

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА.

УДК 622.28, 622.831

С.А. Неверов

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С РОСТОМ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В настоящее время не представляется возможным правильный выбор параметров геотехнологий, расчет устойчивости конструктивных элементов систем разработки, эффективный прогноз характера и формы проявления горного давления при отсутствии данных о действующих в массивах пород естественных напряжений. В условиях постоянно возрастающей глубины предъявляются принципиально новые требования к выемке полезных ископаемых, которая не может считаться обоснованной, если не учтены параметры реального тензора напряжений¹.

Увеличение глубины разработки рудных месторождений неизбежно сопровождается изменением физико-механических свойств руд и пород, образованием зон высокого горного давления и ростом интенсивности его проявлений в статической и динамической форме. Многообразие геолого-структурных особенностей залегания, значительная сложность пространственной изменчивости рудных тел исключают возможность приведения их к единой закономерности изменения напряженного поля земли с глубиной. Как показыва-

ва пород.

В связи с этим, определение закономерностей напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород с изменением глубины разработок представляется весьма значимым направлением для прогнозной геомеханической оценки месторождений и обоснования новых вариантов геотехнологий. Необходимо отметить, что в настоящее время естественное напряженное состояние недр и анизотропность физико-механических свойств горных пород, остаются малоизученными факторами, особенно на больших глубинах. Роль экспериментальных данных до сих пор остается первостепенной, логическая обработка и обобщение которых представляют собой дальнейшее развитие способов и методов безопасной эксплуатации подземных рудников.

К настоящему времени накоплен достаточный практический материал о параметрах распределения напряжений в верхней части земной коры. Наиболее исследованными регионами России и ближнего зарубежья являются Кольский полуостров, Урал, Норильский рудный пояс, Алтае-

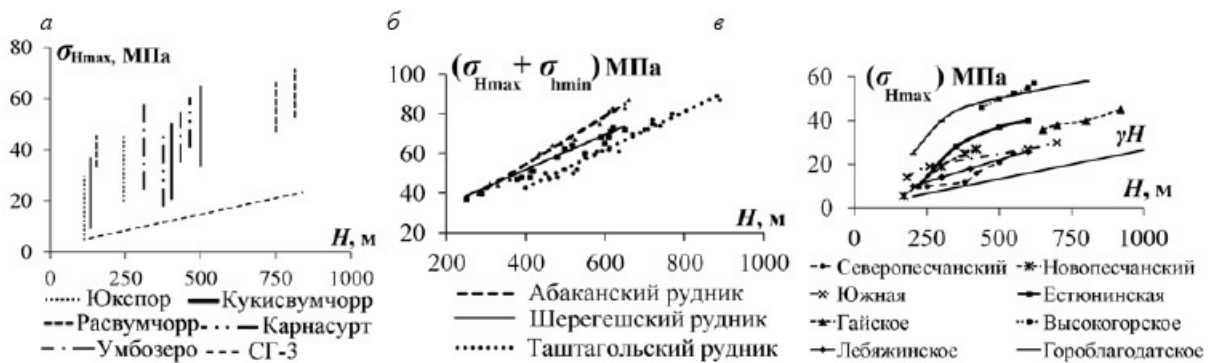


Рис. 1. Параметры естественного поля напряжений на рудниках: а — Кольского полуострова [Г.А. Марков, 1984]; б — Горной Шории и Хакасии [Б.В. Шрепп, 1996]; в — Урала [Н.П. Влох, 1994] (σ_v , σ_{Hmax} , σ_{Hmin} — вертикальные, максимальные и минимальные горизонтальные напряжения, МПа)

ет практика, даже в пределах одного или группы месторождений рудных районов наблюдается заметная разница в механическом поведении масси-

Саянская горно-складчатая область, Дальний Восток, Якутия, Казахстан, Средняя Азия и Украина (рис. 1).

Выполненными исследованиями установлен значительный разброс максимальных напряжений, действующих в массиве горных пород, значения которых изменяются от 20 до 60 и более МПа [1-

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.»

3]. Наибольшими по величине, как правило, являются горизонтально ориентированные силы, интенсивно проявляющиеся на глубинах до 400–700 м. Для тектонически напряженных массивов пород характерны повышенные значения гра-

участках, включая действующие рудники и шахты (Маунт-Айза, Маунт-Айда, Кобар, Калгурли и др.). Неоднородность исходного поля напряжений прослеживается практически на всей территории. Имеется ряд зон, где горизонтальные напряжения

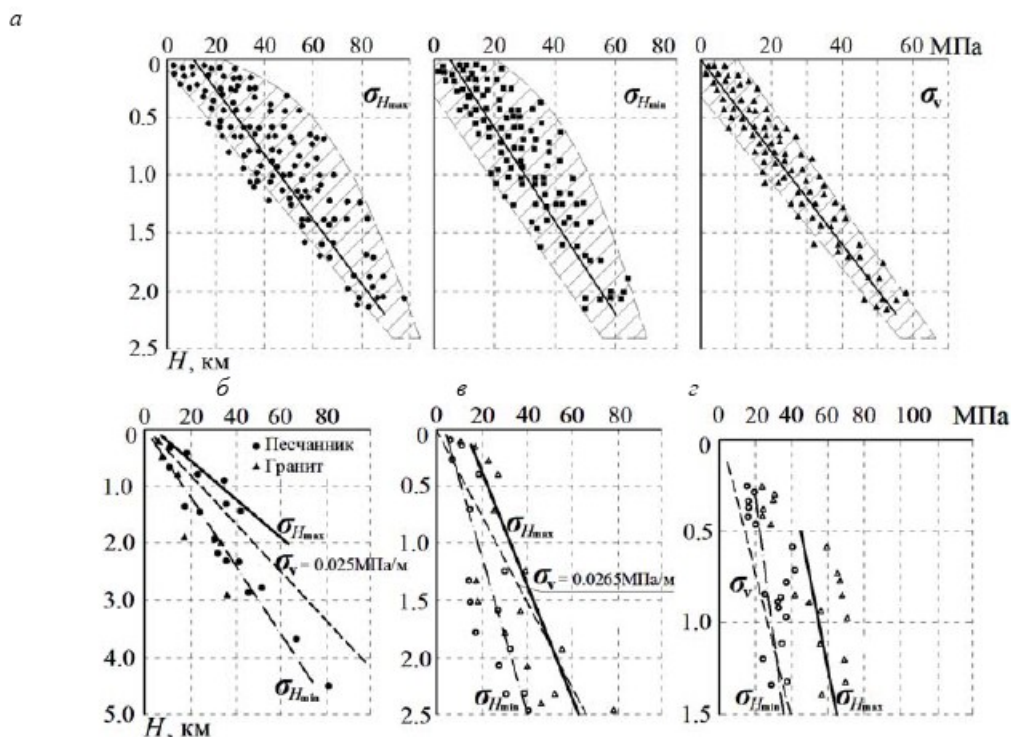


Рис. 2. Изменение природного поля Земли с глубиной в условиях преобладания максимальных горизонтальных напряжений: а — Канадский щит [В. Arjang, 2001]; б — США [М. Zoback, 2000]; в — ЮАР [В. Brown, 2004]; г — Япония [Т. Kanagawa, 1986]

диента скорости современных поднятий геологических блоков, значительная сейсмическая активность и аномальные проявления горного давления в подземных выработках и даже скважинах. Сложный характер исходного напряженного состояния разрабатываемых рудных залежей обусловлен, прежде всего, расположением месторождений в различных геолого-тектонических структурах.

Определенный интерес вызывает оценка НДС горных пород на зарубежных рудниках. Значительный объем натурных измерений естественного поля напряжений выполнен в Северной Америке, Австралии, Скандинавии, странах Западной Европы, Японии и Южной Африке (рис. 2).

Наиболее изученными районами Северной Америки являются Калифорния, горная складчатость Аппалачи, Кордильеры и рудные провинции в пределах Канадского щита (рис. 2а, б). На основе выполненных исследований установлено преобладание тектонических напряжений, превышающих вес столба покрывающих пород в 1.2–3.0 раза [4–6]. Также имеются участки с геостатическим и гравитационным распределением сил.

Измерения напряжений на Австралийском континенте были выполнены более чем на 330

меньше или равны вертикальным. В областях действия развитой тектоники величины горизонтальных напряжений достигает 40 и более МПа [7].

На рудных месторождениях Скандинавии, как и в других регионах, практически повсеместно преобладают горизонтальные напряжения, превышающие вертикальные в 1.2–3.0 раза. Это обусловлено расположением их в пределах относительно стабильной тектонической структуры [8]. Исключением являются рудники Норвегии (Муфьелетт, Редсанн и Леккен), расположенные в границах Каледонского горного хребта, для которых характерна явно выраженная гравитация [9]. На большей части выделенной территории зависимость горизонтальных напряжений от глубины описывается связью вида [8]:

$$\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin} = \alpha + H(0.099 + 0.003),$$

МПа (где $\alpha = 19.1 \pm 0.1$).

В Центральной Европе измерениям подверглись Альпийская складчатая область и Рейнский грабен. В пределах Альп было выполнено более 680 замеров напряженного состояния массивов пород различными методами скважинного бурения [6]. На основе экспериментальных данных, установлено преобладание двух полей напряже-

ний. В пределах Западноевропейской платформы напряженное состояние массива пород оценивается как гравитационно-тектоническое, где горизонтальные напряжения изменяются от 0.5 до 1.5 γH [10]. Альпийская горная складчатость относится к мобильным областям. Здесь величины горизонтальных напряжений до 3-х раз превышают вертикальные, достигая максимума в центральных районах гор [10].

Одними из глубоких рудников мира являются предприятия Южной Африки, которые представляют собой уникальный плацдарм для натуральных исследований физических свойств горных пород и их НДС [11]. Глубина горных работ в ЮАР превысила отметку 4000 м (рудник Тау-Тона). Особенностью региона является увеличение до глубины 1000 м соотношения средних горизонтальных напряжений к вертикальным до 2.0 γH (рис. 2в). С дальнейшим ростом глубины величина этого соотношения постепенно уменьшается до (1.0 + 0.7) γH со стабилизацией на уровне 0.75 [10]. Это обусловлено тем, что Африканский континент состоит из устойчивых кратонов и расположенных между ними, подвижных складчатых зон. В результате «раздвига» Индийского и Атлантического океанов этот материк не испытал значительных тектонических подвижек и соответ-

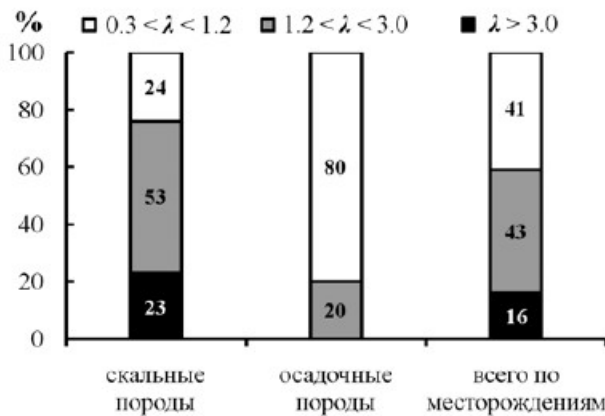


Рис. 3. Структура напряженности массивов горных пород

ственно бокового давления со стороны других континентов.

По результатам измерений в Японии [12] величины тектонических сил, как правило, превышают вертикальные напряжения и находятся в диапазоне 1.0 – 1.5 γH достигая в некоторых случаях 2.0 γH и более (рис. 2в). Такое соотношение напряжений обусловлено, главным образом, движением блоков под Филиппинским морем и Тихим океаном в сторону Азиатской плиты.

Анализируя изменения параметров исходного напряженного состояния верхней части земной коры с ростом глубины залегания пород можно отметить следующее.

Основной особенностью естественного со-

стояния массива горных пород является его масштабная неоднородность, как по площади, так и глубине, определяемая различными условиями проявления структурно-тектонических и магматических процессов в геологической истории происхождения отдельных месторождений и рудных провинций, для которых характерен определенный режим нагружения.

На основе обобщения комплексных данных, следует, что преобладающими в добывающих регионах мира являются тектонически напряженные массивы. В общей структуре обрабатываемых месторождений их доля для скальных пород составляет 76 %, для осадочных пород – 20 % (рис. 3). Вместе с тем, эти напряжения неодинаковы для различных рудных районов и резко меняются в пределах месторождения, шахтного поля и даже отдельных геологических блоков. Весьма сложное и неоднородное напряженное состояние приходится на 16 % всех обрабатываемых рудных залежей. Ориентировка оси максимального сжатия, как правило, оказывается перпендикулярной направлению основных геологических структур независимо от морфологии рудных тел и их простира-ния.

Результаты измерений на действующих предприятиях горнодобывающей отрасли с учетом

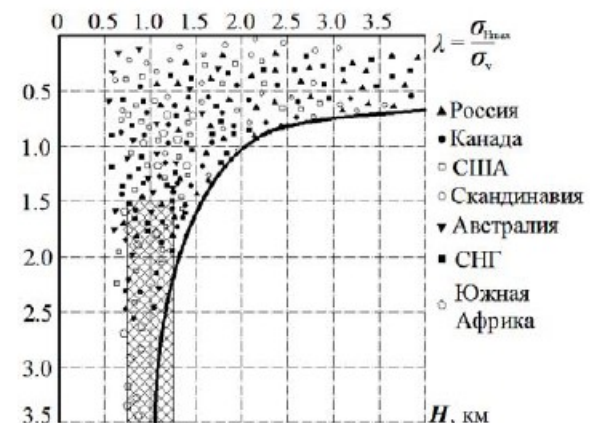


Рис. 4. Изменение с глубиной соотношения тектонических (максимальных горизонтальных σ_{Hmax}) и вертикальных (σ_v) напряжений на месторождениях мира

данных геодинамического районирования, свидетельствуют о нелинейном характере изменения максимальных горизонтальных напряжений с глубиной, величина которых неуклонно стремится к равновесному состоянию, близкому к γH (рис. 4, 5).

Увеличение глубины в общем случае характеризуется возрастанием тектонических напряжений в абсолютном значении и снижением их соотношения с вертикальными в относительном выражении не зависимо от места и условий залегания полезных ископаемых (см. рис. 5). На глубинах до 700 м коэффициент концентрации бокового давления (λ) изменяется в широком диапазоне от 0.5 до 5.0 и достигает своего максимума в интервале

глубин 400 – 600 м. На более глубоких горизонтах (> 1500 м) λ находится на уровне 0.7 + 1.2 (см. рис. 4, 5). Это положение подтверждается натурными данными по Кольской и Немецкой сверхглубоким скважинам [13-14]. Вместе с тем, на ряде рудников России, ЮАР, США, Австралии и Западной Европы линейный характер изменения абсолютных горизонтальных напряжений сохраняется.

Одной из важных проблем больших глубин

является изменчивость исходного поля напряжений различных типов тектонических структур, включая молодые подвижные платформы, грабены, каледониды, щарьяжи, островные дуги и рифтовые зоны. Причем основная роль здесь отводится тектоническим явлениям регионального масштаба, формирующим геомеханическую обстановку отдельно взятого месторождения. Механическое состояние массивов пород также неразрывно связано с поведением тектонических структур более

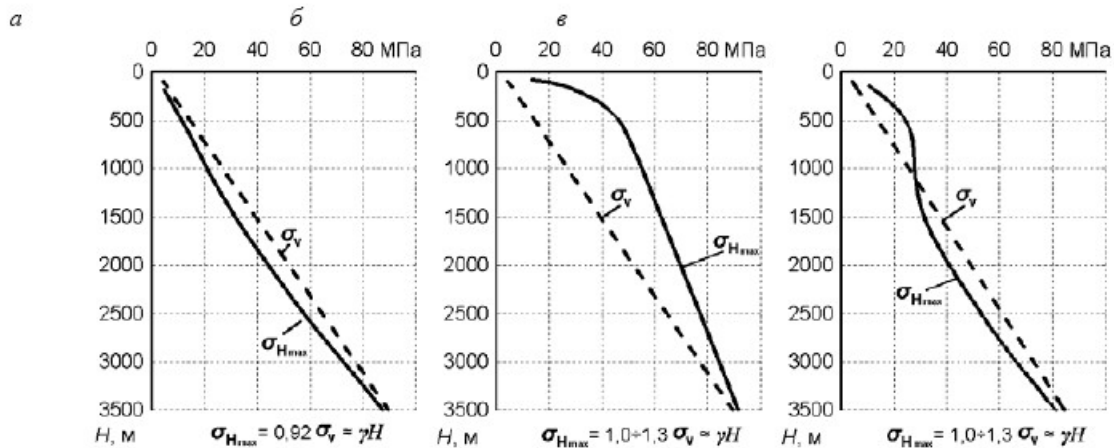


Рис. 5. Закономерности изменения максимальных горизонтальных напряжений, характерные для различных типов тектонических структур: а – молодые платформы, грабены, материковые окраины; б – устойчивые фундаменты и стабильные щиты, геосинклинальные складчатые пояса; в – подвижные щиты и платформы (пример ЮАР)

является развитие модельных представлений массивов горных пород в рамках структурно-геологического строения, которые наряду с описательным характером, должны включать количественные и аналитические оценки. Под моделью массива пород понимается физико-механическая система, представляющая собой участки верхней части земной коры или совокупность тектонических структур, которым свойственны в координатах пространства определенные закономерности изменения НДС.

Многофакторное влияние различных явлений природы, геологических и тектонических процессов, протекающих в недрах, определяют поиск универсального подхода к оценке НДС залежей полезных ископаемых, в большей степени пригодной для решения прикладных задач горного производства. Это обстоятельство обуславливает необходимость разработки геомеханической типизации рудных месторождений с учетом глубины их залегания для дифференцированного подхода к обоснованию параметров горных работ.

Большинство месторождений мира располагаются в зонах действия активных тектонических и сейсмических процессов, вызванных особенностями регионов, подчиненных определенным тектоническим режимам. Для них характерны существенные структурно-геологические и петрографические неоднородности. Сложный характер нагруженности горных пород создает достаточ-

крупных порядков. Поэтому их учет на разных масштабных уровнях является весьма важным условием при геомеханической оценке рудных залежей.

Тектоническое поле напряжений, как видно из выше представленных графиков, неоднородно по сравнению с гравитационным. Его параметры могут значительно изменяться как в пространстве, так и во времени. По общему мнению ученых, возникновение повышенных горизонтальных напряжений объясняется современными тектоническими процессами, протекающими в недрах. Это связано с геологическим строением массивов пород, поднятием и опусканием отдельных структурных блоков, горизонтальными и вертикальными перемещениями литосферных плит и тангенциальным сжатием земной коры. В поднятиях структурных блоков горных пород принимают участие не только вертикальные, но и горизонтальные движения плит. В зонах медленных опусканий земной поверхности наблюдается геостатическое напряженное состояние, где соотношение горизонтальной к вертикальной составляющей напряжений стремится к единице и меньше. Такие представления прослеживаются как закономерные связи для детально изученных территорий и регионов, подобных по происхождению и тектоногенезу.

Накопленный отечественный и зарубежный опыт работы горных предприятий свидетельствует

об общности тензора напряжений для месторождений в различных частях Земного Шара, имеющих подобные структурно-геологические условия и глубину разработки. Интересно отметить, что однотипные тектонические структуры оказываются в условиях, весьма близких по напряженному состоянию. Например, для массивов горных пород с пологим залеганием залежей, в которых отсутствуют явно выраженные следы тектонической деятельности, наиболее вероятно ожидать преобладание максимальных по величине вертикально ориентированных напряжений и, наоборот, в условиях складчатых систем и преобладания развитой тектоники – максимальных горизонтальных напряжений.

Таким образом, в основу геомеханической типизации рудных месторождений в качестве критерия признака наиболее рационально поло-

жить литологические и структурно-тектонические особенности массивов горных пород. Такой подход позволит по выделенному тектонотипу месторождения и структурным особенностям массивов пород установить обобщенную закономерность изменения исходного поля напряжений с ростом глубины. В этом случае влияние величины напряжений на формы и характер проявления горного давления при выемке руд на равных глубинах будет подобным для месторождений определенного структурного типа. Систематизация рудных залежей и разработка моделей геосреды по виду напряженного состояния послужат универсальной методологической основой для обоснования принципов безопасной и эффективной добычи полезных ископаемых в условиях постоянного понижения подземных горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронников Д.Н. Разработка руд на больших глубинах / Д.Н. Бронников, Н.Ф. Замесов, Г.И. Богданов / М.: Недра, 1982.
2. Марков Г.А. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа / Г.А. Марков, С.Н. Савченко / Л., Наука. – 1984.
3. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. – М.: Недра. 1994.
4. Tectonic stresses in the Alpine-Wediterranean region / Rock Mechanics. 1980. – № 9.
5. Arjang B. Database on Canadian in situ ground stresses. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories / Division Report MMSL. – 2001.
6. Zoback M.L. Global patterns of tectonic stress nature / M.L. Zoback, M.D. Zoback, J. Adams / Nature. – 1989.
7. Worotnicki G., Denham D. The state of stress in the upper part of the earth's crust in Australia according to measurements in tunnels and mines and from seismic observations. Investigation of stress in rock-Advances in stress measurement / Sydney. – 1976.
8. Hast N. The state of stress in the upper part of the Earth's crust determined by measurements of absolute rock stress // Naturwissenschaften. – 1974. – № 11.
9. Bjorn L.J. Natural stress values obtained in different parts of the Fennoscandian rock masses. – Proc. 2n Congr. Int. Soc. Rock Mech. Beograd. – 1970.
10. Fuchs. K. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications / K. Fuchs, B. Muller / Naturwissenschaften, 2001. – с. 357–371
11. Gey N.C. The state of stress in large dyke on K.R.P.M. Buksburg, South Africa. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1980. – vol. 2.
12. Kanagawa T., Hibino S., Ishida I., Hayashi M., Kitahara Y. In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands // Over-coring Results from a Multielement Gauge Used at 23 Sites. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Great Britain. – 1986. – V. 23. № 1.
13. Савченко С.Н. Оценка напряженного состояния горных пород в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины // ФТПРПИ. — 2004. — № 1.
14. Seismol J. Deformation and Stress regimes in the forearc of the Hellenic 87 subduction zone from inversion of focal mechanisms Reference: Bohnhoff et al., — 2005.

□ Авторы статьи:

Неверов
Сергей Алексеевич,
к.т.н., старший научный сотрудник
(Институт горного дела Сибирского
отделения РАН).
Email: nsa_nsk@mail.ru