

УДК 551.14

**О СВЯЗИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
С ЭНДОГЕННЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ**

С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gmmlab@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

На месторождениях полезных ископаемых и во внутриконтинентальных областях Земли регистрируются аномально высокие субгоризонтальные тектонические напряжения сжатия. Многие месторождения расположены в пределах покрывающих поверхность планеты кольцевых морфообразований. Решается задача о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород в границах эволюционирующего кольцевого образования на одной из характерных стадий его развития. Показано, что сублатеральное сжатие в области кольцевой структуры, в частности на глубинах, доступных для освоения, является существенно неоднородным, непостоянным и может значительно превышать обусловленное весом горных пород. Результаты расчетов сравниваются с лабораторными и натурными данными.

Земная кора, месторождения полезных ископаемых, тектонические напряжения, деформированное состояние, эндогенные кольцевые структуры, метод дискретных элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20170606

Исследованиями напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород *in situ* установлено, что во внутриконтинентальных областях Земли способны развиваться аномально высокие субгоризонтальные напряжения сжатия σ_x , σ_y . Впервые на них обратили внимание в конце 19 в. при строительстве в Альпах Симплонского тоннеля. Инструментальными наблюдениями, развернутыми позже специалистами ряда стран в тоннелях, рудниках, шахтах, карьерах и др., было установлено, что экстремальные значения этих сублатеральных напряжений могут на порядок превышать литостатические $\sigma_z = \gamma h$, где γ — удельный вес пород; h — расстояние до поверхности [1–4].

В России в рудниках Горной Шории и Хакасии отмечено возрастание σ_x , σ_y вплоть до 5.2 и 3.8 σ_z соответственно [5]. Для Норильского и Николаевского месторождений полиметаллов найдены значения σ_x , σ_y , достигающие в первом случае ~ 4 и 2 σ_z [6], во втором — 2.5 и 1.5 σ_z соответственно [6, 7]. Аналогичные цифры зарегистрированы также на других месторождениях СНГ [6] и стран дальнего зарубежья [8]. По данным [9], в рудниках Пшибром (Чехия) на глубине 1460 м и Колар (Индия) в ~ 3000 м от поверхности напряжения σ_x , σ_y превышают σ_z на десятки мегапаскаль. В рудниках Южной Африки в интервале глубин 1600–2400 м вместе с существенно повышенными горизонтальными напряжениями зафиксированы также близкие по величине геостатическим [10].

Еще более любопытные ситуации складываются в условиях малых глубин равнинных территорий. Казалось бы, эрозия, выветривание, разрыхление, выщелачивание пород должны полностью исключить в таких районах аномальные приповерхностные напряжения. Тем не менее в осадочных и изверженных породах Швеции, Финляндии, ФРГ, США всего лишь в 10–15 м от поверхности наблюдается субгоризонтальное сжатие, достигающее 3 МПа [10]. В целом ряде каменноугольных США и Канады обнажение (разгрузка) пологозалегающих породных слоев сопровождается растрескиванием, короблением, потерей ими продольной устойчивости в сторону свободной границы с формированием складки [11]. Таким образом, на всех континентах Земли инструментальными наблюдениями на доступных для измерений глубинах подтверждено развитие повышенных сублатеральных напряжений сжатия.

Происхождение этих напряжений в верхней части литосферы планеты исследователи относят на счет тектонических процессов. Одним из них, следуя глобальной тектонике плит [12], в частности в случае Евразии, считают ее конвергентное сжатие в северо-восточном направлении “Индостанским индентором”. Полагают, что современное положение занял он, совершив дрейф из района Мадагаскара [13]. Однако существуют факты, которые указывают на неадекватность таких представлений [14–17]. Ряд авторов полагает, что геодинамическая модель, способная объяснить обсуждаемый феномен, должна учитывать не только контрактацию, но и расширение Земли, т. е. опираться на пульсационную тектоническую гипотезу [18, 19]. Среди геофизиков есть также мнение, что рассматриваемые “избыточные” напряжения возбуждаются какими-то “чрезвычайно мощными современными воздействиями, природа которых совершенно непонятна” [20]. Таким образом, строго аргументированных и общепризнанных представлений в отношении причин и механизма реализации в верхах литосферы Земли аномальных субгоризонтальных напряжений сжатия до сих пор не существует.

НОВЫЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАЗВИТИИ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В целом с точкой зрения о тектонической природе рассматриваемых сил можно согласиться. Вместе с тем есть основания полагать, что к ним современные варианты геотектоники не причастны. Начатое в 60-е годы прошлого столетия освоение околоземного космического пространства дало толчок ускоренному развитию в мире многих научных направлений и промышленных производств. Не обошел прогресс, связанный с космосом, геологию и геотектонику. Съёмки из него позволили значительно обогатить представления о структурных особенностях земной поверхности. В результате в 1979 г. у нас в стране появилась первая космогеологическая карта [21], за которой последовали другие [22, 23; и др.]. На них наряду с ранее известными морфообъектами были нанесены весьма характерные принципиально новые, так называемые структуры центрального типа, концентры или кольцевые структуры (К-структуры). Из [21–23] следует, что они имеют диаметр от первых метров до десятков, сотен и даже тысяч километров. Оказалось, что подобно лунным кратерам, кольцевые структуры Земли осложняют большую часть ее суши. Существуют они и на дне океанов [24].

На рис. 1 приведены заимствованные из [25] карты трех регионов России, покрытые сплошным “ковром” из кольцевых образований. Отдешифрованы они с использованием космоснимков, геолого-геофизических и геоморфологических данных. Выяснилось, что подавляющее число концентров — эндогенные. При этом, пожалуй, наиболее важно то, что порядка 75 % из них вмещают месторождения и залежи самых разнообразных полезных ископаемых [26]. Так, у нас в стране к ним приурочены Норильское [27] и Николаевское (см. стрелку на рис. 1б) [25] месторождения полиметаллов, залежи магнетита в Ангарской железнорудной провинции

[28, 29], множественные проявления железных руд на юге Тунгусской синеклизы [30]. В Канаде более двух десятков рудных тел ассоциируется с кольцевыми образованиями, например месторождения золота Хорн [31]. “Характерной чертой всех алмазоносных площадей является слабопроявленные овалообразные структуры диаметром от 150 до 300 км, а также повышенные плотности кольцевых структур диаметром от 25 до 75 км” [32]. С учетом данных, содержащихся в [25] и других работах, этот ряд может быть существенно расширен.

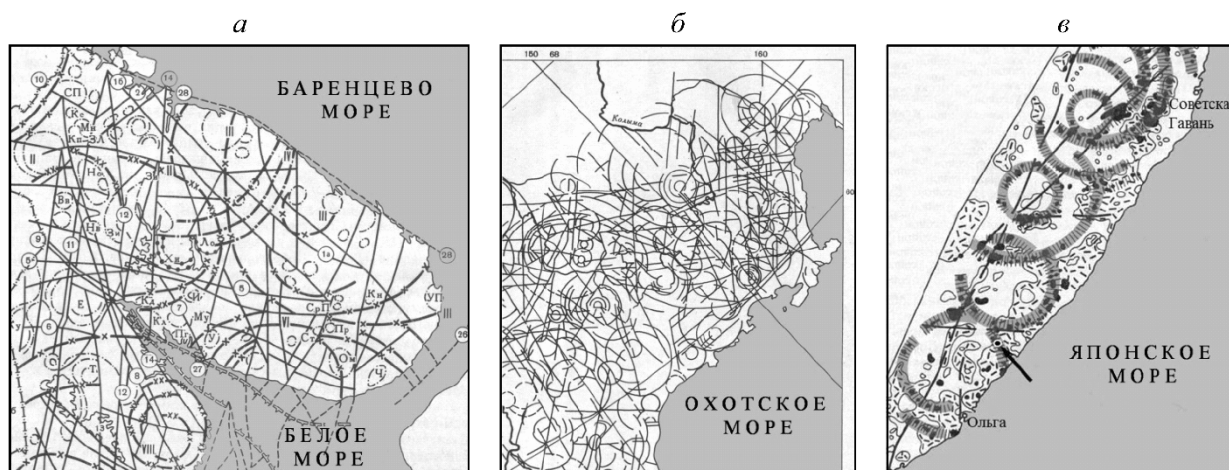


Рис. 1. Кольцевые структуры и линеаменты восточных частей Балтийского кристаллического щита (а), Верхояно-Колымского региона (б), юга Дальнего Востока (в) (из [25] с изменениями)

Эндогенные кольцевые структуры, в том числе осложненные полезными ископаемыми — “производные” актов водородной дегазации Земли. Их взрывная реализация сопровождается дефлюидизацией, потерей недрами продуктов дробления, разуплотнением локальных областей литосферы, как результат — превращением данных областей в очаги генерации К-структур [33–35]. Их “всплытие” из этих очагов и развивающиеся вслед поствзрывные процессы, инициируемые силой тяжести и дополнительно стимулируемые твердыми приливами, осуществляются, подчиняясь общему сценарию [33, 36]. Обеспечивается ими “остаточная” дефлюидизация и консолидация нарушенных пород очаговой области морфообразований или, что то же, их развивающееся от ее основания по восстанию залечивание. Характеризуется оно продолжающимися многие миллионы лет погружением днища и изменениями деформированного состояния (ДС) К-структур [33–35]. Его перестройка, происходящая в основном в квазистатической (криповой) форме, способна периодически прерываться скачкообразными преобразованиями ДС. Одно из следствий такого рода скачков — высвобождение накопленной геосредой кольцевой структуры упругой энергии в динамической форме [37]. Ясно, что любые изменения в НДС массива горных пород, слагающих концентр, не могут не отразиться на напряженно-деформированном состоянии находящихся в его пределах месторождений или залежей полезного ископаемого [38].

Таким образом, “феномен” аномально высоких горизонтальных напряжений сжатия, наблюдаемый при добыче твердых полезных ископаемых, может быть результатом реализации в литосфере планеты тектоники эндогенных кольцевых структур. Для краткости и учитывая ассоциации, возникающие в связи с особенностями кинематики К-структур [33], определив их название данной составляющей, будем называть ее “клавишной” тектоникой. Те вероятные возмущения, которые она способна вносить в НДС литосферы, исследуем с помощью численного моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим численный эксперимент со сравнительно небольшой эндогенной кольцевой структурой 1 диаметром $D = 10$ км (рис. 2). При таком размере, согласно [33, 34], “всплыла” она с глубины H_0 порядка 10 км. Проследим за изменениями напряжений и деформаций в пределах этого морфообразования на одной из характерных промежуточных стадий его постдегазационного залечивания. Это означает, что процессы, связанные с ним, в данном случае берут начало не из очага зарождения К-структуры, располагавшегося в ~ 10 км от поверхности, а из некоторого находящегося на глубине $H = 8$ км промежуточного 2 (текущего или *ТО*). Сформирован он вместе с имеющим глубину $H_3 = 1$ км и являющимся дном кольцевой структуры прогибом 3 земной поверхности; представлен разрыхленными горными породами. Перечисленное стало следствием консолидации подстилающих промежуточный очаг 2 толщ 4. Плотность геосреды в надочаговой части 5 центра при этом временно сохранила свое относительно высокое значение.

Для исключения в последующем неоднозначности трактовки получаемых расчетом деформационных и силовых картин, из-за их наложения на “фон”, образованный предшествующими событиями и процессами, будем считать, что геоматериал в зоне 5 на рассматриваемый момент залечен. Этим предполагается, что в ней, как и в геопространстве b , вмещающем кольцевую структуру 1, действуют вертикальные напряжения $\sigma_z = \mu$. Основное внимание при анализе уделим изменениям деформированного состояния массива горных пород и напряжений сжатия в потенциально антропогенной части A (A -области) коры морфообразования. Глубина H_A залегания основания слоя A , учитывая значения, приведенные ранее для глубин техногенного вмешательства, равна ~ 3 км. Сегодня главным образом оно реализуется не более чем в 1500–1700 м от поверхности.

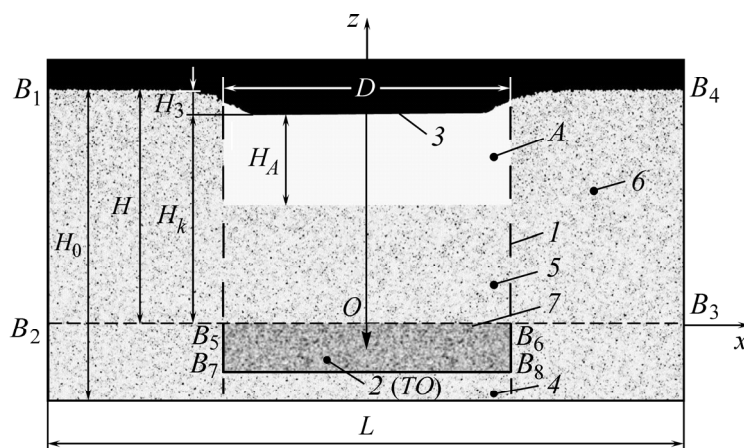


Рис. 2. Расчетная схема (пояснения в тексте)

Промоделируем изменение НДС однородного изотропного массива горных пород, вмещающего эволюционирующую кольцевую структуру, с привлечением модифицированного [39] метода дискретных элементов (МДЭ) [40] в двумерной постановке. Прямоугольная расположенная в плоскости Oxz емкость $\Gamma = B_1B_2B_3B_4$ шириной $L = 30$ км и высотой $H = 8$ км (см. рис. 2) заполнена дискретными элементами Ω_i , $i = 1, 2, \dots, N$, где N — число, равное порядка 60 000. Представляют они собой диски единичной толщины с осью, перпендикулярной плоскости Oxz . Их радиус находится в диапазоне от 75 до 100 м и подчиняется равномерному закону распределения. Диски имеют плотность $\rho_i = 2700$ кг/м³, модуль упругости $E_i = 10$ ГПа. Свойства междисковых элементов следующие: коэффициент трения скольжения $k_{ij} = 0.5$, сцепление $C_{ij} = 10$ МПа,

деформация разрушения $\varepsilon_{ij}^* = 0.05$, где i, j — номера дисков, $i \neq j$. Принятое значение C_{ij} характерно для крепких горных пород, у которых прочность на растяжение в 10–15 раз меньше, чем на сжатие [41]. Черным цветом на рис. 2 показана свободная граница массива из заполнивших емкость дискретных элементов. Сила тяжести направлена вниз.

Организовывали массив с использованием метода дискретных элементов динамическим способом [42, 43]. Сначала из соприкасающихся между собой граничных дискретных элементов (ГДЭ) Γ_k (k — номер относящегося к ГДЭ диска, где $k = k_1, k_2, \dots, k_n$, n — число граничных дискретных элементов) радиусом 100 м и центром, расположенным на границе Γ , создали стенки и дно емкости. Отличаются ГДЭ от остальных дискретных элементов тем, что на них наложены следующие краевые условия:

$$\mathbf{v}_k = (0, 0), \quad \omega_k = 0, \quad \Gamma_k \in \Gamma, \quad (1)$$

где \mathbf{v}_k — вектор скорости, ω_k — угловая скорость. Далее на высоте $z > 0$ в пределах прямоугольной области, расположенной над новообразованной емкостью, сформировали упаковку из несоприкасающихся между собой дисков. За счет гравитации и с учетом контактных сил, возникающих при соударениях дисков, им обеспечили свободное падение в емкость. После ее заполнения и достижения массивом в ней равновесного состояния часть дисков с поверхности удалили таким образом, чтобы последняя приобрела конфигурацию, соответствующую приведенной на рис. 2. Затем между парами контактирующих дисков ввели междисковый элемент — виртуальную пружину сцепления, концы которой закрепили в точках пересечения поверхности дисков прямой, проходящей через их центры. Принято, что сила F_{ij} натяжения пружины прямо пропорциональна ее длине λ_{ij} . При F_{ij} , достигшем значения $F_{ij}^* = \min(2r_i, 2r_j) C_{ij}$, выполняется условие разрыва пружины $\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{ij}^*$, где $\varepsilon_{ij} = \lambda_{ij} / \min(2r_i, 2r_j)$.

Состояние массива, сформированного рассмотренным способом, принято за начальное (рис. 2). Краевые условия при постановке основной задачи следующие:

$$\mathbf{v}_k = \begin{cases} (0, 0), & \Gamma_k \in \Gamma \cup B_5B_7 \cup B_6B_8 \setminus B_5B_6, \\ (0, -v), & \Gamma_k \in B_5B_6, \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_k = 0, \quad \Gamma_k \in \Gamma \cup B_5B_7 \cup B_6B_8,$$

где $v = \text{const} = 1$ м/с; B_5B_6 — центральный шириной 10 км участок основания емкости, который способен опускаться в вертикальном канале B_5B_7, B_6B_8 , сформированном из таких же, как и принадлежащих границе Γ , элементов. Смещением участка B_5B_6 из положения 7 по падению моделируется консолидация пород в промежуточном очаге 2 и развитие от него по восстанию “волны” разрыхления геосреды в области 5 К-структуры. In situ инициируются эти процессы приливной “вибрацией” и вертикальными напряжениями γH_k , составляющими порядка 250 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 3а, б приведены расчетные картины деформированного состояния скального массива в области, находящегося на одной из промежуточных стадий залечивания эндогенного кольцевого образования. Будем считать, что они отражают ДС среды в вертикальном сечении, проходящем через ось осесимметричной морфоструктуры. Это позволяет в дальнейших обсуждениях сечения, как и при анализе всех других получаемых в исследовании результатов, применять терминологию, используемую в отношении осесимметричных К-структур. Правомочность этого подтверждается в [33].

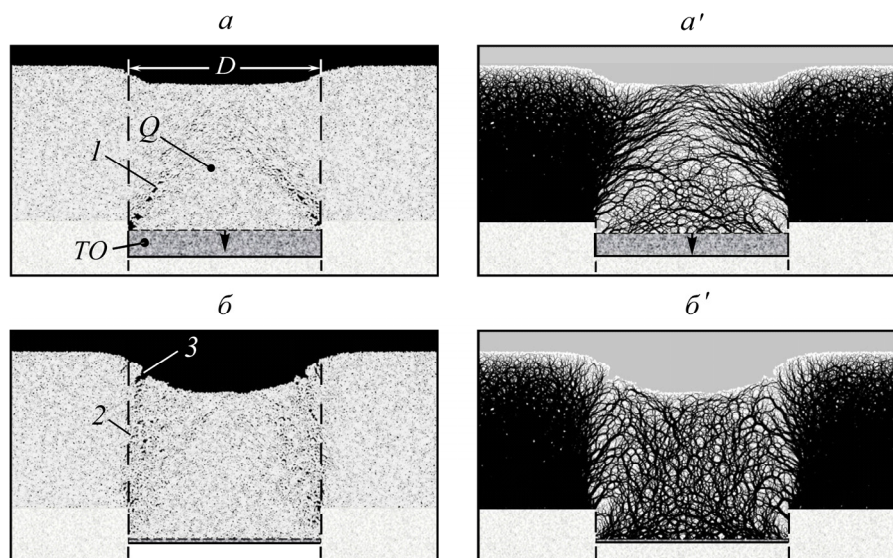


Рис. 3. НДС скального массива в области К-структуры на двух характерных шагах ее залечивания (пояснения в тексте)

Рассматриваемый единичный акт залечивания связан с уплотнением пород в текущем очаге при участии твердых приливов; осуществлен за счет реализации двух характерных деформационных шагов, которые продиктованы дилатансией [33]. На первом из них в геопространстве кольцевой структуры произошло оживление конической полосы скольжения I и блока Q (рис. 3а), на втором — подвижка геоматериала по падению вдоль цилиндрической поверхности 2 локализованных деформаций и погружение днища кольцевого образования (рис. 3б). Его переход из начального состояния в показанные на рис. 3а, б может осуществляться квазистатически или в динамической форме. В первом случае, который обсуждается в настоящем исследовании, между исходным деформированным состоянием геосреды и картинами ее ДС могут реализовываться промежуточные. Все они, по сравнению с получаемыми в опытах с сыпучими материалами [33], имеют некоторые особенности. Связано это с тем, что в данной ситуации геосреда обладает сцеплением.

На рис. 3а', б' показаны расчетные картины напряженного состояния (НС) массива, вмещающего кольцевую структуру. Представление о его исходном НС в расчетной области позволяет составить напряженное состояние геоматериала в ее частях, не затронутых К-структурой (рис. 3б'). Их темный фон образован возрастающими с глубиной напряжениями сжатия, более светлый приповерхностный слой — такими же напряжениями, но меньшими по величине. Отображается напряженное состояние породного массива на рис. 3а', б' в виде полей из силовых цепочек. Толщина каждого из их звеньев характеризует абсолютное значение сжимающей силы. Чем оно выше, тем больше мощность звена. Данная форма представления НС геосреды удобна тем, что наряду с величиной усилий сжатия демонстрирует их точное положение и ориентацию в геопространстве залечивающегося кольцевого образования.

Первый деформационный шаг (рис. 3а, а'), связанный с гравитационным уплотнением геоматериала в промежуточном очаге, сопровождается: 1) разгрузкой конической области Q ; 2) дезинтеграцией и разуплотнением в ней горных пород; 3) кардинальной перестройкой силового поля в "теле" кольцевого образования; 4) сгущением в его приповерхностной зоне мощных силовых цепочек с разворотом их звеньев в A -области на угол $\pi/2$ и реализацией повышенных субгоризонтальных сил сжатия. Второй деформационный шаг (рис. 3б, б'), направ-

ленный на окончательную ликвидацию в области К-структуры глубинной неоднородности в виде TO , характеризуется: 1) развитием по восстанию “волны” гравитационного уплотнения — залечивания породного массива надочаговой части 5 кольцевой структуры; 2) началом возвращения ее силового поля к исходному состоянию с отставанием этого процесса в цилиндрической аномально разуплотненной полосе скольжения 2; 3) появлением кольцевого разрывного нарушения 3 в борту погружающегося днища концентра.

Таким образом, полученные результаты подтверждают правильность выдвинутой версии о способности за счет реализации на Земле “клавишной тектоники” развиваться в верхах литосферы повышенных горизонтальных напряжений сжатия. Возникают они вследствие радикальной структурной перестройки массивов, вмещающих эндогенные кольцевые структуры — базовые элементы этой тектоники. Насколько существенными в действительности могут быть такого рода преобразования, нетрудно представить, если учесть, что в ходе истории в области данных элементов происходит неоднократное “послойное” наложение друг на друга картин НДС геосреды, подобных расчетным на рис. 3.

Рассмотрим несколько подробней изменения, которые способны вносить эволюционирующие кольцевые образования в напряженно-деформированное состояние приповерхностного мощностью 1500–1700 м слоя антропогенной толщи литосферы. На рис. 4, наряду с отсутствующей на рис. 3 исходной ситуацией (рис. 4а), представлены три последовательные стадии трансформации напряженно-деформированного состояния скального массива в А-области залечивающегося кольцевого образования. На разных ее этажах дополнительно проставлены две группы точек — P_1, P_2, P_3 и P'_1, P'_2, P'_3 .

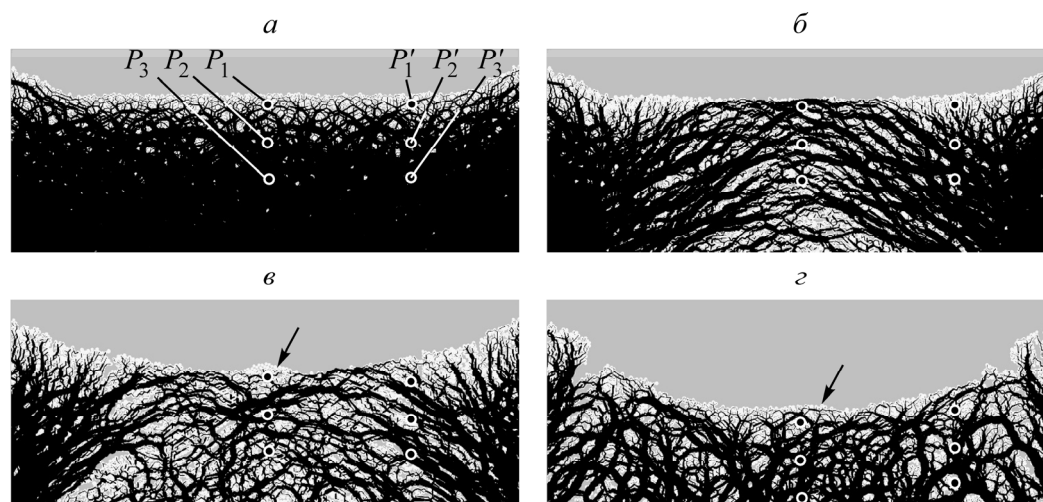


Рис. 4. Четыре эволюционные стадии НДС в А-области залечивающейся К-структуры

Видно, как в ходе залечивания структура силового поля концентрата преобразовалась из квазиплотной (рис. 4а) через “ленточную” (рис. 4б) и “ленточно-ячеистую” (рис. 4в) в “мелкоячеистую” (рис. 4г). Самым примечательным оказался переход от стадии 1 (рис. 4а) к стадии 2 (рис. 4б). Сопровождался он резким изменением структурного рисунка поля напряжений, переориентацией силовых линий от вертикального положения к субгоризонтальному и их сближением с дневной поверхностью. Следствием такой перестройки стали потеря приповерхностным слоем устойчивости с образованием на свободной границе локального поднятия (см. стрелку на рис. 4в) — аналога складок торощения в каменоломнях США и Канады — и падение в его основании субгоризонтальных напряжений сжатия. На заключительном шаге деформирования высота поднятия уменьшилась (рис. 4г).

В таблице приведены расчетные значения отношения напряжений сжатия σ_x к величине γh в точках, находящихся на глубинах h . Напряжения σ_x в каждой из них находились с помощью ближайшего к ней дискретного элемента по формуле

$$\sigma_x = 0.5(F_{rx} - F_{lx}) / (2r),$$

где F_{rx} , F_{lx} — суммы проекций на ось Ox контактных сил, действующих соответственно на правую и левую половины диска радиусом r , разделенного проходящей через его центр вертикалью. Положительным значениям σ_x отвечают растягивающие напряжения, отрицательным — сжимающие.

Расчетные напряжения сжатия

Точка	h , м	γh , МПа	Стадии деформирования, $ \sigma_x / \gamma h$			
			a	b	$в$	$г$
P_1	200	5.4	0.4	10.2	2.2	0.6
P'_1			0.5	0.4	0.2	0.2
P_2	900	24.3	0.4	4.1	3.1	0.5
P'_2			0.3	3.6	3.4	0.8
P_3	1500	40.5	0.3	2.3	1.6	0.3
P'_3			0.4	5.8	4.3	1.7

Полученные для $|\sigma_x| / \gamma h$ цифры позволяют составить полное представление об изменениях напряженного состояния породного массива в точках $P_1 - P_3$, $P'_1 - P'_3$ A -области кольцевого образования при последовательном переходе от первой стадии к четвертой (рис. 4). Расчетные данные свидетельствуют об отсутствии какой-либо закономерности в поведении тектонических напряжений при таком переходе; показывают, насколько они неоднородны и непостоянны по величине в A -области, как сильно могут меняться в каждой из ее точек от стадии к стадии и насколько близко к дневной поверхности способны реализовываться их пиковые значения. Сближение со свободной границей и величина пика напрямую зависят от прочностных характеристик пород, которые слагают массив, вмещающий кольцевую структуру. Подчеркнем, что максимальная табличная цифра ($|\sigma_x| / \gamma h = 10.2$) получена для случайной точки K -структуры, а потому не исключено, что в действительности не является для нее пиковой. Изложенное и иллюстрации на рис. 3, 4 делают понятным, в силу чего во многих случаях “при углублении ниже уровня базисов эрозии всего на 50–100 м наблюдается резкий рост (до 10 раз) горного давления ... (или почему) хрупкое разрушение со стреляниями в крепких породах проявляется при проходке выработок начиная с глубин 50–100 м и даже непосредственно на поверхности при образовании выемок и котлованов” [6].

Приведенные материалы показывают, что реализация в литосфере Земли “повышенных” горизонтальных напряжений сжатия может быть объяснена с позиций “клавишной тектоники”. Их происхождение связано с процессами, которые, подчиняясь определенным закономерностям [33, 44], протекают в геопространстве ее эволюционирующих геоморфологических образований — эндогенных кольцевых структур. Абсолютные значения аномальных напряжений в их границах не постоянны во времени, зависят от прочности породного массива, способны: 1) развиваться на произвольных глубинах, включая приповерхностные; 2) существенно падать в низах коры; 3) возрастать в ее верхах значительней, чем в условиях больших глубин; 4) отли-

чатся по величине в разных областях одного и того же горизонта морфообразования на едином временном отрезке; 5) меняться в течение многих миллионов лет квазистатически или скачкообразно. В частности, последний пункт означает, что повторные измерения напряжений (деформаций) даже в строго фиксированных местах и горнотехнической обстановке, например, конкретных находящихся в области кольцевой структуры рудника или шахты, сделанные одним и тем же коллективом исследователей с использованием одних и тех же методик и аппаратуры, но в разное время, в каких-то случаях способны дать радикально отличающиеся результаты.

Рассматриваемая задача решена в двумерной постановке. Это позволило оценить те изменения субгоризонтальных напряжений сжатия, которые возможны лишь в вертикальном сечении эволюционирующих кольцевых структур. На механизм их формирования, напряженно-деформированное состояние и рисунок в плане свой отпечаток накладывают трехмерность и абсолютные размеры концентров. Главной особенностью генезиса тех из них, что имеют диаметр в десятки и более километров, становится поворот вокруг произвольной точки, которая может оказываться в любой из вертикальных плоскостей геопространства [44]. От ее ориентации в нем зависят азимутальные направления латеральных компонентов σ_x , σ_y напряжений сжатия, реализующихся в этих “опрокидывающихся” морфоструктурах в ходе образования и залечивания. Вместе с тем даже в разных областях каждой из них в силу вещественной и структурной гетерогенности геосреды возможны различия в значениях σ_x , σ_y и их направлений. Вероятность этого возрастает с ростом диаметра структур.

Следовательно, величины и ориентация напряжений σ_x , σ_y в кольцевых структурах планеты из-за разницы в размерах, особенностей механизма “всплывания” и истории развития, неоднородности литосферы способны оказываться самыми разнообразными. Мозаика из таких разнонаправленных и отличающихся по модулю напряжений, организуемая в земной коре “ковром” кольцевых образований, по-видимому, дополнительно “корректируется” глобальной тектоникой Земли. Какими конкретно могут быть связанные с этим “поправки”, пока остается неясным. Это означает, что результаты, полученные в настоящей работе, следует рассматривать только как очередной шаг на пути решения такой фундаментальной проблемы, какой является происхождение в литосфере планеты тектонических напряжений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, численно методом дискретных элементов исследовано изменение напряженно-деформированного состояния эндогенного кольцевого морфообразования на одном из характерных шагов его эволюции. Полученные результаты позволяют заключить, что приповерхностные области земной коры, включая осложненные месторождениями и залежами полезных ископаемых, могут испытывать аномально высокие субгоризонтальные тектонические напряжения сжатия только из-за принадлежности к развивающимся многие миллионы лет эндогенным кольцевым структурам.

Авторы признательны Е. П. Русину за техническую помощь на всех этапах выполнения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.
2. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). — М.: Наука, 1973. — 188 с.

3. **Hast N.** The state of stress in the upper part of the Earth's crust as determined by measurements of absolute rock stress, *Naturwissenschaften*, 1974, B. 61, No. 11. — P. 468–475.
4. **McGarr A. and Gay N. C.** State of stress in the Earth's crust, *Ann. Rev. Earth. Planet Sci.*, 1978, Vol. 6. — P. 405–436.
5. **Квочин В. А., Лобанова Т. В., Веселов А. И. и др.** Геодинамические процессы в районе промышленных объектов юга Западной Сибири // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли.* — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2006. — С. 110–119.
6. **Айтматов И. Т., Ахматов В. И., Борщ-Компаниец В. Н. и др.** Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд // *ФТПРПИ.* — 1987. — № 4. — С. 3–22.
7. **Барышников В. Д., Курленя М. В., Леонтьев А. В. и др.** О напряженно-деформированном состоянии Николаевского месторождения // *ФТПРПИ.* — 1982. — № 2. — С. 3–12.
8. **Леонтьев А. В.** Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии // *ФТПРПИ.* — 2001. — № 1. — С. 31–40.
9. **Scheidegger A. E. and Padale J. G.** A geodynamic study of peninsular India, *Rock Mechanics*, 1982, Vol. 15, No. 4. — P. 209–241.
10. **Кропоткин П. Н., Ефремов В. Н., Макеев В. М.** Напряженное состояние земной коры и геодинамика // *Геотектоника.* — 1987. — № 1. — С. 3–24.
11. **Adams I.** Stress-relief buckles in the McFarland quarry, Ottawa, Canada, *J. Earth Sci.*, 1982, Vol. 19, No. 10. — P. 1883–1887.
12. **Новая глобальная тектоника** (тектоника плит). — М.: Мир, 1974. — 472 с.
13. **Земля.** — М.: АСТ “Астраль”, 2004. — 520 с.
14. **Спорные аспекты** тектоники плит и возможные альтернативы. — М.: ОИФЗ РАН, 2002. — 235 с.
15. **Белоусов В. В.** Тектоносфера Земли, ее строение и развитие. Геодинамические исследования № 13. — М.: Междунар. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР, 1989. — С. 7–35.
16. **Dickins J. M., Embry A. F., Beauchamp B., Glass D. J., eds.** What is Pangaea? *Pangaea: Global Environments and Resources*, Calgary, Canada: Canadian Society of Petrol. Geologists, 1994, Memoir 17. — P. 67–80.
17. **Леонтьев А. В.** Некоторые особенности геодинамики массива горных пород в Урало-Сибирских регионах // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли.* — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2006. — С. 125–129.
18. **Обручев В. А.** Пульсационная гипотеза геотектоники // *Изв. АН СССР. Сер. Геология.* — 1940. — № 2. — С. 2–30.
19. **Bucher W. H.** Deformation of the Earth crust, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1939, Vol. 50, No. 3. — P. 421–432.
20. **Пономарев В. С.** Парадокс релаксации напряжений в горных породах // *Природа.* — 1985. — № 5. — С. 53–61.
21. **Космогеологическая карта** линейных и кольцевых структур территории СССР. — М.: Мингео СССР, 1979.
22. **Карта** линеаментов и кольцевых структур Киргизской ССР / Главное управление геодезии и картографии при Совмине СССР, 1983–85.
23. **Космогеологическая карта** дочертвертичных образований Северо-Восточной части Балтийского щита. — М.: Мингео СССР, 1987.
24. **Николаев Н. И.** Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. — М.: Недра, 1988. — 491 с.
25. **Космическая информация** в геологии / под ред. акад. А. В. Пейве, А. В. Сидоренко, А. Л. Яншина и др. — М.: Наука, 1983. — 534 с.

26. Брюханов В. Н., Буш В. А., Глуховский М. З. и др. Кольцевые структуры континентов Земли. — М.: Недра, 1987. — 185 с.
27. Петров А. И., Сироткин Т. П., Суслов М. Н. Общие особенности строения и никеленосность Печенгской, Садбери и Норильской структур // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 251. — № 5. — С. 1211–1215.
28. Фон-дер Флаасс Г. С. Структура Нерюнгринского и Капаевского месторождений магнетита (Ангарская железнорудная провинция) // Геология и геофизика. — 1977. — № 6. — С. 63–69.
29. Стажевский С. Б., Хан Г. Н. Об изменениях напряженно-деформированного состояния месторождений полезных ископаемых // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 157–162.
30. Сапронов Н. Л. Древние вулканические структуры на юге Тунгусской синеклизы. — Новосибирск: Наука, 1986. — 104 с.
31. Жупахин Е. Н., Кудрявин Ю. А., Курашов Б. А. Палеовулкан “Юкагир” // Астеносфера и литосфера Северо-Востока России (структура, геокинематика, эволюция). — Магадан: СВК НИИ ДВО РАН, 2003. — С. 186–188.
32. Серокуров Ю. Н., Калмыков В. Д., Зуев В. М. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. — М.: Недра, 2001. — 198 с.
33. Стажевский С. Б. Кольцевые структуры в эволюции небесных тел Солнечной системы. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 106 с.
34. Стажевский С. Б. Механика становления и развития некоторых морфоструктур Земли. Ч. II // ФТПРПИ. — 2012. — № 1. — С. 63–83.
35. Стажевский С. Б. Кольцевые структуры Земли: механика образования, вклад в сейсмичность, металлогению, геоэкологию // Проблемы механики деформируемых твердых тел и горных пород: сб. статей к 75-летию Е. И. Шемякина. — М.: Физматгиз, 2006. — С. 790–799.
36. Машуков В. И., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О всплывании полостей в массивах горных пород // Докл. РАН. — 1997. — Т. 356. — № 6. — С. 817–820.
37. Стажевский С. Б. Кольцевые структуры как источник сейсмичности // Физ. мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — № 1. — С. 23–32.
38. Стажевский С. Б. Кольцевые структуры — вклад в генезис и напряженно-деформированное состояние месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2004. — № 3. — С. 45–51.
39. Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 109–114.
40. Cundall P. A. and Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 1979, Vol. 29. — P. 47–65.
41. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. акад. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова. — М.: Недра, 1975. — 279 с.
42. Potyondy D. O. and Cundell P. A. A bonded-particle model for rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, Vol. 41, No. 8. — P. 1329–1364.
43. Клишин С. В., Ревуженко А. Ф. Об одном классе вихревых течений сыпучей среды // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 11–18.
44. Стажевский С. Б. Генезис “неправильных” кольцевых структур Луны и Земли. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 86 с.

Поступила в редакцию 27/IV 2017