

Сравнительный анализ напряженного состояния пород вблизи и в разрезах сверхглубоких скважин СГ-3 и КТВ

С.Н. Савченко, А.А. Козырев

Горный институт КНЦ РАН, Анапиты

Аннотация. Методом граничных элементов исследовано напряженное состояние массива горных пород в разрезе германской континентальной сверхглубокой скважины (Kontinentales Teifbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland – КТВ). Выполнен сравнительный анализ напряженного состояния горных пород в окрестностях и в разрезах Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 и КТВ.

Abstract. The stress state of rocks in the area of the German continental deep hole drilling (Kontinentales Teifbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland – КТВ) has been studied by the boundary elements method. A comparative analysis of the stress-strain state of rocks of the Kola Superdeep Borehole (SG-3) and German Continental Deep Hole (КТВ) has been carried out.

1. Введение

Одной из задач сверхглубокого бурения в различных точках европейского континента является установление общих закономерностей процессов, происходящих в верхней части земной коры.

Анализ напряженного состояния массивов пород в районе бурения и в разрезе Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) по результатам математического моделирования в сравнении с натурными данными, полученными при бурении, в достаточной мере выполнен нами (Савченко, Козырев, 2002; Savchenko, Kozyrev, 2000). Математическое моделирование напряженного состояния пород в районе СГ-3 осуществлялось в трех взаимно ортогональных плоскостях: в плане и в двух вертикальных плоскостях, проходящих через скважину в направлениях действия наибольших и наименьших горизонтальных тектонических напряжений. При моделировании было учтено блочное и геологическое строение массива, а в качестве граничных условий приняты значения тектонических напряжений, полученные нами при ранее выполненных исследованиях (Савченко и др., 1994; Savchenko, Kozyrev, 2000).

В статье приводятся результаты аналогичных исследований напряженного состояния пород в районе бурения и в разрезе германской континентальной скважины (КТВ), а также проведенного сравнительного анализа данных, полученных по двум сверхглубоким скважинам, с целью установления общих закономерностей.

2. Постановка задачи

В качестве исходной информации, необходимой для расчетов при численном моделировании, были приняты приближенные физические и геометрические параметры блоков пород, на основе данных, имеющихся в литературе (The КТВ Deep Drill Hole, 2000; Geologische Karte..., 1991). В связи с этим результаты приводимых ниже исследований следует рассматривать в качестве предварительных. В районе КТВ, согласно нашим исследованиям по изучению напряженного состояния европейской части Евразийской литосферной плиты (Kozyrev, Savchenko, 2000) и данным натурных определений (Amadei, Stephansson, 1997), действуют горизонтальные тектонические напряжения $\sigma_1 = 0.75T$, $\sigma_2 = 1.28T$, где $T = -50$ МПа. Азимут действия наибольших сжимающих напряжений равен $310-335^\circ$.

На рис. 1 показана схема геологического строения участка 20×20 км в районе бурения КТВ (The КТВ Deep Drill Hole, 2000) и расчетной

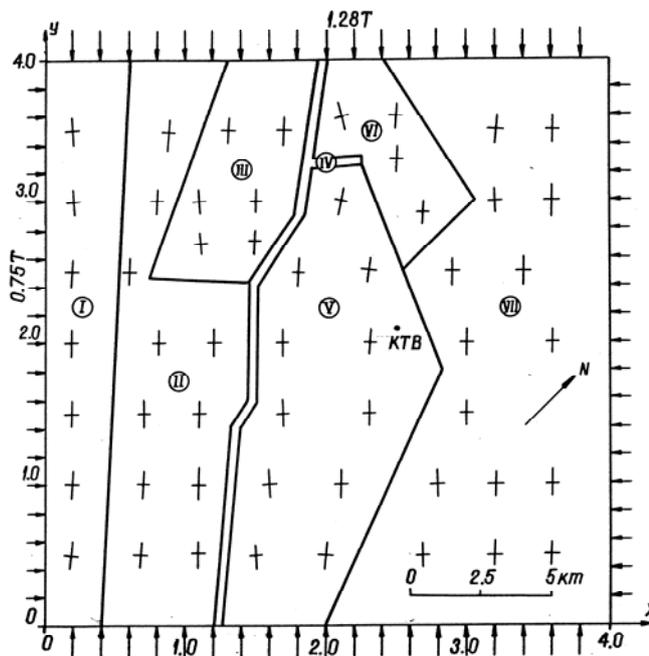


Рис. 1. Схема расчетной модели и граничные условия в районе бурения КТВ
+ – ориентация главных сжимающих напряжений

модели с граничными условиями плана этого участка. Модель представлена блочной средой с шестью крупными блоками, различающимися механическими характеристиками пород, и узким блоком, имитирующим Franconian Lineament. Ниже приведены механические характеристики пород блоков расчетной модели горизонтального сечения:

Номер блока	I	II	III	IV	V	VI	VII
Модуль Юнга 10^4 МПа	4.0	7.5	5.0	0.7	6.5	7.5	6.0
Коэффициент Пуассона	0.3	0.25	0.26	0.35	0.265	0.27	0.25

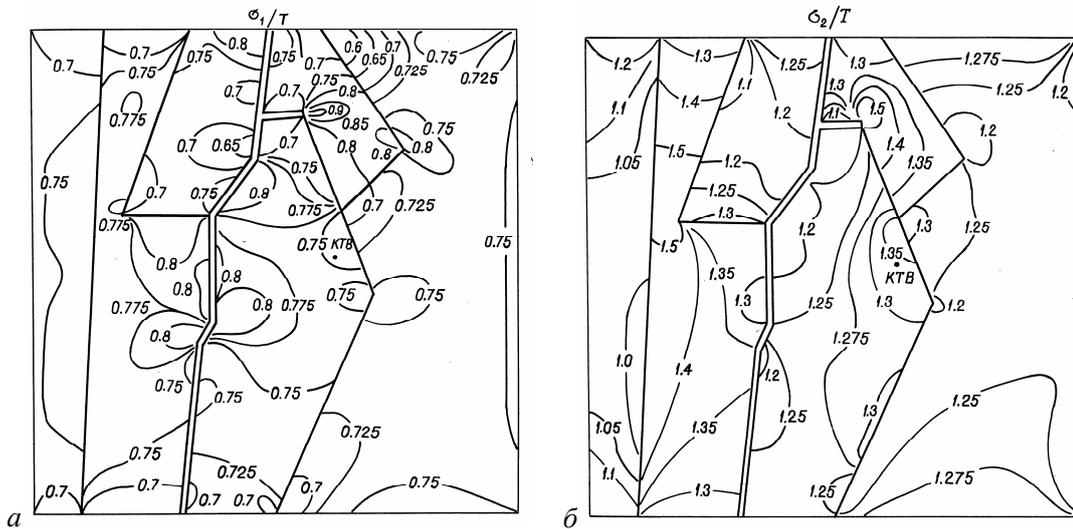


Рис. 2. Распределение главных напряжений в окрестности КТВ

3. Результаты исследования

На рис. 2а, б показаны изолинии главных напряжений σ_1/T и σ_2/T , а на рис. 1 – их ориентация. Из этих рисунков следует, что в рассматриваемой области значения горизонтальных напряжений σ_1 находятся в пределах от $0.7 T$ до $0.9 T$, в абсолютных величинах это составляет соответственно -35 МПа и -45 МПа в зависимости от механических свойств пород, блочного строения и взаимного расположения блоков. Диапазон изменения горизонтального напряжения $\sigma_2 = (1.0-1.5)T$, т.е. $\sigma_2 = (50-75)$ МПа. Ориентация максимального сжатия практически совпадает с направлением наибольших сжимающих напряжений на границе модели. В непосредственной близости к КТВ $\sigma_1 = 0.75T \cong -38$ МПа, $\sigma_2 = 1.33T \cong -67$ МПа.

Блок V, в котором располагается КТВ, в действительности представлен довольно сложной системой блоков меньшего порядка с различными механическими свойствами пород. Однако в силу отсутствия достаточной информации о механических свойствах пород, слагающих эти блоки, и их малых размеров, блок V рассматривается как однородный с осредненными значениями модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν .

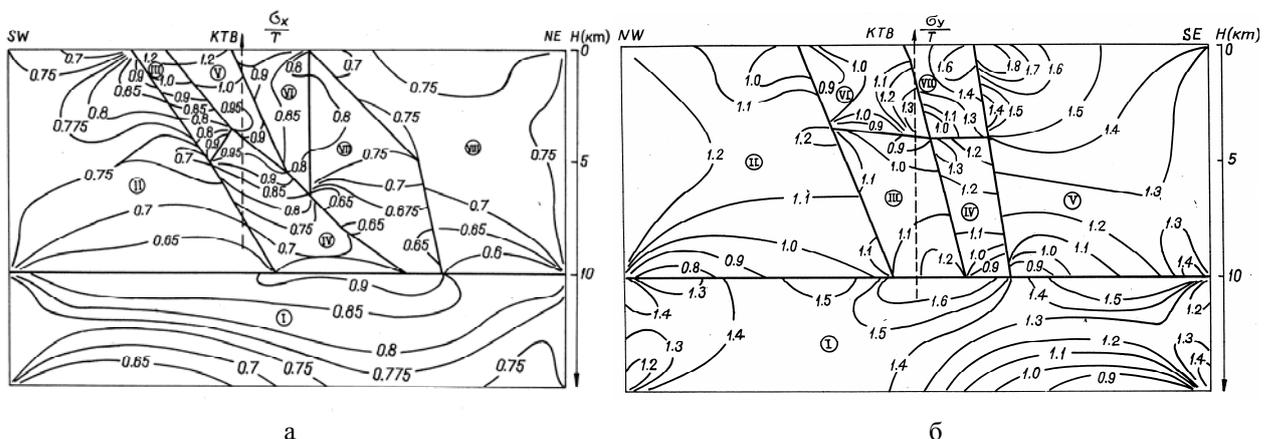


Рис. 3. Распределение тектонических напряжений в вертикальных сечениях по разрезу КТВ в направлениях SW-NE (а) и NW-SE (б)

На основе объемной модели геологических структур в районе бурения КТВ (*The KTB Deep Drill Hole*, 2000) была разработана расчетная модель вертикального сечения по разрезу КТВ в направлении действия меньшего по абсолютной величине сжимающего горизонтального напряжения (юго-запад – северо-восток, SW-NE), которое принято нами за направление оси ОХ. На рис. 3а показано распределение нормальных напряжений σ_x/T . При этом предполагалось, что на вертикальных границах модели действуют равномерно распределенные горизонтальные сжимающие напряжения, равные по величине $0.75 T$. Модель состоит из 8 блоков со следующими механическими характеристиками пород:

Номер блока	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Модуль Юнга 10^4 МПа	10.0	6.3	6.5	7.5	6.5	7.5	6.5	6.0
Коэффициент Пуассона	0.25	0.27	0.265	0.27	0.265	0.27	0.265	0.25

Как следует из приведенных данных, первый блок имеет наибольший по сравнению с другими блоками модуль Юнга, принятый равным 10^5 МПа, в связи с тем, что он характеризуется как "high velocity zone". Механические свойства остальных блоков взяты приближенно, на основе описания состава их пород, и по возможности более близкими к тем, которые рассматриваются в горизонтальном сечении.

Аналогичные данные по второму вертикальному сечению в направлении северо-запад – юго-восток (NW-SE) в разрезе КТВ, принятому нами за направление оси ОУ, приведены на рис. 3б. Его блочное строение было установлено нами по данным геологической карты (*Geologische Karte...*, 1991). Здесь на вертикальных границах модели задано действие равномерно распределенных горизонтальных сжимающих напряжений, равных $1.28T$. Модель представлена 7 блоками со следующими характеристиками:

Номер блока	I	II	III	IV	V	VI	VII
Модуль Юнга 10^4 МПа	10.0	6.0	7.5	6.5	6.0	6.5	7.5
Коэффициент Пуассона	0.25	0.25	0.27	0.265	0.25	0.265	0.27

Для анализа напряженного состояния пород в разрезе скважины был выполнен расчет максимальных и минимальных значений тангенциальных напряжений на контуре скважины в зависимости от глубины по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^{\max} &= 3(\sigma_y + \lambda_i \gamma_i z) - (\sigma_x + \lambda_i \gamma_i z) + \sigma_{\theta}^p; \\ \sigma_{\theta}^{\min} &= 3(\sigma_x + \lambda_i \gamma_i z) - (\sigma_y + \lambda_i \gamma_i z) + \sigma_{\theta}^p, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_x и σ_y – расчетные значения горизонтальных сжимающих напряжений с учетом их коэффициента концентрации (рис. 3); z – глубина от дневной поверхности; γ_i – объемный вес пород блоков, пересекаемых скважиной; $\lambda_i = \nu_i/(1-\nu_i)$ – боковой отпор в блоке; ν_i – коэффициент Пуассона породы; σ_{θ}^p – тангенциальные напряжения на контуре скважины, возникающие в результате действия веса бурового раствора; $\sigma_{\theta}^p = \gamma_p z$, γ_p – объемный вес бурового раствора, принятый таким же, как и для СГ-3 ($\gamma_p = 1.14 \text{ т/м}^3$) по всей глубине скважины.

Результаты расчетов максимальных и минимальных значений тангенциальных напряжений по формулам (1) без учета температурных напряжений показаны на рис. 4а. Необходимо отметить, что предел прочности пород на сжатие σ_c за неимением достоверной информации принят нами исходя из разностей пород, слагающих блоки вблизи КТВ, и средних значений показателя таких же пород, установленных в различных регионах России. Аналогичные данные по глубине СГ-3 приведены на рис. 4б, где механические характеристики пород хотя и осреднены, но приняты с меньшей долей неопределенности.

Проводя сравнительный анализ напряженного состояния пород в разрезах скважин СГ-3 и КТВ, можно выявить следующие общие закономерности:

1. Азимут действия наибольших сжимающих тектонических напряжений на поверхности вблизи СГ-3 равен 320° , а вблизи КТВ – $310-335^\circ$. Комментируя это положение, следует сказать, что такое совпадение может быть чисто случайным, хотя возможно предположить, что более глубокая причина этого совпадения кроется в общности происхождения тектонических напряжений.

2. В разрезе скважины СГ-3 при переходе из более жестких (с большим по величине модулем Юнга) пород в менее жесткие при малых углах падения слоев напряжения σ_x/T и σ_y/T уменьшаются тем в большей степени, чем больше разница упругих характеристик пород соседних слоев. Такая же закономерность наблюдается и для пород КТВ с малыми углами падения (переход от блока I к вышележащим блокам). При больших углах падения слоев эта закономерность проявляется в меньшей степени. Этот вывод не является неожиданным, так как при горизонтальной слоистости пород слои из более жестких материалов воспринимают на себя большую часть нагрузки, а менее жесткие (более податливые) "уходят" из-под нее, где бы эти слои не располагались.

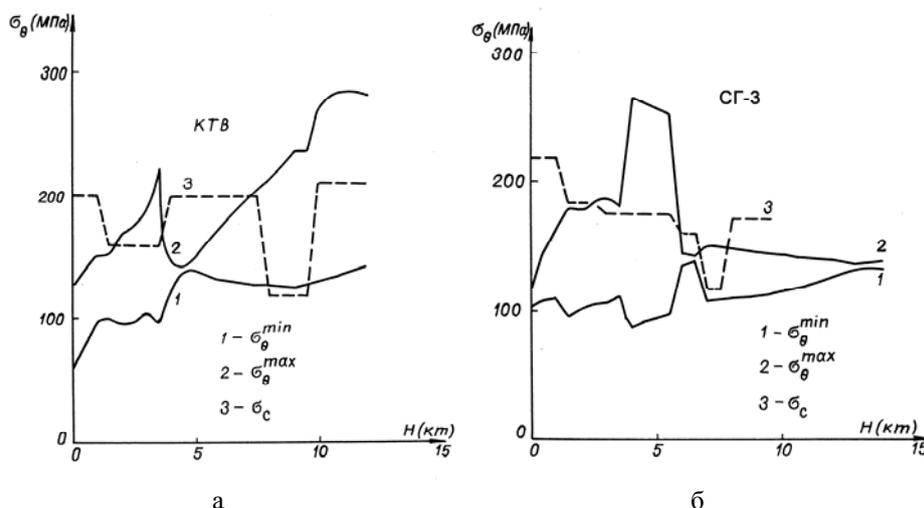


Рис. 4. Изменения минимальных и максимальных тангенциальных напряжений по контуру скважин КТВ (а) и СГ-3 (б) в зависимости от глубины (σ_c – предел прочности пород на одноосное сжатие)

3. Значения максимальных тангенциальных напряжений в породах СГ-3 в интервале 0-3500 м постепенно возрастают, на глубине 3500 м σ_{θ}^{\max} резко увеличиваются, а, начиная с глубины 5500 м, резко уменьшаются. Точно такой же характер изменения значений σ_{θ}^{\max} , только на несколько иных глубинах, наблюдается и для пород в разрезе КТВ: постепенное повышение σ_{θ}^{\max} на глубине от 0 до 2500 м, резкое их увеличение на глубине 2500-3500 м и резкое снижение в интервале 3500-4500 м.

4. Минимальные тангенциальные напряжения по контуру СГ-3 на глубинах от 0 до 3500 м в общем слабо повышаются, на глубине 3500-4000 м резко убывают, а в интервале 5500-6000 м резко возрастают. Такая же закономерность изменения σ_{θ}^{\min} с глубиной наблюдается и по контуру КТВ: в интервале 0-1000 м резкое увеличение, затем до глубины 3500 м незначительное изменение, на глубине 3500 м достаточно резкое уменьшение с последующим резким возрастанием на глубине 3500-4500 м.

Если предположить, что $\sigma_c < \sigma_{\theta}^{\max}$, то, исходя из полученных закономерностей, на глубинах, где происходит резкое увеличение значений σ_{θ}^{\max} , следует ожидать разрушения стенок скважины и образования эллипсовидной формы поперечного сечения. Для СГ-3 это положение подтверждается натурными данными в интервале 4000-5500 м. По всей видимости, разрушение стенок скважины КТВ в SW-NE направлении должно наблюдаться на глубинах 2500-4000 м. На участках, где σ_{θ}^{\max} по величине близко к σ_{θ}^{\min} и они превосходят σ_c , наиболее вероятно разрушение стенок скважины по всему контуру. Для СГ-3 такими участками являются глубины от 6000 до 6500 м, а для КТВ такая ситуация возможна на глубинах 4000-5000 м.

Для КТВ, судя по результатам расчетов, заметное разрушение стенок скважины должно начаться с глубины 8000 м, где σ_{θ}^{\max} превосходит 200 МПа, а σ_{θ}^{\min} составляет величину порядка 130 МПа. По всей видимости, это может быть одной из причин искривления ствола скважины, зафиксированного с глубины 7800 м. К сожалению, авторы не располагают данными по разрушению стенок скважины КТВ.

По данным, приведенным выше (см. рис. 3), на глубине 9000 м имеем $\sigma_x = 0.65 \cdot 50 = 32.5$ МПа и $\sigma_y = 1.2 \cdot 50 = 60$ МПа. Если учесть боковой отпор горных пород $\sigma_x = \sigma_y = \lambda \gamma_n$ МПа ($\lambda = 0.33$, $\gamma_n = 2.8$ т/м³), то получим $\sigma_x = 116.5$ МПа и $\sigma_y = 144$ МПа. Непосредственными измерениями, выполненными на КТВ (Amadei, Stephansson, 1997), зафиксирована величина наибольших сжимающих напряжений $\sigma = 147$ МПа.

4. Заключение

Таким образом, несмотря на некоторую неопределенность исходной информации, используемой при моделировании напряженного состояния пород вблизи КТВ, и более достоверную для СГ-3, удается установить общие закономерности, характерные для обоих регионов. Несомненно, что при более тщательном моделировании и учете особенностей пород, слагающих массивы, их блочного и геологического строения, физико-механических характеристик, можно получить более достоверные результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS проекта № 01-0314.

Литература

- Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement. London, Chapman and Hall, 1997.
Geologische Karte des KTB-Umfeldes Oberpfalz 1:50000. J. Sardua, R. Rurger, G. Eichenseer, G. Feik. Hannover, 1991.

- Kozyrev A.A., Savchenko S.N.** The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modeling. *Geocology and computers. Balkema, Rotterdam, Brookfield*, p.431-435, 2000.
- Savchenko S.N., Kozyrev A.A.** On the assessment of the rock mass stressed state in the Kola Superdeep Borehole (KSDB) vicinity. Project № 408. *In: The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep Borehole section down to a depth of 12261m. Apatity*, p.143-148, 2000.
- The KTB Deep Drill Hole. *Reprinted from the Journal of Geophysical Research. Published by American Geophysical Union. Florida Avenue. N. W. Washington*, 344 p., 2000.
- Савченко С.Н., Козырев А.А.** Исследование напряженного состояния массива горных пород вблизи Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). *Геоэкология*, № 2, с.163-174, 2002.
- Савченко С.Н., Козырев А.А., Мальцев В.А.** Напряженное состояние пород блочного строения различных масштабных уровней. *ФТПРПИ*, № 6, с.24-29, 1994.