

Моделирование генерируемого изометричной интрузией напряженно-деформированного состояния вмещающих пород

Мягков Д. С.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, dsm@ifz.ru

Аннотация. В исследовании представлена численная геодинамическая модель формирования надлито-статических напряжений Земной коры при внедрении крупной дайки изометричной формы. Рассматриваются интрузии изометричной эллипсоидальной формы в проекции на горизонтальную плоскость. По результатам моделирования определяются общий уровень аномальных напряжений, формирующийся при внедрении магмы, формирующиеся аномалии давления и касательных напряжений, ориентация главных осей тензора напряжений и геодинамический тип напряжённого состояния. Показана зависимость структуры поля напряжений от степени изометричности интрузии, при снижении последней формирующееся напряженное состояние приближается к таковому для плоской интрузии типа дайки.

Ключевые слова: Магматизм, геодинамика, математическое моделирование, дайка, тектонофизика.

Modeling of the stress-strain state of host rocks generated by isometric intrusion

Myagkov D. S.

Schmidt Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences (PE RAS), Moscow, dsm@ifz.ru

Abstract. This research presents a numerical geodynamic model of the formation of supralithostatic stresses in the Earth's crust during the emplacement of a large isometric dike. Isometric ellipsoidal intrusions are considered, projected onto a horizontal plane. The modeling results are used to determine the overall level of anomalous stresses formed during magma emplacement, the resulting pressure and shear stress anomalies, the orientation of the principal axes of the stress tensor, and the geodynamic type of stress state. The dependence of the stress field structure on the degree of isometry of the intrusion is demonstrated: as the degree of isometry decreases, the resulting stress state approaches that of a flat dike-type intrusion.

Key words: Magmatism, geodynamics, mathematical modeling, dike, tectonophysics.

Введение

Ключевой задачей геодинамики является поиск и количественное описание факторов, ответственных за формирование надлито-статических (аномальных) напряжений Земной коры. Основной механизм формирования избыточных напряжений принято связывать с тектоническим процессом, характерным для изучаемого региона в то или иное геологическое время. Однако, помимо чисто механического воздействия массивов и, вообще, участков Земной коры друг на друга при движении с последующим нагружением этих участков существует другой достаточно важный механизм, который действует, как правило, вместе с тектоническим. Это механизм формирования напряженно-деформированного состояния коры при внедрении крупных интрузий. Для районов распространения таких интрузий (Кольский полуостров, Крым, Кавказ и т. д.) распределение структур разрушения, история тектонических процессов и, следовательно, результаты тектонофизического анализа для коры этих районов будет связан с теми напряжениями, которые были сгенерированы при формировании интрузий. Если речь идет о крупной интрузии или системе интрузий, наподобие Хибинского массива, то уровень аномальных напряжений может составлять сотни МПа, что означает, что даже разгрузившись, частично или полностью, в процессе дальнейшего развития, эти напряжения оказывают большое влияние на всю дальнейшую геодинамическую эволюцию региона.

Однако необходимо отметить, что для крупных магматических массивов, наподобие Хибинского, существует проблема этапности их формирования. Существует точка зрения (Coleman et al., 2004; Annen, 2011; Menard, 2011), которая принимается и в данной работе, что формирование таких структур идет постепенно, путем многократного внедрения интрузий и, вероятно, частичной пе-

реплавки вещества коры в области их формирования. Несмотря на то, что моделирование данного процесса крайне затруднительно провести непосредственно, в текущем исследовании модель будет строиться таким образом, чтобы частично соответствовать данному представлению.

Данная работа является продолжением исследований, представленных в статье (Мягков, 2025). В этой работе дано было решение для участка магматического пояса/крупной дайки. В этой же статье будет дано решение для изометричной интрузии. В мировой литературе представлено немало аналитических, численных и физических моделях, посвящённых данной проблеме. Отметим работы Гудмундссона и его последователей (Gudmundsson, 2006; Bazargan, Gudmundsson, 2019; Clunes et al., 2021). Чаще, однако, решаются задачи для даек и силлов и, нередко, в упругой постановке, что занижает уровень напряжений в дальней зоне влияния интрузии и искажает структуру поля напряжений. Кроме того чаще моделирование выполняется по вертикальным профилям, как в работе Гудмундссона (2006). В данной работе будут рассмотрены изометричные интрузии в плане в псевдотрёхмерной постановке, что позволит получить ряд важных для тектонофизики параметров, таких как геодинамический тип напряженного состояния.

Создание модели и методика моделирования

При моделировании использовался подход Уилкинса (Wilkins, 1972), усовершенствованный Стефановым (2025). Решение строится, как было уже сказано, в упруго-пластической постановке, закон пластического течения – неассоциированный (Друккера-Прагера-Николаевского (Николаевский, 1983)), подход применяет конечно-разностную схему. Подробное описание методики можно найти в статьях (Ребецкий и др., 2018; Мягков, 2025). Модель непосредственно состоит из 250000 ячеек (500×500 по вертикали и горизонтали), каждая ячейка имеет в начальном состоянии квадратную форму со стороной 200 м (см. рис. 1). Расчеты выполнены в авторской программе, написанной на языке fortran.

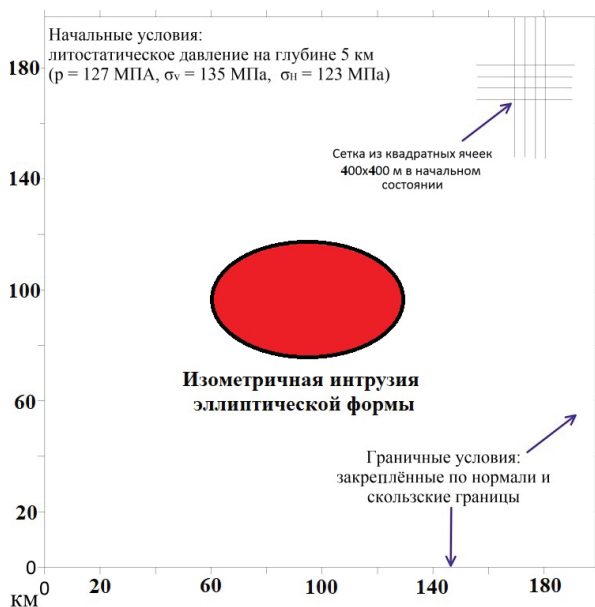


Рис. 1. Общая схема модели

Fig. 1. General model scheme

Опишем теперь этапы моделирования, граничные и начальные условия и параметры модели. Кратко общая схема модели дана на рис. 1. Моделирование проводится в 2D постановке, но задача решается для типа напряженного состояния «плоская деформация», что означает наличие нормального напряжения в перпендикулярной модели плоскости (вертикальной). Это позволяет задать начальное напряженное состояние в трехмерном виде. Положим начальные напряжения литостатическими. Будем рассматривать глубину 5 км (однако в модели можно задать и другие глубины, собрав 2.5D модель из серии двумерных). Для 5 км примем: $p = 127$ МПа, горизонтальные напряжения $\sigma_h = \sigma_n = 123$ МПа, вертикальное нормальное напряжение $\sigma_v = 135$ МПа. Будем считать, что давление магмы на этой глубине $p_m = 147$ МПа $= 1.16 \cdot p$. Для параметров модели положим: $\rho = 2.67$ г/см³, $v_p = 6.7$ км/с, $\nu = 0.25$, $\alpha = 0.05$, $Y = 15$ МПа, $V_{dil} = 0.30$. Уровень давления магмы зададим в 147 МПа.

О возможных значениях этого параметра, связи с напряженным состоянием очага и плотностью магмы (см. Ребецкий Стефанов, 2022). В данной работе для интрузии используются те же параметры, что и в (Мягков, 2025).

Интрузия задается эллипсоидальной в сечении формы. Рассмотрим 3 варианта: слабовытянутую (в одном из горизонтальных направлений, далее на рис. 2–4 это будет горизонтальное направление на плоскости рисунка), средне- и сильно вытянутую интрузию. Для этого используем эллипс

с осями $a = 60$ км, $b = 50$ км для первого случая, $a = 60$ км, $b = 30$ км для второго и $a = 60$ км, $b = 20$ км для третьего.

Само моделирование проводится следующим образом. Так как модель задается на горизонтальной плоскости с заранее определенным уровнем литостатических напряжений, то после начала расчета сразу же начинается активация интрузии. Это происходит в 2 этапа – сначала при частичном повышении давления вещество переводится в жидкое состояние. После давление доводится до целевого уровня. У ячеек, относящихся к интрузии, зануляется модуль сдвига, скорость поперечных волн и девиатор тензора напряжений. Коэффициент Пуассона становится равным 0.5. После завершения формирования избыточных напряжений и стабилизации напряженно-деформированного состояния модели результат фиксируется. Такой подход означает, что магма не внедряется непосредственно в некую начальную полость с последующим расширением, а, скорее, что учитывается совокупный результат переплавки вещества в области развития интрузии с учетом проникновения в эту область множества малых интрузий и последующего слияния их в единое тело. Это воздействие аппроксимируется единым и последовательным процессом нагрузки во времени (в дальнейшем на рис. 2–4 будет представлен лишь конечный результат этого процесса), что упрощает полученное решение, тем не менее общий уровень напряжений и принципиальные особенности поля напряжений должны сохраняться.

Создание модели и методика моделирования

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4. Рассмотрим сначала модель с слабовытянутым эллипсом (малая ось относится к большой как 5 к 6). Этот случай близок к круглой в сечении интрузии, которую мы не рассматриваем отдельно (см. Мягков, 2025 б), но текущая модель крайне к ней близка. Поле давления с нанесенными поверх осями максимального горизонтального сжатия σ_H дано на рис. 2 А. Отметим, что σ_H не эквивалентна оси наибольшего сжатия σ_3 , так как наибольшее сжатие в горизонтальной плоскости не всегда больше вертикального напряжения, равного 135 МПа. Если σ_H все же больше σ_v , тогда оси на рис. 2А, 3А и 4А являются осями σ_3 . Ориентация σ_H для первой модели достаточно проста и, если обобщить, оси перпендикулярны поверхности интрузии (ср. с рис. 31 (Gudmundsson, 2006)). Поле давления также достаточно однородно, модель испытала достаточно серьезную нагрузку и, вплоть до границ модели общий уровень давления повысился до 129.5 МПа, в среднем. Близ самой интрузии фиксируется более высокий уровень до 135 МПа. Однако здесь уже заметен эффект, который сильнее проявится для более вытянутых моделей, а здесь присутствующий лишь в зачатке: поскольку поверхность интрузии выпуклая, то, оказывая давление и расширяясь, она не только давит по нормали, но и несколько растягивает внешнюю среду в направлении по касательной к поверхности интрузии. Это обуславливает снижение минимальных горизонтальных напряжений σ_h и, соответственно, давления. Для более выпуклых боковых (здесь и далее – в плоскости рис. 2–4) краев интрузии этот эффект проявляется сильнее, чем для верхней и нижней. Также присутствует второй эффект: более протяженная справа налево интрузия сильнее растягивает внешнюю среду в вертикальном (в плоскости рисунка 2) направлении, таким образом близ левого и правого краёв формируется дополнительное растяжение. В предельном случае сверхтонкого эллипса, описывающего уже дайку, а не изометричную интрузию, были бы сформированы зоны растяжения, превышающего по амплитуде уровень сжатия, создаваемый боковыми поверхностями. Здесь этот эффект ещё не даёт истинного сжатия, но общий уровень давления здесь минимальный – чуть больше исходных 127 МПа. Также отметим, что оси σ_H по отдалении от этих частей интрузии достаточно быстро (после 40 км) теряют выраженную перпендикулярную поверхности интрузии ориентацию, следовательно зона влияния в этих направлениях минимальна.

Это видно и по распределению амплитуды самой σ_H (рис. 2 Б). Оно носит эллипсоидальный характер, однако обратный по отношению к форме самой интрузии, имея наименьшее затухание перпендикулярно длинным сторонам интрузии. Максимальное значение достигается на контакте и равно давлению магмы (147 МПа). При этом само распределение достаточно однородно, если бы

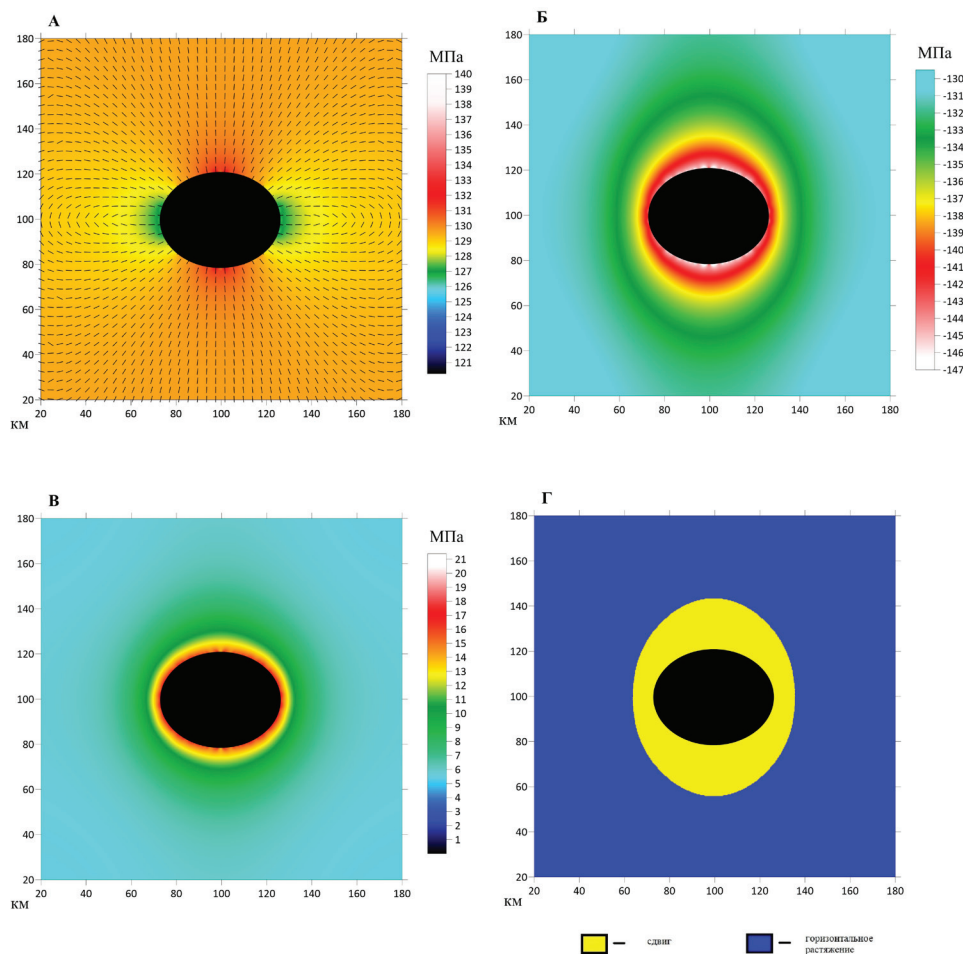


Рис. 2. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изометричной дайки: минимально вытянутая интрузия ($a = 60$ км, $b = 50$ км). Результаты представлены для: А – поле давления с нанесенными поверх ориентациями оси наибольшего сжатия σ_H ; Б – наибольшее горизонтальное сжатие σ_H ; В – максимальное касательное напряжение; Г – геодинамический тип напряжённого состояния, где a – горизонтальная, b – вертикальная ось ограничивающей поверхность интрузии эллипса

Fig. 2. Results of crustal loading modeling in the area of an isometric dike emplacement: a minimally elongated intrusion ($a = 60$ km, $b = 50$ km). The results are presented for: A – pressure field with the orientations of the axis of greatest compression σ_H plotted on top; Б – greatest horizontal compression σ_H ; В – maximum shear stress; Г – geodynamic stress state type, where a is the horizontal and b is the vertical axis of the ellipse bounding the intrusion surface

интрузия имела круговое сечение, то и вовсе было бы сферично. Отметим, что даже близ краев модели с искривленных сторон интрузии значение достаточно высоко (около 130 МПа). Более простую структуру имеет поле максимального касательного напряжения (рис. 2 В), которое для интрузии слабой кривизны имеет почти круговую структуру. На контакте достигается уровень касательных напряжений чуть менее 17 МПа, далее он падает до 6 МПа. Также, как и поле σ_H , поле максимального касательного напряжения быстрее затухает в направлении от более изогнутых частей интрузии (вдоль большой оси эллипса). Наконец рассмотрим геодинамический тип напряженного состояния (рис. 2 Г). Вокруг интрузии формируется зона горизонтального сдвига, простирающаяся до 30 км в направлении от более плоской части интрузии. Преобладание сдвига является интересной особенностью поля напряжений в области внедрения изометричных выпуклых по форме интрузий – для дайки сформировалась бы выраженная зона горизонтального сжатия. В случае же эллиптической формы интрузии, используемой в модели, при высоком значении наибольшего горизонтального напряжения σ_H эффект дополнительного растяжения, описанный выше, приводит к заметно меньшему росту σ_H , чем для интрузии с плоской поверхностью. Это приводит к тому, что формируется преимущественно сдвиг, а не горизонтальное сжатие.

Рассмотрим теперь умеренно вытянутую модель (рис. 3). Здесь большая полуось ограничивающего интрузию эллипса $a = 60$ км, а малая $b = 30$ км, т. е. интрузия по длине в 2 раза больше, чем по ширине. Полученные для этого случая результаты уже несколько отличаются от предыдущего и от случая сферической интрузии, здесь уже отношения длины к ширине хватает для создания небольшой зоны декомпрессии близ краев (в направлении большой оси эллипса) интрузии. Этот эффект похож на таковой для концевых участков дайки, хоть и значительно слабее. Здесь оси наибольшего горизонтального сжатия все еще перпендикулярны поверхности интрузии, однако на удалении в 20 км испытывают разворот. Падения давления здесь достаточно незначительно (около 4 МПа), в целом вся модель испытывает рост давления, которое на контакте достигает 140 МПа. Схожие тенденции проявляются и в поле σ_H (рис. 3 Б). Здесь мы видим секторальные минимумы вдоль левого и правого краев интрузии, амплитуды же в сторону от уплощенных краев выше, чем в предыдущей модели, даже у границы сетки на удалении в 70 км значение $\sigma_H = 132$ МПа. Однако даже минимумы все-таки имеют значения заметно выше начального уровня в 123 МПа (а именно около 130 МПа), что связано с тем, что хотя вышеописанный эффект растяжения вдоль удаленных концов интрузии и имеет место быть, все же присутствует давление по нормали с торцов, которое нагружает среду. Поэтому геодинамический тип даже вдоль торцевых частей интрузии – горизонтальный сдвиг.

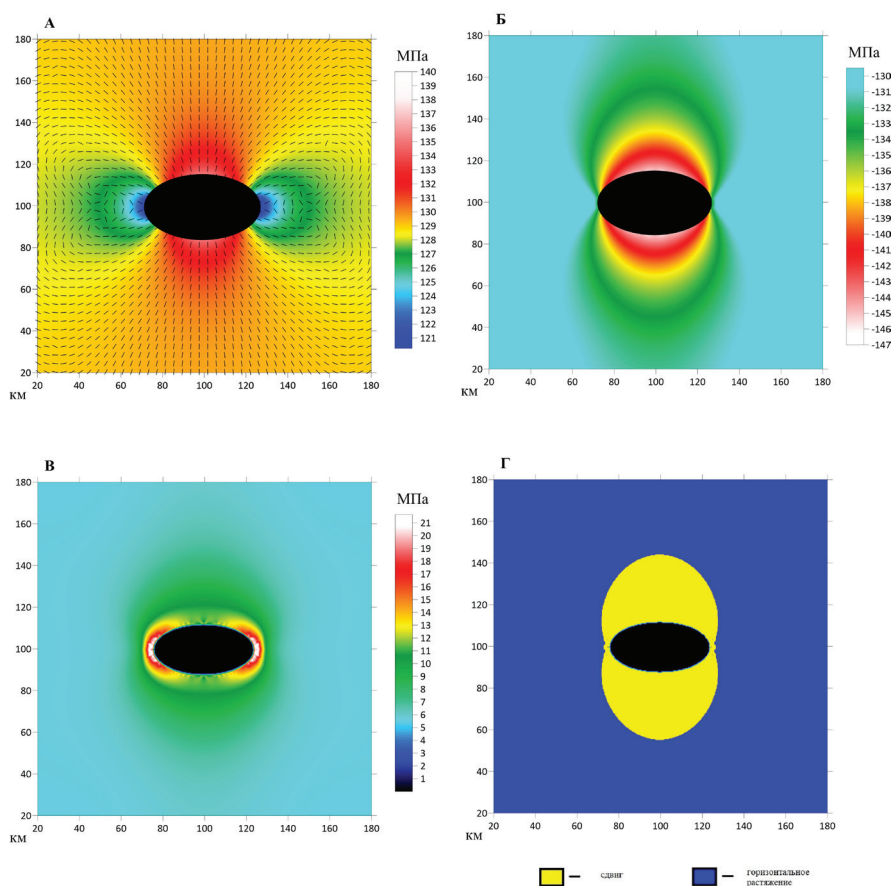


Рис. 3. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изометричной дайки: средне вытянутая интрузия ($a = 60$ км, $b = 30$ км). Результаты представлены для: А – поле давления с нанесёнными поверх ориентациями оси наибольшего сжатия σ_H ; Б – наибольшее горизонтальное сжатие σ_H ; В – максимальное касательное напряжение; Г – геодинамический тип напряженного состояния, где a – горизонтальная, b – вертикальная ось ограничивающую поверхность интрузии эллипса

Fig. 3. Results of crustal loading modeling in the area of an isometric dike emplacement: a minimally elongated intrusion ($a = 60$ км, $b = 30$ км). The results are presented for: А – pressure field with the orientations of the axis of greatest compression σ_H plotted on top; Б – greatest horizontal compression σ_H ; В – maximum shear stress; Г – geodynamic stress state type, where a is the horizontal and b is the vertical axis of the ellipse bounding the intrusion surface

(см. рис. 3 Г). Уровень же касательного напряжения (рис. 3 В) близ левой и правой сторон интрузии теперь заметно выше, чем в предыдущем случае и достигает 21 МПа. Этот максимум еще очень далёк от образующегося близ концевой участка дайки и разделяющегося на 2 части, здесь наблюдается только лишь повышенный уровень касательных напряжений в зависимости от направления относительно центра интрузии. Однако более высокий уровень касательных напряжений с торцов компенсируется более низким с уплощённых сторон, кривизна которых относительно предыдущей модели снизилась. Однако затухание меньшее именно в направлении от уплощённых сторон, так как там лежит более нагруженная область.

Наконец, рассмотрим наиболее вытянутую модель с осями эллипса $a = 60$ км, а малая $b = 20$ км, т. е. отношение длины к ширине равно 3 к 1. Результаты моделирования представлены на рис. 4. В этой модели достигается такой уровень кривизны на торцах и растягивающий вдоль длинных сторон интрузии эффект столь высок, что формируются полноценные, пусть и уступающие по амплитуде таковым для концевых участков даек зоны растяжения вдоль торцов интрузии (рис. 4 А). Уровень сжатия вдоль длинной стороны еще выше, чем в предыдущих двух моделях. Оси наибольшего горизонтального сжатия перпендикулярны длинным сторонам интрузии и описывают круговые траектории вдоль торцевых. Эта ситуация наиболее близка к представленной в работе Гудмуд-

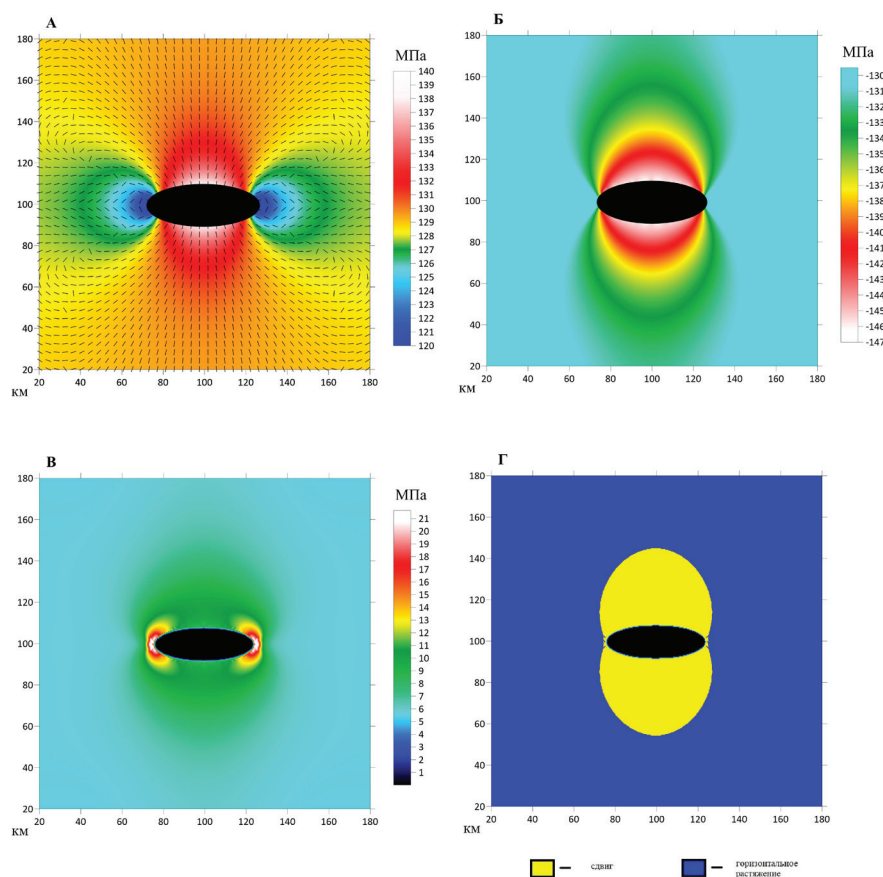


Рис. 4. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изометричной дайки: максимально вытянутая интрузия ($a = 60$ км, $b = 20$ км). Результаты представлены для: А – поле давления с нанесенными поверх ориентациями оси наибольшего сжатия σ_H ; Б – наибольшее горизонтальное сжатие σ_H ; В – максимальное касательное напряжение; Г – геодинамический тип напряженного состояния, где a – горизонтальная, а b – вертикальная ось ограничивающей поверхность интрузии эллипса

Fig. 4. Results of crustal loading modeling in the area of an isometric dike emplacement: a minimally elongated intrusion ($a = 60$ км, $b = 20$ км). The results are presented for: А – pressure field with the orientations of the axis of greatest compression σ_H ; Б – greatest horizontal compression σ_H ; В – maximum shear stress; Г – geodynamic stress state type, where a is the horizontal and b is the vertical axis of the ellipse bounding the intrusion surface

ссона (2006). Поле амплитуды наибольшего горизонтального сжатия в данном случае не слишком сильно отличается от предыдущего, хотя его уровень близ длинной стороны интрузии еще выше. Касательные напряжения формируют теперь уже совершенно отдельные максимумы амплитудой 21 МПа близ левого и правого края, тогда как длинные стороны стали иметь столь низкую кривизну, что уровень касательных напряжений непосредственно близ контакта с ними даже немного ниже среднего (для дайки с плоскими сторонами там были бы минимумы). Также заметно изменение в геодинамическом типе напряженного состояния (рис. 4 Г). Здесь в сторону от торцов интрузии уже не формируется даже малой зоны сдвига, а сразу же начинается зона горизонтального растяжения. Здесь это уже влияние процессов растяжения по торцам интрузии, хотя заметим, что даже в этом случае некоторая нагрузка среды, связанная с давлением этих торцов присутствует, что видно в поле σ_H , которое не имеет низких значений даже в этих зонах.

В завершение отметим, что даже рассмотренный случай интрузии, имеющей размеры в длину, превышающие в 3 раза ширину, демонстрирует уже особенности поля напряжения крупной дайки, хотя и не выраженные полностью. Поэтому здесь не рассматриваются более вытянутые модели, очевидно, что по мере роста длины по отношению к ширине напряженно-деформированное состояние будет приближаться к таковому для дайки, пока не сформируются истинные аномалии концевых участков дайки и поле напряжения не станет таким, как в модели статьи (Мягков, 2025).

Выводы

В представленной работе были рассмотрены особенности напряженно-деформированного состояния Земной коры в области формирования крупной изометричной интрузии эллипсоидальной формы в сечении. Полученные результаты могут быть применены к разнообразным интрузиям, таким как лакколиты или штоки, а также к телам наподобие Хибинского массива. Структура поля напряжения подобных интрузий будет сильно зависеть от степени вытянутости интрузии, даже для умеренно вытянутых интрузий уровень напряжений вдоль длинной стороны будет существенно выше. При этом геодинамический тип напряженного состояния в области внедрения интрузий для умеренного и низкого уровня давления в очаге, принятого в этой работе, будет преимущественно типа «горизонтальный сдвиг». Эти и другие полученные закономерности могут быть использованы при тектонофизическом анализе геологических структур в районах развития крупных интрузий.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Мягков Д. С. Изучение особенностей напряженного состояния коры в области внедрения крупных интрузий методом численного моделирования // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. № 22. С. 394–402. <https://doi.org/10.31241/FNS.2025.22.053>.
2. Мягков Д. С. Моделирование нагружения земной коры в области развития магматических тел различных типов. Напряженно-деформированное состояние коры Кольского региона // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы докладов Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара. М. Изд-во: ИФЗ РАН. 2025 б. С. 123–126.
3. Николаевский В. Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники ВИНТИ. Серия: Мех. деф. тв. тела. М.: 1983. Т. 15. С. 817–821.
4. Ребецкий Ю. Л., Стефанов Ю. П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 4, № 56. С. 41–58.
5. Ребецкий Ю. Л., Погорелов В. В., Мягков Д. С., Ермаков В. А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54–73.
6. Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8, № 3. С. 129–142.
7. Annen C. Implications of incremental emplacement of magma bodies for magma differentiation, thermal aureole dimensions and plutonism–volcanism relationships // Tectonophysics, 2011. 500(1–4), 3–10.
8. Bazargan M., Gudmundsson A. Dike-induced stresses and displacements in layered volcanic zones / Journal of Volcanology and Geothermal Research 384 (2019) 189–205.

9. Clunes M., Browning J., Cembrano J., Marquardt C., Gudmundsson A. Crustal folds alter local stress fields as demonstrated by magma sheet // Fold interactions in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021. 570, 117080. doi:10.1016/j.epsl.2021.117080
10. Coleman D. S., Gray W. & Glazner A. F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology*, 2004. V. 32(5). P. 433–436.
11. Gudmundsson A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. *Earth-Science Reviews*. 2006. V. 79, № 1–2. P. 1–31. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.00
12. Menand T. Physical controls and depth of emplacement of igneous bodies: A review. *Tectonophysics*. 2011. 500(1–4). P. 11–19.