

А.В. Ловчиков, Ф.Ф. Горбачевич

**О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ЗЕМНОЙ КОРЫ
ПО ВЕРТИКАЛИ***

Приведены данные о распределении тектонических напряжений в верхних слоях земной коры, полученные различными исследователями. Показано, что по данным измерений методом разгрузки в рудниках, полученным в разных странах и континентах, горизонтальные тектонические напряжения имеют наибольшую величину в верхних слоях и убывают с глубиной, сравниваясь с вертикальными напряжениями на глубине 1–2 км. На мировой карте тектонических напряжений их действие прослеживается, по крайней мере, до 15 км. Измерения методом разгрузки на этой карте считаются наименее представительными. Приведены данные о напряженном состоянии пород, полученные при бурении сверхглубоких скважин: Кольской СГ-3 и Германской КТВ.

Ключевые слова: тектонические напряжения, индикаторы напряжений, метод разгрузки, мировая карта тектонических напряжений.

Тектонические поля напряжений действуют в подавляющем большинстве массивов крепких, скальных изверженных пород. Учет направления и величины тектонических напряжений необходим при проектировании конструкций и комплексов подземных горных выработок, оснований гидротехнических сооружений, а также при проектировании глубоких карьеров. Между тем, вопрос о распределении тектонических напряжений, особенно по глубине, по-прежнему остается малоизученным.

В 80-х годах прошлого века Г.А. Марков, на основании результатов измерений напряжений методом разгрузки на Хибинских апатитовых рудниках, выполненных на глубине 100–600 м от поверхности, предположил, что наиболее высокие тектонические напряжения действуют вблизи поверхности и величина этих напряжений с глубиной должна снижаться [1]. На глубине напряженное состояние массивов имеет тенденцию перехода к всестороннему равномерному сжатию, то есть к гидростатическому напряженному состоянию. Ориентировочно такой переход, по мнению Г.А. Маркова, имеет место на глубине 1000–1500 м.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проект № 15–05–04323.

А.В. Леонтьев на основании обобщения и анализа данных измерений методом разгрузки на рудниках Северной Евразии установил, что превосходство горизонтальных тектонических напряжений над вертикальными с глубиной уменьшается, но не является резким [2]. В частности, на глубине около 1000 м горизонтальные напряжения в 1.5–2.0 раза превосходят вертикальные (рис. 1, а). По мировой статистике подобных измерений максимальные по величине тектонические напряжения наблюдаются вблизи поверхности, и переход к равенству горизонтальных и вертикальных напряжений происходит на глубине около 2.5 км [2]. Таким образом, факт максимальной величины тектонических напряжений вблизи поверхности (глубина 100-600 м) и их снижение относительно вертикальных напряжений можно считать установленным. Однако остается пока неясным, на какой глубине горизонтальные и вертикальные напряжения уравниваются, и наступает гидростатическое напряженное состояние массива.

Для установления закономерностей распределения напряжений по глубине необходимо учитывать свойства самих пород, то есть характер их деформирования под нагрузкой. Ф.Ф. Горбачевичем показано [3], что если учитывать нелинейный характер деформирования пород, переход к гидростатическому состоянию для разных пород наступает на разной глубине. Для некоторых типов пород, даже не учитывая трещиноватости и блочности массивов и изменения температуры с глубиной, такой переход возможен на глубине 19 км. Для более слабых пород такой переход наступает на меньших глубинах.

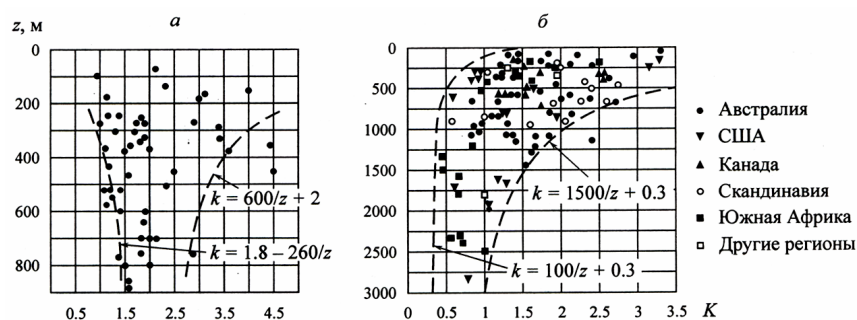
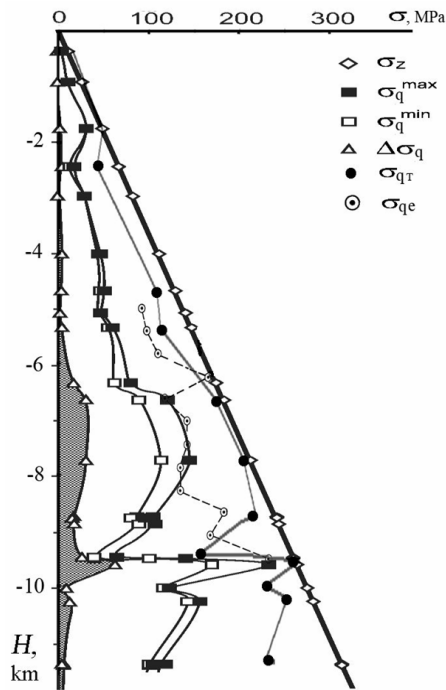


Рис. 1. Изменение отношения среднего горизонтального напряжения к вертикальному с глубиной: а – для Северной Евразии; б – мировая статистика [2]

Рис. 2. Зависимости вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений от глубины по разрезу Кольской сверхглубокой скважины: σ_z — вертикальная, σ_q^{\max} , σ_q^{\min} — горизонтальные составляющие поля напряжений, полученные расчетом; $\Delta\sigma_q = \sigma_q^{\max} - \sigma_q^{\min}$; σ_{qt} — горизонтальная составляющая поля напряжений с учетом действия тектонических сил, оцененных по методу нагружения образцов; σ_{qe} — горизонтальная составляющая поля напряжений с учетом действия тектонических сил, оцененных по методу насыщения образцов



В конце XX века создана мировая карта тектонических напряжений [4]. Основными индикаторами тектонических напряжений в работе [4] служат расшифровка механизмов очагов землетрясений (Focal Mechanism) (характерная глубина 5-15 км) и показатели разрушения стенок скважин (Breakout) (типичная глубина 3-4 км, в некоторых областях до 5-6 км). Наименее надежным индикатором напряжений в работе [4] считаются результаты измерений методом разгрузки (Overcoring), поскольку они выполняются из горных выработок. Из данных работы [4] следует, что, по крайней мере до глубины 15 км, горизонтальные тектонические напряжения действуют. В то же время результаты измерений напряжений в горных выработках, приведенные выше, согласно идеологии работы [4], считаются наименее надежными индикаторами таких напряжений. Основным недостатком этой карты, по нашему мнению, является отсутствие систематического описания закономерностей распределения тектонических напряжений по глубине.

В конце прошлого века некоторые дополнительные сведения по этому вопросу получены из данных бурения сверхглубоких скважин. Одно из значимых экспериментальных исследований выполнено на Кольской сверхглубокой скважине (СГ-3) [5]. Полученное распределение напряжений по глубине, в целом, харак-

терно для северной части Балтийского щита и Печенгского геоблока в частности. Ориентация максимальных сжимающих напряжений в Печенгском геоблоке преимущественно субмеридиональная. Зависимости вертикальной и горизонтальной компонент поля напряжений от глубины по разрезу СГ-3 представлены на рис. 2.

Анализируя сводные данные рис. 2, отметим, что с учетом тектонических напряжений, горизонтальные составляющие поля напряжений по разрезу Кольской сверхглубокой довольно близки к вертикальным. Определенные по методу насыщения образцов пород среднее отношение σ_{qe}/σ_z в пределах глубин 4.8–10.4 км составляет примерно 0.68. Полученные по методу нагружения образцов $\sigma_{qt}/\sigma_z \approx 0.78$ от поверхности до глубины 11.5 км. Таким образом, реально горизонтальная составляющая поля напряжений по разрезу СГ-3 составляет 0.7–0.8 от величины вертикальных, обусловленных весом вышележащих толщ. Резкие изменения величин σ_{qe} , σ_{qt} фиксируются в зоне контакта толщ протерозойского и архейского возрастов (6.4–6.9 км) и смены углов падения сланцеватости, пространственной ориентировки элементов упругой симметрии пород (9–9.7 км), рис. 2. Эти изменения, в общем, зарегистрированы как расчетными (σ_q^{\min} , σ_q^{\max} , $\Delta\sigma_q$), так и экспериментальными методами (σ_{qe} , σ_{qt}). Если проследить совместно изменения величины $\Delta\sigma_q$ и σ_{qe} , σ_{qt} можно заключить, что наряду с неоднородностями структуры разреза, упругая анизотропия пород заметно влияет на значения горизонтальной составляющей поля современных напряжений. Рост упругой анизотропии сопровождается синхронными изменениями σ_{qe} , σ_{qt} в диапазоне 6.4–8.8 км. Резкий скачок величин σ_{qe} , σ_{qt} в районе глубины 9.7 км, как показано в работе [5], также связан с высокой упругой анизотропией пород.

Преимущество вертикальных напряжений над горизонтальными выявлено также в результате натуральных экспериментальных измерений в рудниках, расположенных вблизи (на расстоянии 5–15 км) скважины СГ-3 [6]. Измерения проводились на рудниках «Котсельваара» и «Северный» на глубине 560–780 м от поверхности методами разгрузки, ультразвуковым и методом сейсмической томографии. В результате измерений установлено, что горизонтальные напряжения в массиве составляют 0.8–1.0 от вертикальных, что свидетельствует о преобладании гравитационного типа напряженного состояния массива [6].

На Германской сверхглубокой скважине (КТВ) часть определений напряженного состояния пород выполнена методом гидро-

разрыва [7]. В пределах глубин 3–6,8 км оценка горизонтальных напряжений производилась путем комбинированного анализа вывалообразования. Результаты, полученные методом гидроразрыва, показали, что отношение горизонтальной компоненты напряжений к вертикальной составляет 0,9–1,0 на глубине до 1 км. Ниже, на глубинах 3–9 км, это отношение равно 0,6–0,7. Оценка горизонтальных напряжений путем комбинированного анализа вывалообразования показала значительный разброс единичных значений. В целом же усредненные величины горизонтальных напряжений, полученные по этому методу, близки к вертикальным. Величина горизонтальной компоненты, измеренная на КТВ на глубине 9000 м, равна примерно 150 МПа [8].

Мировой опыт измерений зависимости величин горизонтальной компоненты поля напряжений от глубины показывает на наличие трех соотношений [4, 7, 9, 10]. Согласно первому из них усредненная горизонтальная компонента σ_{qc} меньше вертикальной σ_z . Их соотношение, в среднем, подчиняется выражению, определяемому гипотезой А.Н.Динника. Имеются результаты наблюдений, которые показали примерное равенство $\sigma_{qc} \approx \sigma_z$. Большое число экспериментальных результатов относится к случаю, когда горизонтальная компонента превосходит вертикальную как по величине, так и по градиенту роста с глубиной. Подобные данные получены в массивах Скандинавии [10]. Обычно такое превышение объясняется наличием региональных тектонических напряжений или эрозией значительного по мощности поверхностного слоя пород.

Обобщая приведенные данные можно прийти к заключению, что горизонтальные напряжения превышают вертикальные в пределах глубин до 1–1,5 км. По имеющимся данным и ориентировочным расчетам с учетом влияния рельефа и блочности Евразийской литосферной плиты среднее значение величины тектонических напряжений вблизи земной поверхности равно ~50 МПа. Направление действия этих сил субмеридиональное. С глубиной величина горизонтальной компоненты по сравнению с вертикальной становится меньше. По данным исследований, полученных на Кольской (СГ-3) и Германской (КТВ) сверхглубоких скважинах, на глубинах 3–9 км отношение горизонтальной составляющей поля напряжений к вертикальной составляет 0,6–0,8. Учитывая нелинейный характер деформирования пород, в породах разных типов возможен переход к квазигидростатическому состоянию на разных глубинах. Переслаивание пород разных типов создает сложную картину распределения горизонтальных напряжений по глубине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Г.А. О модели формирования избыточных горизонтальных напряжений в горных породах под влиянием восходящих движений земной коры // В кн.: Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Апатиты, Изд. КФАН СССР, 1981, с. 59–81.
2. Леонтьев А.В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 1, 2001, с. 31–40.
3. Горбачевич Ф.Ф. О переходе к гидростатическому распределению напряжений на больших глубинах // В кн.: Взаимосвязь геолого-тектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявлений избыточной напряженности. Апатиты, Изд. КФАН СССР, 1984, с. 147–152.
4. Global patterns of tectonic stress / Zoback Mary Lou, Zoback Mark D., Amadei Y. and eth. // Nature. – 1989. – V. 341, № 6240. – P. 291–298.
5. Горбачевич Ф.Ф., Савченко. С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований печенгского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины // Геофизический журнал, № 6, Т. 31, 2009. С. 42–54.
6. Ловчиков А.В., Удалов А.Е., Белявский Ю.Г. Напряженное состояние пород в верхних слоях земной коры по данным натурных измерений в рудниках вблизи скважины СГ-3 // Вестник МГТУ, том 10, № 2, 2007, С. 267–272.
7. Brudy M., Zoback M.D., Fuchs K., Rummel F., Baumgaertner J. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength // J. Geophys. Res. - 1997. – 102, №. B8. - P. 18453–18475.
8. Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement. Chapman and Hall. London, 1997. 490 p.
9. Herget G. Variation of rock stresses with depth at a Canadian iron mine // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1973. - 10. - P.37–51.
10. Hast N. The measurement of rock pressure in mines // Sver. Geol. undersokn. Ser. C. – 1958. - 560. - P.1–183. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ловчиков А.В. – доктор технических наук, главный научный сотрудник, vocson@goi.kolasc.net.ru, Горный институт Кольского научного центра РАН,
Горбачевич Ф.Ф. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Геологический институт Кольского научного центра РАН, gorich@geoksc.apatity.ru,

UDC 622.831

CONCERNING VERTICAL DISTRIBUTION OF TECTONIC STRESSES IN NEAR-SURFACE LAYERS OF THE EARTH'S CRUST

Lovchikov A.V., Chief Researcher, Dr.Sci. (Eng.), Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, vocson@goi.kolasc.net.ru,

Gorbatzevich F.F., Leading Researcher, Dr.Sci. (Eng.), Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, gorich@geoksc.apatity.ru.

The paper presents data on tectonic stresses distribution in upper layers of the Earth's crust obtained by different researchers. It is shown that according to the data measured by «doorstopper» stress-relief technique in mines of different countries and continents, horizontal tectonic stresses have the largest magnitude and in upper layers. They decrease with depth and are equal to vertical stresses on 1–2 km depth. The world map of tectonic stresses allows tracing their action up to 15 km at least. Measurements made by the stress-relief technique on the map are considered as the least representative ones. The paper presents data on stress state of rocks obtained when drilling such super-deep boreholes as the Kolskaya SG (super-deep) borehole-3 and Germanskaya KTV.

Key words: tectonic stresses, stress indicators, doorstopper stress-relief technique, world map of tectonic stresses, super-deep boreholes.

REFERENCES

1. Markov G.A. *O modeli formirovaniya izbytochnykh gorizontallykh naprjazhenij v gornykh porodah pod vlijaniem voshodjashchih dvizhenij zemnoj kory* (Model the formation of excess horizontal stress in the rocks under the influence of upward movements of the earth's crust) // V kn.: *Priroda i metodologija opredelenija tektonicheskikh naprjazhenij v verhnej chasti zemnoj kory*. Apatity, KFAN USSR, 1981, pp. 59–81.
2. Leontiev A.B. *Analiz estestvennykh naprjazhenij po rezul'tatam izmerenij v rudnikah na territorii Severnoj Evrazii* (Analysis of natural stresses according to the measurement results in mines on the territory of Northern Eurasia) // *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, No 1, 2001, pp. 31–40.
3. Gorbatzevich F.F. *O perehode k gidrostaticheskomu raspredeleniju naprjazhenij na bol'shix glubinah* (Transition to hydrostatic stress distribution at great depths) // V kn.: *Vzaimosvjaz' geologo-tektonicheskogo stroeniya, svojstv, strukturnykh osobennostej porod i projavlenij izbytochnoj naprjazhennosti*. Apatity, KFAN USSR, 1984, pp. 147–152.
4. *Global patterns of tectonic stress* (Global patterns of tectonic stress) / Zoback Mary Lou, Zoback Mark D., Amadei Y. and eth. // *Nature*. 1989. V. 341, No 6240. pp. 291–298.
5. Gorbatzevich F.F., Savchenko S.N. *Sovremennye naprjazhenija v severnoj chasti Baltijskogo shhita po dannym issledovanij pechengskogo geobloka i razreza Kol'skoj sverhglubokoj skvazhiny* (Modern stresses in the Northern part of the Baltic shield according to research Pechenga megablock and the section of the Kola superdeep borehole) // *Geofizicheskij zhurnal*, No 6, V. 31, 2009, pp. 42–54.
6. Lovchikov A. V., Udalov A.E., Belyavsky Yu.G., *Naprjazhennoe sostojanie porod v verhnih slojakh zemnoj kory po dannym naturnykh izmerenij v rudnikah vblizi skvazhiny SG-3* (Stress state of rocks in the upper layers of the earth's crust according to measurements in mines near the borehole SG-3) // *Vestnik MGTU*. V.10, No 2, 2007, pp. 267–272.
7. Brudy M., Zoback M.D., Fuchs K., Rummel F., Baumgaertner J. *Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength* (Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength) // *J. Geophys. Res.*, 1997. 102, No. B8. pp. 18453–18475.
8. Amadei B., Stephansson O. *Rock stress and its measurement* (Rock stress and its measurement). Chapman and Hall. London, 1997. 490 p.
9. Herget G. *Variation of rock stresses with depth at a Canadian iron mine* (Variation of rock stresses with depth at a Canadian iron mine) // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1973. 10. pp.37–51.
10. Hast N. *The measurement of rock pressure in mines* (The measurement of rock pressure in mines) // *Sver. Geol. undersokn. Ser. C.*, 1958. 560. pp.1–183.