры, обычно до нескольких десятков км<sup>2</sup> (см. рис. 1). Их вещественный состав более разнообразен, чем у вышеописанных синколлизионных разностей. Они представлены порфировидными биотитовыми гранитами, субщелочными гранитами, биотит-амфиболовыми гранодиоритами и кварцевыми диоритами, амфибол-биотитовыми кварцевыми сиенитами и монцонитами от слабо пералюминиевых до слабо металюминиевых разностей преимущественно щёлочно-известковой магматической серии. Эти породы обогащены крупноионными литофильными элементами, такими как K, Ba и Sr (обзор литературы в [2]). Внедрение аллохтонных постколлизионных гранитов происходило в заключительную стадию коллизии, после прекращения основных движений Карского микроконтинента в сформировавшейся складчато-надвиговой структуре. Об этом свидетельствует относительно изометрическая форма массивов и отсутствие в них деформаций.

В предыдущих работах, рассматривающих механизмы формирования Карского орогена на синколлизионной и постколлизионной стадиях [3, 4]. Использовалось двумерное моделирование (2D) в постановке задач плоских деформаций, рассматривающее сечение орогена, перпендикулярное Главному Таймырскому шву. Применение двумерной модели Карского орогена было обосновано большой протяжённостью главных разломов и квазилинейной структурой орогена в продольном направлении (северо-восток – юго-запад).

На основе моделирования предложен механизм образования синколлизионных гранитоидов Карского орогена за счёт теплогенерации от радиоактивных элементов в утолщённой коре

орогена без значимого вклада мантийных источников тепла [3]. Показано, что между началом скучивания (утолщения) коры и основным импульсом гранитоидного магматизма в коллизионных орогенах существует временной интервал длительностью около 25 млн лет, требующийся для разогрева земной коры до температур формирования гранитных расплавов. Предложен реалистичный сценарий неравномерного по фронту орогена сближения плит (косой коллизии), объясняющий последовательность этапов синколлизионного магматизма в Карском орогене в интервалах 315–304 и 287–282 млн лет назад.

Для этапа постколлизионного магматизма была разработана 2D-модель с учётом строения Карского орогенного пояса, испытавшего тектоническое скучивание и утолщение коры с образованием мощного гранитного слоя с повышенным содержанием радиоактивных источников тепла [4]. В этой модели предполагается, что Сибирский суперплутон на начальной стадии воздействовал на литосферу как термальный, с избыточной температурой около 250 °C относительно окружающей мантии, а его апикальная часть находилась в области сочленения края Сибирской и Карской плит согласно [7]. Такой температурный градиент вызвал повышенный тепловой поток над плутоном, разогревший и размягчивший зону контакта плит. Под действием теплового потока в “предплутоновый” период развития Карского орогена температура в основании земной коры увеличивается примерно на 100 °C, чего достаточно для повторного плавления в глубинных участках коры. Однако модель в двумерной постановке не позволила решить задачу о формировании постколлизионных гранитоидных интрузивов, наблюдавшихся в верхних, неметаморфизованных осадочных комплексах.

Проблема внедрения магмы в холодные слабо консолидированные осадки до сих пор остаётся малоисследованной, поэтому для этой цели нами построена трёхмерная термомеханическая численная модель, основанная на решении замкнутой системы уравнений Навье–Стокса с экспериментально установленным реологическим законом поведения среды. Постановка задачи и результаты моделирования приводятся ниже.

## ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Постановка задачи термомеханического численного моделирования определялась следующими ограничениями, исходя из имеющихся геологических данных.

1. Предполагается условие отсутствия мантийных базитовых магм, так как гранитоиды постколлизионного этапа магматизма имеют возраст, предшествующий пермо-триасовому рубежу главной фазы излияния траппов (251–250 млн лет назад).

2. Ввиду большой продолжительности тектонического этапа распада орогена (первые десятки млн лет) в сравнении с кратковременным, импульсным воздействием магматического события (не более сотен тысяч – миллиона лет) предполагалось длительное действие повышенного мантийного теплового потока в качестве причины плавления и формирования гранитоидов.

3. В настоящей работе рассматриваются локальные проявления постколлизионного гранитоидного магматизма на отдельных участках орогена. Магматические образования представлены группами небольших тел гранитоидов овальной или округлой в плане формы размером не более 10–30 км в диаметре и поэтому существенным моментом для реконструкции формирования интрузивов является выбор размерности модели.

Двумерное моделирование позволяет адекватно описывать поведение систем, которые мало изменяются в одном из направлений в прямоугольных или цилиндрических координатах. Геологическими объектами применения двумерных моделей служат, например, магматические пластовые тела даек и силлов. Постколлизионные гранитоидные тела Карского орогенного пояса невозможно описать в рамках плоско- или осесимметричной структуры ввиду нерегулярной формы тел и случайного взаимного расположения массивов (см. рис. 1). Поэтому единственным возможным подходом является применение трёхмерного моделирования.

Моделирование проводилось для постколлизионного этапа (пермский–раннетриасовый) длительностью ~30 млн лет (280–250 млн лет). Предполагается, что на предшествующей стадии коллизии произошло утолщение коры за счёт смятия и тектонического скучивания осадочно-метаморфического чехла Карского микроконтинента и Сибирского кратона. В интервале 264–248 млн лет в сформировавшейся складчато-надвиговой зоне происходило внедрение аллохтонных постколлизионных гранитов [2]. Этот магматический эпизод является предметом моделирования в данной работе.

Начальная геометрия модельной области, граничные условия и физические свойства для коры и мантии подобраны соответствующими

строению земной коры зоны сочленения Карского, Центрально-Таймырского и Сибирского блоков. Рассматривался участок земной коры восточной части Центрально-Таймырского блока размером 270\*120\*65 км (длина-ширина-глубина) в районе Главного Таймырского шва (см. рис. 1). По геофизическим данным задаётся утолщение коры от 40 км в Карском блоке (Северный домен) до 46 км под Центральным. Во фронтальной зоне Главного Таймырского надвига мы предполагаем наличие утолщённого до 50 км “киля” земной коры шириной 100 км основываясь на сейсмических данных и по аналогии со строением орогенов Альпийского типа [8].

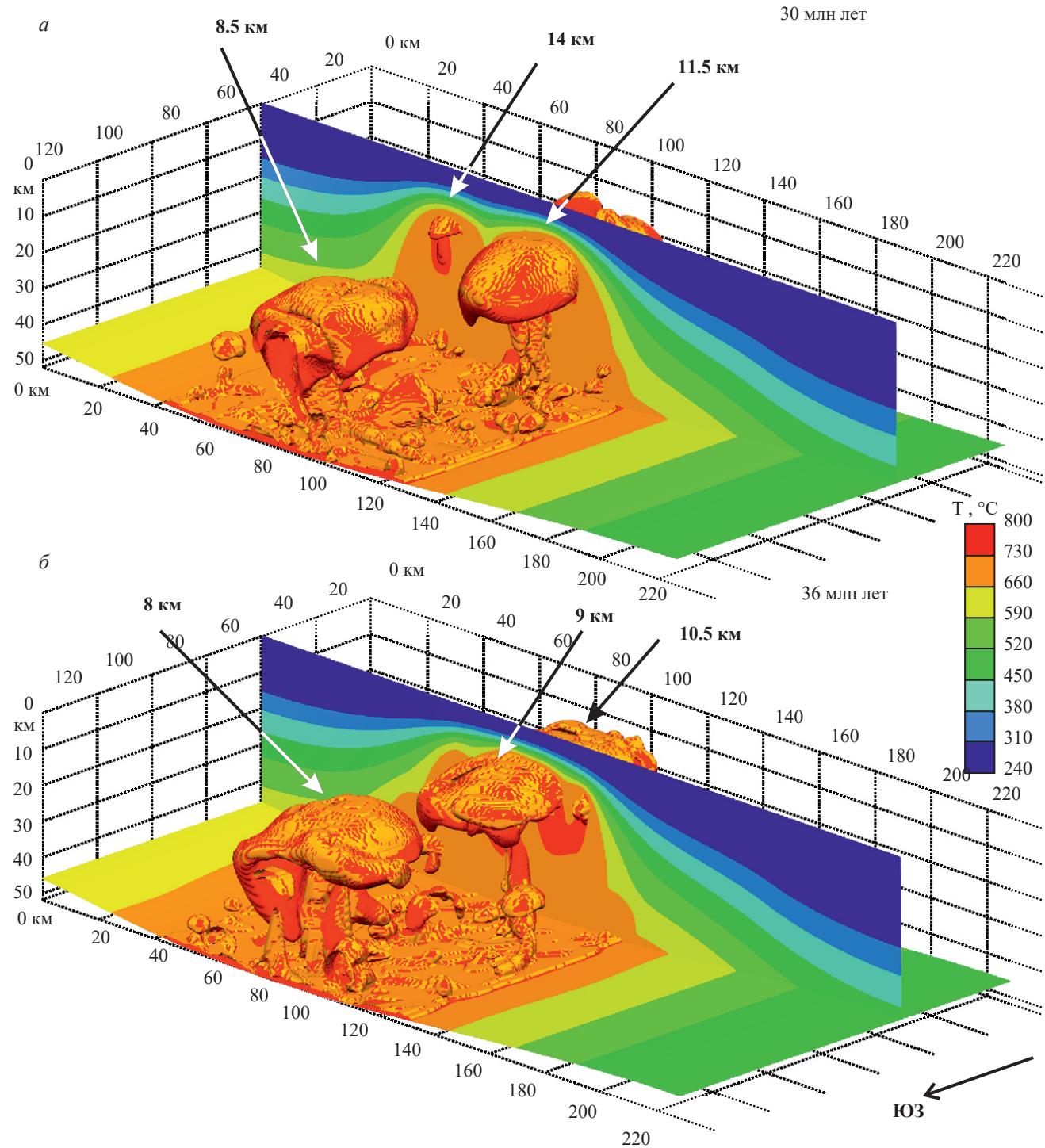
Теплофизические, реологические свойства и мощность радиогенного тепла вещества тектонических блоков коры задавались аналогичными, как в работах [3, 4]. Границыми температурными условиями являются: мантийный тепловой поток вне орогенного пояса 18 мВт/м<sup>2</sup>, теплоизолированные боковые границы, постоянная температура на поверхности. Под Карским орогеном в полосе шириной 90 км задан повышенный мантийный тепловой поток, который варьировал в моделях от 36 до 72 мВт/м<sup>2</sup> [9].

Повышенный поток тепла предполагается ввиду двух факторов: (1) в связи с наличием утолщённого теплогенерирующего корового слоя под орогеном и (2) эффектом теплового воздействия на литосферу подошедшего мантийного суперплюма к основанию утонённой до 160 км литосферы [10]. Температурное распределение в земной коре и мантии в начальный момент времени задается линейным от 0 на поверхности до 850 °C на нижней границе модели на глубине 65 км. За начальный момент (модельное время  $t = 0$ ) в расчётах принят возраст 280 млн лет, т.е. момент завершения коллизионной стадии, маркируемый возрастом внедрения наиболее поздних синколлизионных гранитов (282 млн лет назад).

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent, система уравнений и описание численного метода изложены в [11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования приведены в виде эволюционных картин, которые показывают форму поверхности солидуса и распределение температуры во вмещающих породах и в области частичного плавления. На рис. 2 показана изотермическая поверхность с температурой



**Рис. 2.** Результаты 3D-моделирования. Область соответствует прямоугольнику на рис. 1, где левый дальний край модели относится к Карскому блоку, правый ближний – Центрально-Таймырскому, нижняя поверхность – основание земной коры. Показана изотермическая поверхность солидуса в момент 30 (а) и 36 (б) млн лет от начала действия повышенного теплового потока, максимальный подъём обозначен метками. Цветовая шкала дана в интервале 240–730 °С для детализации структуры массивов

солидуса 730 °C, которая является границей области плавления в земной коре, а также температура в вертикальном поперечном сечении и на поверхности раздела земная кора-мантия. Во всех моделях плавление наступает в наиболее погруженной и нагретой области коры. Вертикальный подъём магмы происходит в области утолщённой коры под действием повышенного теплового потока. Практически одновременно с началом действия повышенного теплового потока расплавы, сформированные в низах земной коры в процессе её утолщения на синколлизионном этапе (315–282 млн лет назад), становятся мобильными за счёт повторного (постколлизионного) плавления коры. Процесс подъёма магматического материала начинается при достижении доли расплава примерно 6–7%. Эти значения степени плавления гранитного вещества соответствуют реологическому порогу при объемной доле расплава 6–8%. Формирование расплавов происходит в месте перехода от утолщённой земной коры с повышенной мощностью тепловыделения к нормальной. Максимальная температура вблизи основания земной коры достигает 780 °C. Это место является областью формирования расплава. Среднее время подъёма магмы, достигающей глубин 8–10 км, составляет примерно 15 млн лет, после чего происходит повторные подъёмы порций магмы с формированием менее крупных тел с периодичностью 1–2 млн лет.

Плутоны (штоки) гранитоидов формируются практически в неметаморфизованной верхней коре. Процесс имеет характер периодического: расплавленная магма при подъёме охлаждается и частично кристаллизуется, а в основании коры плавление продолжается ввиду непрерывного действия, повышенного мантийного теплового потока и формируются новые порции расплава, которые поднимаются по разогретому пути подъёма магмы.

На горизонтальных сечениях на рис. 3 представлена эволюция температуры на глубинах 10 и 15 км на моменты от 27 до 36 млн лет от начала действия повышенного теплового потока. Важно отметить, что в модели внедрение происходит в форме “кластера” из нескольких тел размером около 30–35 км в диаметре, который не смещается с течением времени. Расстояние между телами может достигать 10–15 км. В дальнейшем следующие порции магмы поднимаются по наиболее прогретому пути и в таких местах магма достигает максимального уровня подъёма до 8–10 км.

Проведено сравнение результатов моделирования в двух- и трёхмерной постановке при полностью идентичных параметрах модели

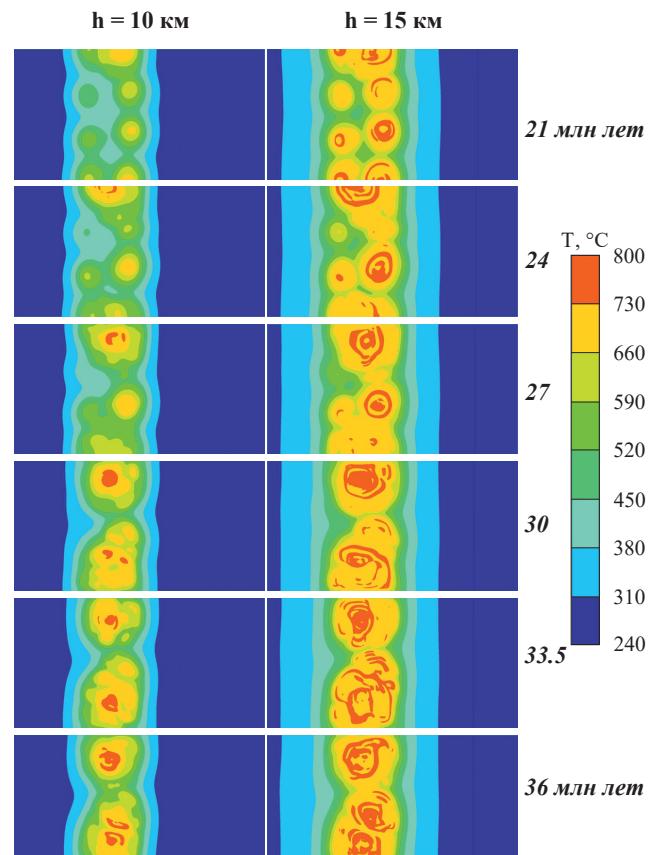


Рис. 3. Горизонтальные сечения модели (рис. 2) на глубине 10 и 15 км для моментов времени 21, 24, 27, 30, 33.5 и 36 млн лет, что соответствует геологическику времени 260–245 млн лет назад. Красные области с температурой >730 °C показывают форму и положение в плане массивов на данный момент времени

и физических свойств веществ, характеризующихся числом Рэлея  $Ra = ga\Delta T d^3 \rho / \mu \kappa$ , где символы означают (последовательно): ускорение свободного падения, тепловое расширение, перепад температуры, толщина коры, плотность, вязкость и температуропроводность.

В настоящий момент развитие численных методов и вычислительной техники даёт возможность исследователям вести моделирование конвективных течений Релея–Бенара не только в плоскости (2D), где присутствуют две пространственные координаты, но и в трехмерной (3D) постановке. В связи с этим возникает ряд проблем интерпретации получаемых результатов в 2D-постановке и результатов, получаемых с введением третьей координаты (3D), которые обсуждаются в [12–15].

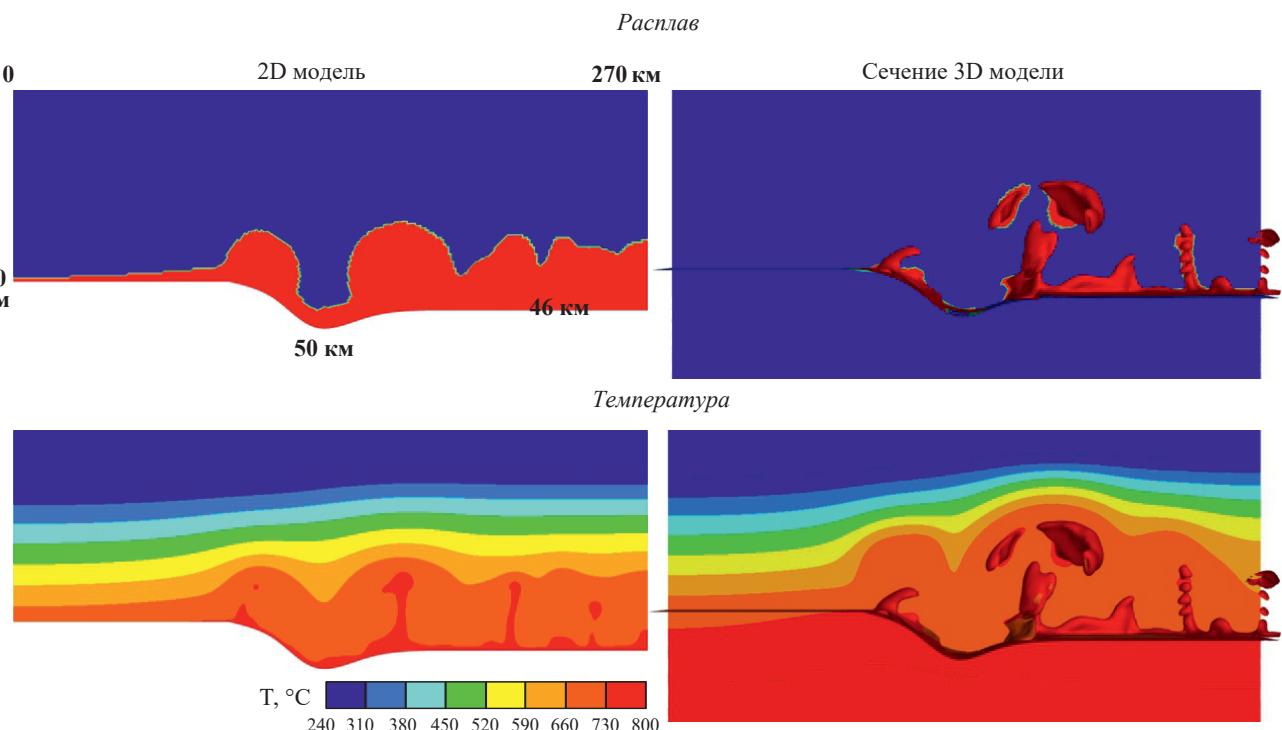
Решая задачу конвекции в 3D-постановке при определённых числах Релея получается стационарное решение (установившаяся конвекция)

в виде продольного температурного вала, ось которого совпадает с направлением третьей координаты. То есть решения задачи в 2D, где третья координата фиксирована, и решения в 3D слабо отличаются [12]. Однако сам переход от режима теплопроводности к режиму конвекции запаздывает в расчётах 3D от расчётов в 2D, но решения всё ещё совпадают. Так же в [12] указано существенное влияние на решение способа пространственной дискретизации (разбиения расчётной области) уравнений Навье–Стокса. Дальнейший переход от температурного вала (валиковая конвекция) к пломам (ячеистая конвекция) [16] теряет смысл в двумерной постановке, так как мы всегда будем получать решение, которое будет инвариантным относительно третьей координаты. Решения в двумерной постановке в [4] позволяют говорить о плавлении и конвективном движении магмы в форме валов в низах коры, но не могут объяснить механизм формирования штокообразных тел. В связи с этим выбор 3D-постановки становится актуальным с учётом того, что рассматриваемые в работе геологические объекты представляют собой не вытянутые структуры, а нерегулярно расположенные в пространстве тела.

Результаты моделирования в 2D- и 3D-задаче существенно отличаются в характере конвективного движения расплава, температурном поле и форме тел, содержащих частичный расплав (рис. 4). В 3D-модели наблюдается подъём на большую высоту (8–10 км в сравнении с 20–25 км). В 3D-модели наблюдается формирование питающих каналов и головы, происходит отрыв основного тела от области формирования расплава. Расплавы за счёт конвекции интенсивнее локализуются с образованием отдельных массивов. Также существенно изменяется конфигурация температурного поля, отражая мелкомасштабные конвективные движения масс частичных расплавов. Таким образом, 3D-модели несут в себе большую информацию о процессе формирования и объёмной структуре магматических тел.

## ВЫВОДЫ

Интерпретация полученных результатов численного моделирования позволяет сделать некоторые петрологические выводы о механизме формирования постколлизионных гранитоидов Карского орогена.



**Рис. 4.** Сравнение результатов моделирования в двухмерной (слева) и трёхмерной (справа) постановках приведено для подобной геометрии модельной области. Вертикальное сечение в 3D-варианте модели приведено в середине модельной области, где происходит подъём порций частичного расплава на разный глубинный уровень. Показана область частичного плавления (верхний ряд) и температуры (нижний ряд)

Механизм формирования постколлизионных гранитоидов Карского орогена хорошо описывается в рамках трёхмерных моделей прогрева земной коры в условиях повышенного теплового потока вследствие распада орогена на предтрапповом этапе эволюции земной коры северной окраины Сибирской платформы. Возействие мантийного тепла оказывает влияние на состав, условия плавления и внедрения магм в верхнюю кору до момента основной фазы траппового магматизма (251–250 млн лет назад).

Показано, что режим трёхмерной ячеистой конвекции реализуется при использовании полной трёхмерной постановки в отличие от режима двумерной валиковой конвекции, характерного для 2D-задачи плоских деформаций. Таким образом, 3D-моделирование является более реалистичным и корректным способом описания соответствующих магматических процессов.

В основании земной коры, на глубине около 50 км, устанавливается зона плавления континентального корового материала, возможно при участии небольшого вклада мантийного компонента, генерирующая подъём магмы и формирование группы пространственно сближенных гранитоидных массивов. Становление массивов с диаметром 10–20 км происходило на глубинах от 14 до 8 км на протяжении 15 млн лет, что близко к реальному геологическому положению постколлизионных штоков Карского орогена.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00057).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верниковский В. А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области // Труды ОИГГ М. Вып. 831. Новосибирск: Изд. СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.
2. Vernikovsky V. A., Vernikovskaya A., Proskurnin V., Matushkin N., Proskurnina M., Kadilnikov P., Larionov A., Travin A. Late Paleozoic – Early Mesozoic Granite Magmatism on the Arctic Margin of the Siberian Craton during the Kara-Siberia Oblique Collision and Plume Events // Minerals. 2020. V. 10(6). 571. <http://dx.doi.org/10.3390/min10060571>
3. Верниковский В. А., Полянский О. П., Бабичев А. В., Верниковская А. Е., Прокурнин В. Ф., Матушкин Н. Ю. Тектонотермальная модель для позднепалеозойского синколлизионного этапа формирования Карского орогена (Северный Таймыр, Центральная Арктика) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 4. С. 440–457. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG2021178>
4. Верниковский В. А., Семенов А. Н., Полянский О. П., Бабичев А. В., Верниковская А. Е., Матушкин Н. Ю. Тектонотермальная модель и эволюция магматизма на постколлизионном (предплумовом) этапе развития Карского орогена (Северный Таймыр, Центральная Арктика) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 1. С. 56–64. <https://doi.org/10.31857/S2686739724010077>
5. Прокурнина М. А., Прокурнин В. Ф., Ремизов Д. Н., Ларионов А. Н. Кольцевые интрузивы Беспамяттинского ареала: проявления шошонит-латитового магматизма на Северном Таймыре // Региональная геология и металлогения. 2019. № 79. С. 5–22.
6. Khudoley A. K., Verzhbitsky V. E., Zastrozhnov D. A., O'Sullivan P., Ershova V. B., Proskurnin V. F., Tuchkova M. I., Rogov M. A., Kyser T. K., Malyshev S. V., Schneider G. V. Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of the Eastern Taimyr–Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey–Khatanga Depression // J. Geodyn. 2018. V. 119. P. 221–241. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.002>
7. Sobolev S. V., Sobolev A. V., Kuzmin D. V., Krivolutskaya N. A., Petrunin A. G., Arndt N. T., Radko V. A., Vasilev Y. R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature. 2011. V. 477. P. 312–316. <https://doi.org/10.1038/nature10385>
8. Jamieson R. A., Beaumont C. On the origin of orogens // GSA Bull. 2013. V. 125(11–12). P. 1671–1702. <https://doi.org/10.1130/B30855.1>
9. Полянский О. П., Филиппов Ю. Ф., Фомин А. Н., Федорович М. О., Ревердатто В. В. Реконструкция динамики погружения и палеотемпературного режима северной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 1. С. 90–108. <https://doi.org/10.15372/GiG2024145>
10. Priestley K., McKenzie D. The relationship between shear wave velocity, temperature, attenuation and viscosity in the shallow part of the mantle // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. V. 381. P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.022>
11. Семенов А. Н., Полянский О. П. Численное моделирование механизмов минглинга и миксинга магмы на примере формирования сложных интрузивов // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1665–1683. <https://doi.org/10.15372/GiG20171104>
12. Lee J. R. On the three-dimensional effect for natural convection in horizontal enclosure with an adiabatic

- body: Review from the 2D results and visualization of 3D flow structure // Int. Comm. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 92. P. 31–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.010>
13. Janssen R. J. A., Henkes R. A. W. M. Instabilities in three-dimensional differentially heated cavities with adiabatic horizontal walls // Physics of Fluids. 1996. V. 8(1). P. 62–74.  
<https://doi.org/10.1063/1.868814>
14. Astanina M. S., Buonomo B., Manca O., Shemet M. A. Three-dimensional natural convection of fluid with temperature-dependent viscosity within a porous cube having local heater // Int. Comm. Heat and Mass Transfer. 2022. V. 139. 106510.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106510>
15. Zhu W., Wang M., Chen H. 2D and 3D lattice Boltzmann simulation for natural convection melting // Int. J. Thermal Sci. 2017. V. 117. P. 239–250.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.025>
16. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд. Гео, 2001. 409 с.

## FORMATION CONDITIONS OF THE POSTCOLLISIONAL GRANITES OF THE KARA OROGEN (NORTH TAIMYR, CENTRAL ARCTIC): APPLICATION OF 3D NUMERIC MODELING

© 2025 г. Academician of the RAS V.A. Vernikovsky<sup>a,c</sup>, A. N. Semenov<sup>b,c</sup>, O. P. Polyansky<sup>b</sup>, A. V. Babichev<sup>b,c</sup>, A. E. Vernikovskaya<sup>a,c</sup>, N. Yu. Matushkin<sup>a,c, #</sup>

<sup>a</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>b</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>c</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

# E-mail: MatushkinNY@ipgg.sbras.ru

Using 3D numerical modeling, we analyze the formation of postcollisional granitoids of the Kara orogen in Northern Taimyr under conditions of elevated heat flow due to the orogen's breakup prior to its mantle plume episode (280–250 Ma). The initial geometry of the model area, the boundary conditions and physical properties for the crust and the mantle have been selected to reflect the structure of the crust in the junction zone of the Kara, Central Taimyr, and Siberian blocks. Comparing 2D and 3D modeling results with identical parameters and medium physical properties defined by the Rayleigh number shows that 3D modeling yields a more realistic and correct description of relevant magmatic processes. At the base of the modeled Earth crust at ~50 km an area of melting of continental crust appears, possibly with slight input of mantle component, which generates magma uplift and the formation of closely spaced granitoid intrusions. Plutons with diameters 10–20 km were emplaced at depths 14–8 km during 15 million years, which is close to the actual geological position of postcollisional stocks of the Kara orogen.

**Keywords:** Arctic, Kara orogen, North Taimyr, Siberian craton, collision, mantle plume, granite, thermal model, 3D modeling