

Изменение напряженно-деформированного состояния Земной коры при внедрении дайки изогнутой формы

Мягков Д. С.

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

Аннотация. В исследовании представлено численное решение нагружения Земной коры при внедрении крупной дайки изогнутой формы. Рассмотрены различия в режимах напряженного состояния в области близ вогнутой и выпуклой частей даек. Показано расстояние, при котором эффект кривизны дайки перестает быть существенным фактором. Решение представлено на различных глубинных уровнях, основные результаты представлены для глубины 5 км, а также 1 и 10 км. Дайки рассматриваются на этапе внедрения с высоким уровнем давления магмы, поступающей из очага на уровне Мохо. Результаты получены для широкого диапазона значений входных параметров.

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

Change in the stress-strain state of the Earth's crust during the intrusion of a curved dike

Myagkov D.S.

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

Abstract. This research presents a numerical solution for crustal loading during the emplacement of a large, curved dike. Differences in stress regimes near the concave and convex portions of the dikes are examined. The distance at which the effect of dike curvature ceases to be a significant factor is demonstrated. The solution is presented at various depth levels, with the main results presented for depths of 5 km, 1 km, and 10 km. The dikes are considered during the emplacement phase, with high magma pressures emanating from a chamber at the Moho level. Results are obtained for a wide range of input parameter values.

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

Введение

На текущий момент существуют многочисленные работы, доказывающие, что внедрение крупных интрузий способно перестроить напряженное состояние Земной коры в области, на порядки превосходящее размер интрузии и уровень надлитостатических напряжений при это может достигать сотен МПа (Ребецкий Стефанов, 2022). В данном исследовании отдельно рассматривается вопрос об особенностях напряженно-деформированного состояния в области внедрения крупной дайки изогнутой формы. Существуют работы с численными моделями, показывающие структуру напряжённого состояния в области внедрения дайки. В работах (Gudmundsson, 2006; Bazargan, Gudmundsson, 2019; Clunes et al., 2021) задача для даек и силлов решалась в упругой постановке, хотя главные особенности поля напряжений (зоны растяжения близ концевых участков и сжатия вдоль боковой поверхности интрузии) там были показаны. В статье (Drymoni, 2020) показано поле напряжений при прохождении дайки через слоистую вулканогенно-осадочную толщу. Похожая задача решена в работе Маккафери (Massaferrì et al., 2010), где рассматриваетсяхождение дайки через границу сред с различными модулями упругости. Там так же, как и в этой работе рассмотрена изгибающаяся дайка, однако в вертикальной плоскости. При этом особенности напряженного состояния описаны не особенно подробно. В данной работе основное внимание уделяется вопросам о напряжённо-деформированном состоянии, индуцированным внедрением крупной дайки, изогнутой в плане. Соответствующая модель строится в численной постановке (2.5D) и может относиться к целому классу объектов, в том числе, на большем масштабе, к изогнутым сегментам магматических поясов, а на меньшем – к дайкам любых размеров. Полученные результаты будут даны как результаты решения задачи механики, имеющей общий характер, но в приложении к задачам геодинамики. для этого, в том числе, будет использована упруго-пластическая постановка задачи с зако-

ном пластичности, адаптированным к проблемам геомеханики. Ранее автором было получено решение для одиночной прямой дайки (Мягков 2025), ‘в данной работе было показано формирование напряженно-деформированного состояния близ формирующейся дайки во времени и рассмотрен вопрос о влиянии размера дайки на режим напряженного состояния. В текущей работе будет изучаться именно проблема о влиянии кривизны дайки на напряженное состояние вмещающих пород.

Создание модели и методика моделирования

Задача решается в 2.5D постановке – основная модель будет состоять из 2D моделей, рассчитанных для типа напряженного состояния плоская деформация, что означает наличие ненулевого нормального напряжения в перпендикулярном плоскости расчета направлении (в данном случае – вертикального нормального напряжения). Из этих решений, построенных на разных глубинных уровнях, будет собираться общее решение. В текущей работе будет дано подробное описание модели на одном глубинном уровне (5 км) и более краткое на других (1 км, 10 км).

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 62500 ячеек (250 × 250 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.

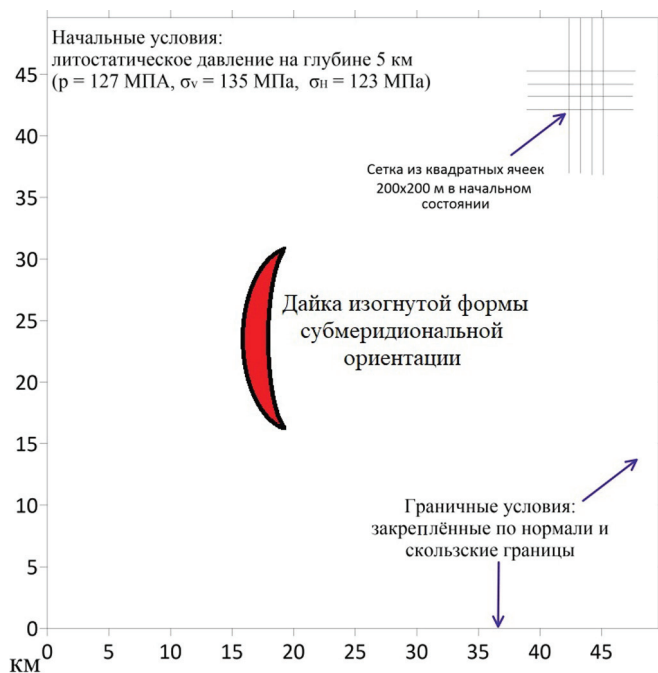


Рис. 1. Общая схема модели
Fig. 1. General model scheme

геомеханических параметров модели (основной части) примем: $\rho = 2.67 \text{ г/см}^3$, $v_p = 6.7 \text{ км/с}$, $\nu = 0.25$, $\alpha = 0.05$, $Y = 10 \text{ МПа}$, $V_{dil} = 0.15$.

Этапы моделирования следующие: на начальном этапе в модели сохраняется начальное напряженное состояние до активации дайки. После этого происходит расплавление вещества в клетках, относящихся к дайке и рост давления до значения p_m . Более подробно этапы моделирования описаны в работе (Мягков 2025).

Наконец, опишем геометрию дайки. На рис. 1 представлена общая схема. На рис. 2–5 реальная геометрия дайки дана затемнением поперек полей напряжений. Математически дайка задается

Кратко опишем краевые условия и этапы моделирования. В качестве граничных условий задаётся закрепление границ по нормали и равенство нулю касательных напряжений (скользящие границы). В качестве начальных условий задаются литостатические напряжения (в трехмерной форме) в соответствии с расчетной глубиной. На 5 км давление $p = 127 \text{ МПа}$, горизонтальные напряжения $\sigma_h = \sigma_H = 123 \text{ МПа}$, вертикальное нормальное напряжение $\sigma_v = 135 \text{ МПа}$. Будем считать, что давление магмы на этой глубине $p_m = 147 \text{ МПа} = 1.16 \cdot p$. Подробно анализ связи давления в магматическом очаге и магмы в продвигающейся интрузии на заданной глубине дан в (Ребецкий Стефанов, 2022). В данной работе считается, что очаг сообщается с дайкой непрерывно и плотность магмы в среднем равна 2.7 г/см^3 . В зависимости плотности магмы значение p_m может достаточно существенно меняться. В качестве

пересечением 2-х эллипсов с различной большой осью. Для моделирования использовались 4 варианта дайки, кривизна которых последовательно возрастает (от А до Г на рис. 2–5). Вертикальная полуось эллипсов b всегда бралась равной 10 км, для горизонтальной полуоси a брались значения 5, 10, 16, 25 км. Эллипс, образующий выпуклую сторону дайки всегда имел на 1.6 км большую горизонтальную полуось. Линии толщиной в одну ячейку на концевых участках даек обрезались. Таким образом, дайки выполнены эллиптическими кривыми, кривизна которых меняется сравнительно плавно, так как это кривые второго порядка.

Результаты моделирования

Результаты моделирования для глубины 5 км представлены на рис. 2–4. На рис. 2 представлено распределение давления. Для прямой дайки в концевых участках формируются симметричные зоны пониженного давления, а вдоль боковых поверхностей – повышенного. Среднее давление на удалении от дайки (131 МПа) показывает, что в целом среда испытала нагружение. Зоны растяжения в поле давления не сильно отличаются от таковых для прямой дайки (см. Мягков, 2025),

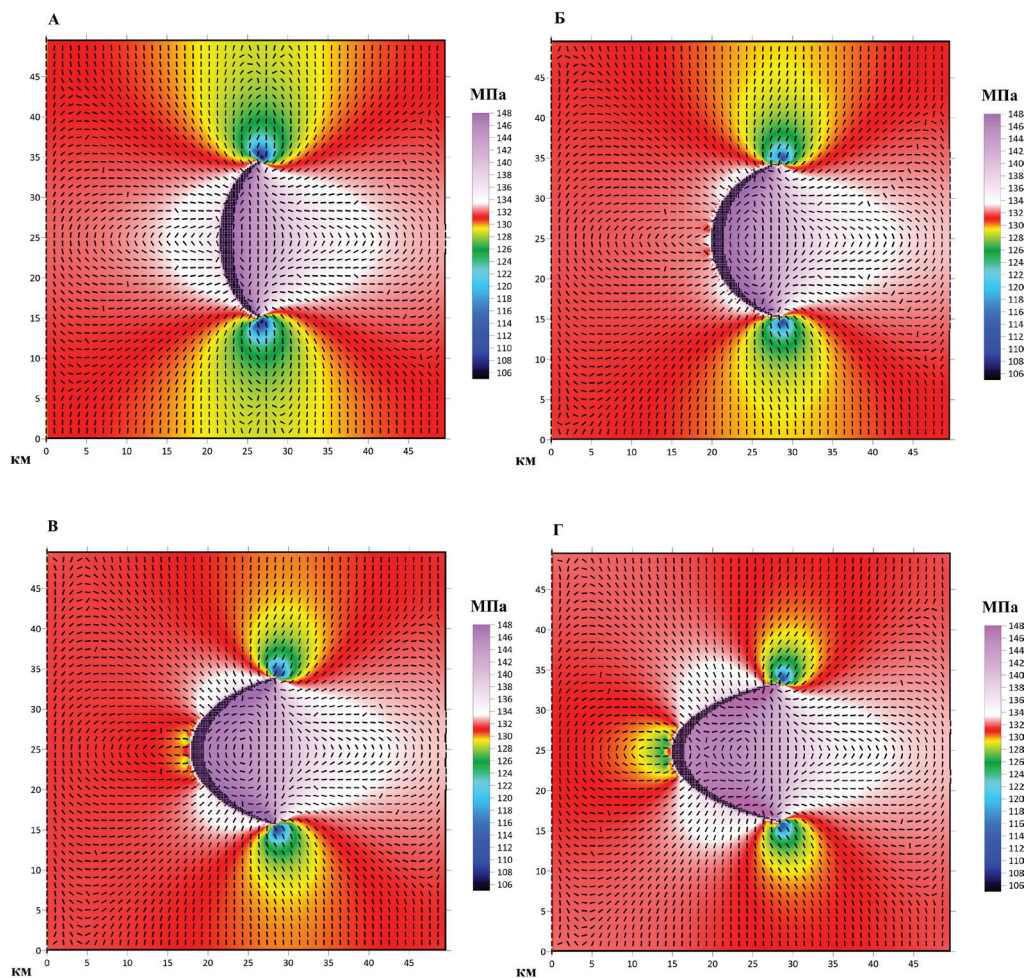


Рис. 2. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изогнутой дайки: поле давления с нанесенными поверх ориентациями оси наибольшего сжатия σ_H . Результаты представлены для: А – дайки малой кривизны ($a = 5$ км, $b = 10$ км); Б – дайки средней кривизны ($a = 10$ км, $b = 10$ км), В – дайки повышенной кривизны ($a = 16$ км, $b = 10$ км); Г – дайки высокой кривизны ($a = 25$ км, $b = 10$ км), где a – горизонтальная, b – вертикальная полуось ограничивающего вогнутую поверхность дайки эллипса

Fig. 2. Results of modeling crustal loading in the emplacement zone of a curved dike: pressure field with superimposed orientations of the axis of greatest compression σ_H . The results are presented for: А – dikes of small curvature ($a = 5$ км, $b = 10$ км); Б – dikes of medium curvature ($a = 10$ км, $b = 10$ км); В – dikes of increased curvature ($a = 16$ км, $b = 10$ км); Г – dikes of high curvature ($a = 25$ км, $b = 10$ км), where a is the horizontal and b is the vertical semi-axis of the ellipse bounding the concave surface of the dike

для слабоизогнутой дайки существенной разницы и вовсе нет. По мере роста кривизны аномалия пониженного давления (максимальная амплитуда во всех случаях около 21 МПа) все больше наклоняется вместе с концевой частью дайки, которая для случая высокой кривизны (рис. 2 Г), однако наклонена не так сильно, как самая крайняя часть дайки, так как в создании зоны растяжения участвует вся (или большая часть) дайки, наклон которой ближе к центру ниже. Более интересные результаты получены для зоны вдоль боковой поверхности дайки. Очевидно, что изогнутая дайка фокусирует повышенные напряжения в сторону вогнутой части, а выпуклая часть при активации дайки, т. е. при поступлении в разлом магмы под высоким давлением, расширяясь растягивается, таким образом она оказывает давление на вмещающие породы, но пониженное даже по сравнению с ровной поверхностью. Этот эффект хорошо виден для слабоизогнутой дайки (рис. 2 А). Практически везде между ветвями дайки давление равно или даже чуть выше (147–148 МПа) давления магмы, равного 147 МПа. Из-за этого оси максимального горизонтального напряжения σ_H здесь вертикальны, т. е. параллельны, а не перпендикулярны поверхности дайки – вещество буквально зажато между двумя ветвями дайки, словно в тисках. Однако в дальней зоне оси σ_H выстраиваются перпендикулярно дайке, хотя соотношение σ_H/σ_h здесь близко к единице. Со стороны выпуклой поверхности оси σ_H в основном перпендикулярны стенке дайки, однако напротив центра они наклонены и непосредственно близ дайки почти ей параллельны – это сказывается эффект растяжения, который максимален близ полюса эллиптической поверхности в центральной части дайки. На более выпуклых моделях он превращается в полноценный источник растяжения, создающий аномалию, подобную тем, что формируются на концевых участках. Однако для случая А этот эффект особо не проявлен в поле давления – оно всё ещё существенно выше среднего близ стенки и падает от 135 до 133 МПа к краю модели. Падения избыточного давления с вогнутой стороны идёт медленнее, но принципиально картина не различается – случай А всё ещё близок к прямой дайке.

Для случая дайки средней кривизны (Б), краевые участки дайки становятся уже и более загнуты в горизонтальном направлении, из-за чего зоны растяжения чуть наклонены и несущественно слабее по амплитуде. Зона концентрации напряжений становится выраженнее, при этом изогнутые крылья дайки формируют боковые поверхности, давящие на вмещающую породу уже под другим углом, чем и центральная часть, и концевые участки. Это приводит к усложнению картины напряжений внутри вогнутой части дайки, но при отдалении особенных отличий нет. Со стороны выпуклой части эффект проявляется сильнее: стенки дайки создают 2 отдельных максимума повышенного давления, а выпуклая центральная часть уже создаёт отчётливый локальный минимум (порядка 2 МПа), при этом давления даже там пока выше среднего. При росте кривизны дайки (рис. 2 В), её боковые стенки находятся под углом, близким к 45° и начинают выдавливать вещество из пространства между ветвями дайки в сторону от неё, в результате чего формируются зоны с наклонными и субгоризонтальными ориентациями σ_H , которые далее переходят к параллельной дайке ориентации в силу причин, описанных выше. Эта картина наиболее полно раскрывается в случае наибольшей кривизны (Г), где видно, что факторы сдавливания вещества между ветвями дайки и давление стенок строго разграничены по зонам преобладания, а в центре формируется небольшая зона, где они уравниваются и вокруг которой оси σ_H вращаются. Это вполне нетривиальный результат, но наблюдать его может лишь во внутренней части достаточно изогнутой дайки.

Отметим, что в дальней зоне вогнутой стороны дайки с рост кривизны перестаёт в определённый момент повышать амплитуду напряжений, что мы видим на поле давления (рис. 2 Б-Г). С выпуклой стороны, напротив, рост кривизны приводит к формированию на сильном изгибе (рис. 2 Г, а в зачатке и на рис. 2 В) зоны растяжения, которая по структуре схожа с аналогичной зоной близ концов дайки, однако меньше по амплитуде – в случае Г значение давления достигает 126.5 МПа. Стенки же дайки образуют классическую зону повышенного давления с перпендикулярными им осями σ_H . Так как в дальней зоне вогнутого сектора картина примерно такая же, то можно отметить любопытный факт – при данном уровне кривизны аномалии схожи с теми, что сформировала бы треугольная в сечении интрузия. Если бы мы продолжили изгибать дайку, то в какой-то момент

она приняла бы параболическую форму, концевые аномалии слились бы в одну и в поле напряжений она снова выглядела бы как прямая дайка.

Рассмотрим теперь второй инвариант тензора напряжений – максимальные касательные напряжения τ_{\max} (рис. 3). Как и в случае с прямой дайкой, наибольшая аномалия (здесь и далее – положительная, т. к. $\tau_{\max} > 0$) формируется близ концевых участков, достигая 17 МПа, причем каждая аномалия состоит из 2 секторов – левого и правого (относительно вертикально идущей дайки). В случае прямой дайки, непосредственно близ ее сторон уровень τ_{\max} невысок, т. к. плоская поверхность не создает заметных сдвиговых деформаций. Но в случае изогнутой дайки мы видим иную картину. Ее выпуклая сторона, расширяясь и изгибаясь, создает сплошную зону повышенных $\tau_{\max} = 11$ МПа в случае А и 14 МПа в случае Б. В первом случае эллипсы, ограничивающие дайку вытянуты вдоль вертикальной оси, а во втором малый эллипс – окружность (это переходный случай). Когда же эллипсы вытянуты вдоль горизонтальной оси (В и Г), кривизна центральных частей сте-

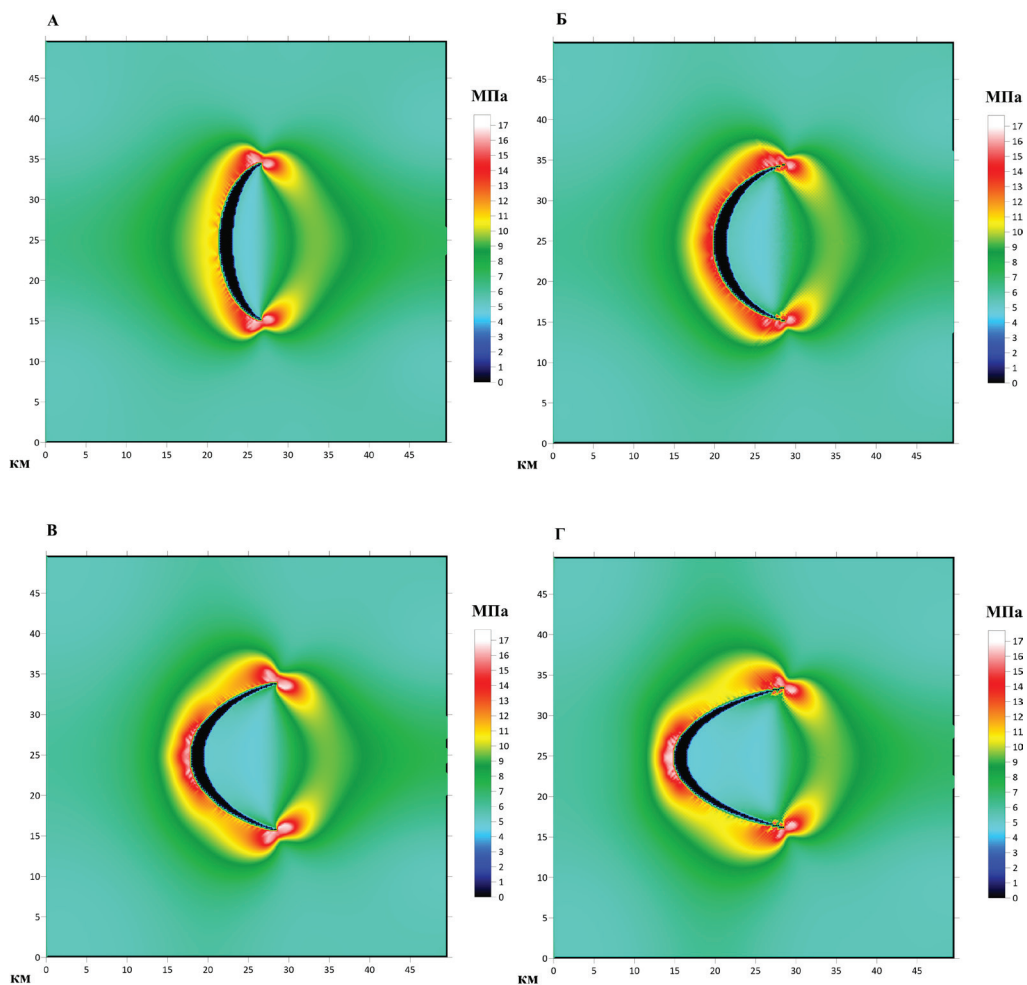


Рис. 3. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изогнутой дайки: поле максимального касательного напряжения τ_{\max} . Результаты представлены для: А – дайки малой кривизны ($a = 5$ км, $b = 10$ км), Б – дайки средней кривизны ($a = 10$ км, $b = 10$ км), В – дайки повышенной кривизны ($a = 16$ км, $b = 10$ км), Г – дайки высокой кривизны ($a = 25$ км, $b = 10$ км), где a – горизонтальная, b – вертикальная полуось ограничивающего вогнутую поверхность дайки эллипса

Fig. 3. Results of modeling crustal loading in the emplacement zone of a curved dike: the field of maximum rocking stress τ_{\max} . The results are presented for: А – dikes of small curvature ($a = 5$ km, $b = 10$ km), Б – dikes of medium curvature ($a = 10$ km, $b = 10$ km), В – dikes of increased curvature ($a = 16$ km, $b = 10$ km), Г – dikes of high curvature ($a = 25$ km, $b = 10$ km), where a – is the horizontal and b – is the vertical semi-axis of the ellipse bounding the concave surface of the dike

нок дайки становится заметно меньше кривизны центральной части (у полюсов эллипсов), где формируется зона растяжения. Отметим, что это растяжение реализуется лишь в вертикальном направлении – в горизонтальном же дайка давит в нормальном к ее поверхности направлении в обычном режиме. В результате мы имеем пониженное вертикальное нормальное напряжение и повышенное горизонтальное, что, вместе с изгибом, и дает высокий уровень касательных напряжений – 17 МПа в случае Г, причем здесь эта аномалия даже больше проявлена, чем концевые. Любопытная картина наблюдается с вогнутой стороны: внутри ветвей дайки во всех случаях формируется однородная зона пониженных касательных напряжений. Это связано с тем, что, как было указано выше, здесь практически выравниваются нормальные напряжения во всех направлениях и напряженное состояние близко к гидростатическому. Амплитуда τ_{\max} здесь меньше, чем даже на удалении от дайки – около 4.5 МПа. Однако двигаясь дальше от дайки, можно наблюдать заметный максимум – он во всех случаях меньше, чем аналогичный вдоль выпуклой стороны, но тоже достаточно амплитудный: от 9.5 МПа в случае А, до 10 в случае Г. При этом затухание касательных напряжений в этом направлении наименьшее, даже близ границы модели значение τ_{\max} около 7 МПа.

Наконец, рассмотрим достаточно важный в тектонофизике параметр – геодинамический тип напряжённого состояния. Для его определения необходимо учесть вертикальное нормальное напряжение, которое для глубины 5 км равняется 135 МПа в начальном состоянии. Если, после внедрения дайки горизонтальное нормальное напряжение в любом направлении будет выше вертикального, реализуется тип горизонтальное сжатие. Если, напротив, ниже – горизонтальное растяжение. Если же максимальное горизонтальное напряжение σ_{H} будет больше вертикального, а минимальное σ_{h} – меньше вертикального, то реализуется тип горизонтальный сдвиг. В начальном же литостатическом состоянии всюду горизонтальное растяжение. Для прямой дайки образуется режим сжатия близ ее стенок, переходящий в сдвиг на некотором удалении (если давление магмы выше вертикального напряжения). За окончаниями стенок всегда сохраняется растяжение, т. к. концевые аномалии только усиливают и так имеющуюся изначально обстановку растяжения.

В случае слабоизогнутой дайки (рис. 4 А) зона сдвига с выпуклой стороны дайки будет шире в ближней зоне, но быстрее затухать в дальней, чем с вогнутой стороны, где в области, окруженной ветвями дайки, будет формироваться обстановка горизонтального сжатия. С выпуклой стороны она практически не образуется, так как, расширяясь, выпуклая поверхность заметно снижает σ_{h} (в направлении, параллельной поверхности дайки). С ростом кривизны, зона сдвига в направлении от вогнутой поверхности особых изменений не претерпевает, тогда как зона сжатия несколько расширяется вместе с ростом объема среды, окруженной стенками дайки. С выпуклой стороны, с ростом кривизны зона сдвига равномерно выстраивается вдоль поверхности дайки, как для сферической аномалии (Мягков, 2025 б). Для сильно искривленной дайки (рис. 4 Г) напротив центральной части начинает формироваться локальное снижение ширины зоны сдвига, однако она все еще есть. Это результат можно сопоставить с полученными выше для поля давления.

Можно утверждать, что хотя зона растяжения, создаваемая изгибом выпуклой стороны сильно изогнутой дайки и схожа с аномалией концевой части дайки, все же последняя создает сильное аномальное растяжение, которое лишь усиливает режим горизонтального растяжения от литостатики. Зона растяжения изгиба является все же зона нагружения среды – растяжение проявляется в понижении σ_{h} , а σ_{H} , за счет давления поверхности дайки, тем не менее выше начального уровня. Впрочем, при более резком перегибе (или вовсе изгибе) аномалия могла бы дать полноценную зону растяжения.

Наконец, рассмотрим вопрос о влиянии глубины модели на формирующееся напряженно-деформированное состояние. Рассмотрим более глубинный уровень (10 км) и приповерхностный (1 км). На глубине 10 км положим давление $p = 254$ МПа, горизонтальные напряжения $\sigma_{\text{h}} = \sigma_{\text{H}} = -245$ МПа, вертикальное нормальное напряжение $\sigma_{\text{v}} = -270$ МПа. Будем считать, что давление магмы на этой глубине $p_{\text{m}} = 280$ МПа = $1.1 * p$. На глубине 1 км давление $p = 21.6$ МПа, горизонтальные напряжения $\sigma_{\text{h}} = \sigma_{\text{H}} = -20$ МПа, вертикальное нормальное напряжение $\sigma_{\text{v}} = -25$ МПа. Будем

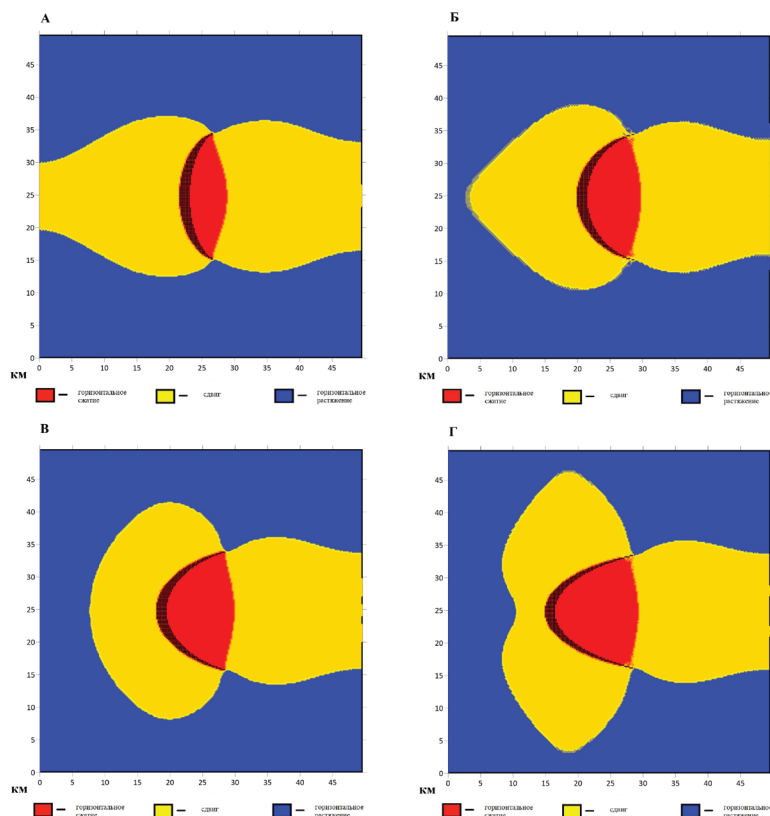


Рис. 4. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изогнутой дайки: распределение геодинамического типа напряженного состояния. Результаты представлены для: А – дайки малой кривизны ($a = 5$ км, $b = 10$ км); Б – дайки средней кривизны ($a = 10$ км, $b = 10$ км); В – дайки повышенной кривизны ($a = 16$ км, $b = 10$ км); Г – дайки высокой кривизны ($a = 25$ км, $b = 10$ км), где a – горизонтальная, b – вертикальная полуось ограничивающего вогнутую поверхность дайки эллипса

Fig. 4. Results of crustal loading modeling in the area of a curved dike emplacement: distribution of the geodynamic type of stress state. The results are presented for: А – dikes of small curvature ($a = 5$ km, $b = 10$ km); Б – dikes of medium curvature ($a = 10$ km, $b = 10$ km); В – dikes of increased curvature ($a = 16$ km, $b = 10$ km); Г – dikes of high curvature ($a = 25$ km, $b = 10$ km), where a – is the horizontal and b – is the vertical semi-axis of the ellipse bounding the concave surface of the dike

считать, что давление магмы на этой глубине $p_m = 32.8$ МПа = $1.52 \cdot p$. Необходимо заметить, что хотя в абсолютных значениях давление магмы на глубине 10 км превышает литостатическое на 35 МПа, а на глубине 1 км – на 11 МПа, в процентном соотношении давление выше на глубине 1 км (именно рост превышения давления магмы над литостатикой при удалении от очага в направлении дневной поверхности и вызывает изучаемый в работе эффект). Поэтому мы видим, что зоны сдвига и горизонтального сжатия заметно сокращаются с ростом глубины (ср. рис. 5 А, 5 Б и 4 Б). В целом же, при сохранении геометрии дайки, создаваемые ей аномалии по структуре не меняются, что видно по рис. 5 – поле давления меняется по амплитуде, сохраняя распределение максимумов и минимумов. Амплитуды давления, касательных напряжений и любых компонент тензора напряжений будут соотноситься в зависимости от значений прочности сцепления, модулей упругости, угла внутреннего трения и плотности среды, а поскольку прочность (когезия) и угол внутреннего трения известны лишь по результатам опыта на образцах и существует нерешённая проблема апскейлинга, то точное определение значений амплитуд компонент тензора напряжений может быть затруднено. Однако структура представленных здесь инвариантов (давления, максимального касательного напряжения, ориентаций главных осей тензора напряжений) должна хорошо соответствовать природным данным.

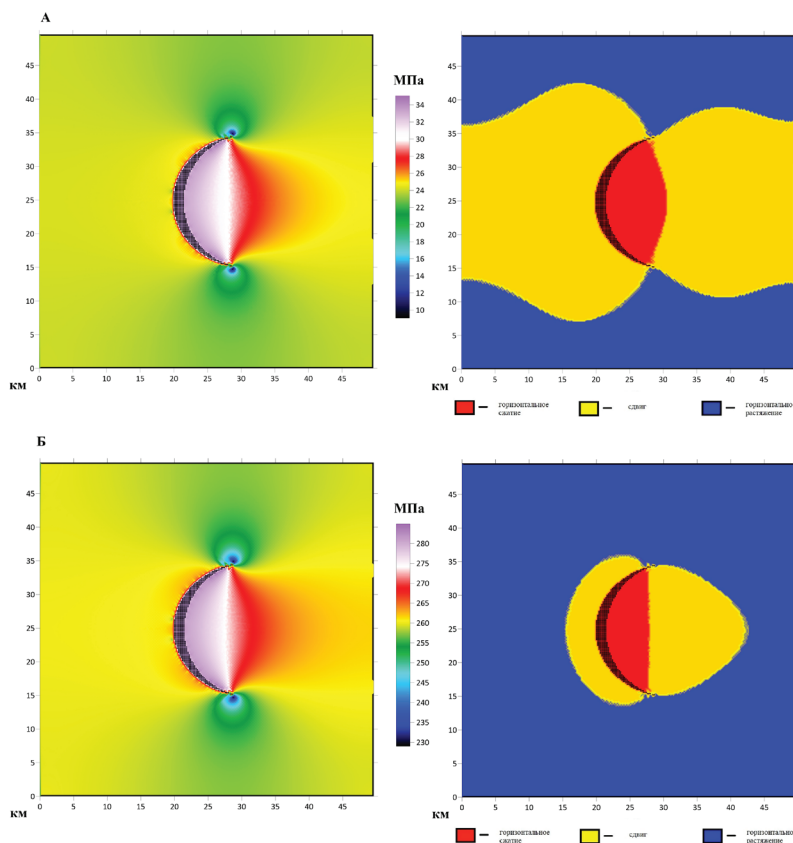


Рис. 5. Результаты моделирования нагружения коры в области внедрения изогнутой дайки: распределение давления (слева) и геодинамического типа напряжённого состояния (справа). Результаты представлены для: А – глубины 1 км; Б – глубины 10 км. Все расчёты выполнены для дайки средней кривизны ($a = 10$ км, $b = 10$ км), где a – горизонтальная, b – вертикальная полуось ограничивающего вогнутую поверхность дайки эллипса

Fig. 5. Results of modeling crustal loading in the emplacement zone of a curved dike: pressure distribution (left) and geodynamic stress type (right). The results are presented for: A – a depth of 1 km; Б – a depth of 10 km. All calculations are performed for a dike of moderate curvature ($a = 10$ km, $b = 10$ km), where a – is the horizontal and b – is the vertical semiaxis of the ellipse bounding the concave surface of the dike

Выводы

Результаты моделирования позволили уточнить структуру поля напряжений для вытянутой изогнутой интрузии (дайки, участку магматического пояса) по отношению к прямой модели. Было показано, что изогнутая дайка концентрирует напряжения близ вогнутой части, в непосредственной близости от которой возникает специфическое, близкое к гидростатическому состояние с осями наибольшего сжатия, ориентированными вдоль дайки и крайне высоким уровнем давления. При достаточной кривизне дайки, изгиб на ее выпуклой части начинает действовать как центр растяжения. В целом, близ искривленной дайки во всех направлениях формируется повышенный уровень касательных напряжений, возрастающий с ростом кривизны. Напротив, распределение геодинамического типа напряженного состояния имеет выраженную векториальность и с выпуклой стороны он имеет тенденцию гораздо быстрее возвращаться к изначальному горизонтальному растяжению на удалении от дайки. При этом радиус формирования напряженного состояния сдвигового типа и типа горизонтального сжатия сильно зависит от глубины, вместе с ростом последней радиусы быстро сокращаются. Однако особенности распределения аномальных напряжений и ориентации главных осей тензора напряжений от глубины практически не зависят и максимумы и минимумы давления и касательных напряжений формируются на том же удалении от дайки.

Полученные результаты могут применяться при решении обратных задач геодинамики и интерпретации тектонофизических данных. Сопоставление полученных из тектонофизических реконструкций полей напряжений с модельными позволит рассчитать удельный вес компоненты поля напряжений, связанной с непосредственным внедрением интрузии и отделить магматогенную аномальную часть напряженно-деформированного состояния от тектонической.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Мягков Д. С. Изучение особенностей напряжённого 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: Сб. 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. сер. 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. Bazargan M., Gudmundsson A. Dike-induced stresses and displacements in layered volcanic zones // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 384. P. 189–205.
8. 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. V. 570. P. 117080. doi:10.1016/j.epsl.2021.117080
9. Drymoni K., Browning J., Gudmundsson A. Dyke-arrest scenarios in extensional regimes : Insights from field observations and numerical models, Santorini, Greece // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 396. 106854 p. p. 1–22.
10. Gudmundsson A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. Earth-Science Reviews. 2006. V. 79, No. 1–2, P. 1–31. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.00.
11. Maccaferri F., Bonafede M., Rivalta E. A numerical model of dyke propagation in layered elastic media // Geophysical Journal International. 2010. V. 180. P. 1107–1123.
12. Wilkins M. L. Computer Simulation of Fracture // Lawrence Livermore / Laboratory, Rept. 1972. UCRL-75246.