

УДК 551.24.03 : 622.83 (470.5)

Черныш О.Г.

## ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ И УДАРООПАСНОСТЬ НА ШАХТАХ СУБРА

*В связи с напряженной геодинамической обстановкой на ряде шахт Североуральского бокситоносного района (СУБРА), выраженной частыми горными ударами в зонах тектонических нарушений, в горных выработках и естественных обнажениях были проведены структурно-тектонифизические исследования. Для разных деформационных элементов горного массива были реконструированы параметры действовавших тектонических полей напряжений по методике кинематического анализа трещинно-разрывных структур, разработанной О.И.Гуценко (Институт физики Земли (ИФЗ) РАН) и усовершенствованной В.А.Корчмагиным (Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ)). В соответствии с этой методикой, в качестве основных параметров тектонических движений используются ориентировка векторов сдвиговых смещений и ориентация в пространстве самих сместителей сколовых трещин. Это позволяет использовать для реконструкции параметров полей напряжений всю совокупность разрывов и ослабленных поверхностей, по которым происходили движения. В результате было установлено, что в горном массиве действуют сжимающие напряжения, которые по величине существенно превышают теоретические значения, вычисленные для соответствующей глубины без учета тектонических сил. Максимальные сжимающие напряжения ориентированы в субширотном направлении, перпендикулярно простиранию уральских структур. Минимальное сжатие фиксировалось по простиранию последних.*

Опасные динамические явления в шахтах и рудниках – горные удары, выбросы угля (горной породы) и газа известны на протяжении более 200 лет для многих горнопромышленных районов мира. Они часто приводят к значительным материальным убыткам и человеческим жертвам, существенно усложняют ведение горных работ. Причиной их являются напряжения, действующие в горном массиве. Наиболее отчетливо это проявляется при горных ударах, представляющих собой хрупкое разрушение предельно напряженной части массива пород в зоне влияния горных выработок. Прочностные свойства горных пород, подверженных горным ударам, – углей (камен-

ных и бурых), солей, бокситов, а также разных вмещающих пород (как осадочных, так и кристаллических) – колеблются в очень широких пределах.

Непосредственные измерения напряжений в горных выработках во многих регионах показывают, что напряженное состояние массива отличается от нормального изостатического. Горизонтальные напряжения сжатия во многих местах значительно (в 2-3 раза) превышают величину расчетных боковых напряжений. Определения пространственной ориентировки главных осей эллипсоида напряжений для многих участков консолидированной коры также указывают на их отклонение от верти-

кального и горизонтального положения на угол до  $30^\circ$ , причем максимальное главное нормальное напряжение чаще всего ориентировано ближе к горизонтали, чем к вертикали. Все это свидетельствует о том, что в земной коре преобладают напряжения, вызванные тектоническими силами, и напряженное состояние горного массива в общем случае является результатом суммирования нормальных изостатических и тектонических напряжений.

Механизм динамических явлений в этом случае можно представить в следующем виде. Дополнительные тектонические напряжения увеличивают прочность горных пород, вследствие чего последние могут накапливать дополнительную потенциальную энергию без разрушения. В результате в массиве образуются участки повышенных напряжений. При нарушении в ходе горных работ установившегося равновесного состояния на подобных участках может происходить взрывообразное высвобождение накопившейся энергии. В результате происходит разрушение горных пород, а накопившаяся энергия высвобождается в виде сейсмических волн.

В определенной области вокруг уже существующих дизъюнктивов в поле тектонических напряжений существуют и зафиксированы инструментальными методами повышенные касательные напряжения. Конфигурация этих зон и их размеры зависят от типа разрывов, их пространственной ориентировки и положения относительно траекторий осей главных нормальных напряжений. При наложении на эти области зон опорного давления от горных выработок в них велика вероятность мгновенного разрушения части горного массива. Поэтому часто отмечается приуроченность выбросов и горных ударов к зонам тектонических нарушений.

С учетом изложенного выше, разработка методов прогноза и борьбы с динамическими явлениями невозможна без изучения тектонических полей напряжений.

Действовавшие и действующие в массиве поля напряжений могут изучаться разными инструментальными и структурными методами. Одни из них позволяют определять параметры полного тензора напряжений, другие –

лишь отдельные из этих параметров. Соответственно, инструментальные методы обычно характеризуют суммарные поля напряжений, действующие в горном массиве на момент их определения. Структурные же способы основаны на взаимосвязи величин главных напряжений с микро- и макродеформационными структурами (направлениями деформирования минеральных индивидов, трещинами, зеркалами скольжения, складками и т.п.), т.е. они реконструируют поля напряжений, уже реализованные в разных деформациях. При этом инструментальные определения характеризуют поля напряжений самого низкого структурного уровня, действующие в локальных объемах массива. Структурные методы позволяют реконструировать тектонические поля напряжений разного уровня.

Существует несколько структурных методик, позволяющих реконструировать параметры действовавших в горном массиве тектонических полей напряжений по разным деформационным элементам горного массива. Наиболее простой и универсальной, на наш взгляд, является методика кинематического анализа трещинно-разрывных структур, разработанная О.И.Гущенко, и усовершенствованная В.А.Корчемагиным [3, 4, 6]. В соответствии с этой методикой, в качестве основных параметров тектонических движений используются: направление векторов сдвиговых смещений и ориентировка в пространстве самих сместителей сколовых трещин. Это позволяет использовать для реконструкции параметров полей напряжений всю совокупность разрывов и ослабленных поверхностей, по которым происходили подвижки при тектонических процессах. Основными параметрами восстановленных тектонических полей напряжений при этом являются: пространственная ориентировка осей главных нормальных напряжений ( $\sigma_1$  – максимальных растягивающих,  $\sigma_3$  – максимальных сжимающих и  $\sigma_2$  – промежуточных), а также коэффициент  $\mu_\sigma$ , отражающий вид напряженного состояния массива, при котором происходили тектонические деформации. Абсолютные значения напряжений с использованием этой методики не определяются.

Коэффициент  $\mu_\sigma$  может меняться от +1 (при одноосном сжатии) до -1 (при одноосном растяжении).

Процесс решения задачи и нахождения пространственной ориентации осей главных нормальных напряжений ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ), а также соотношений величин девиаторной части тензора (коэффициента  $\mu_\sigma$ ) может осуществляться аналитически или с помощью простых графических построений на сетке стереографических проекций. При этом реконструкции производятся на трех структурных уровнях:

- локальном (в пределах отдельного обнажения, горной выработки);
- мезорегиональном (шахтное поле, группа шахт);
- региональном (регион в целом).

Изучение тектонических напряжений и прогноз динамической активности актуальны для шахт СУБРа. За последние годы здесь было зарегистрировано более 7000 сейсмических явлений. По пространственному расположению они охватывают как рудную залежь, так и покровные и подстилающие породы. Некоторые из этих явлений достигают значительной силы. Горный удар, происшедший в зоне тектонического нарушения «3-й Северный сброс» на абсолютной отметке -333 м, сопровождался сотрясением горного массива, зданий и сооружений на поверхности в радиусе 18 км. Он был зафиксирован сейсмостанциями, расположенными на расстоянии несколько сотен километров (например, станцией «Свердловск», удаленной на 375 км) и классифицирован как землетрясение с магнитудой 4,3.

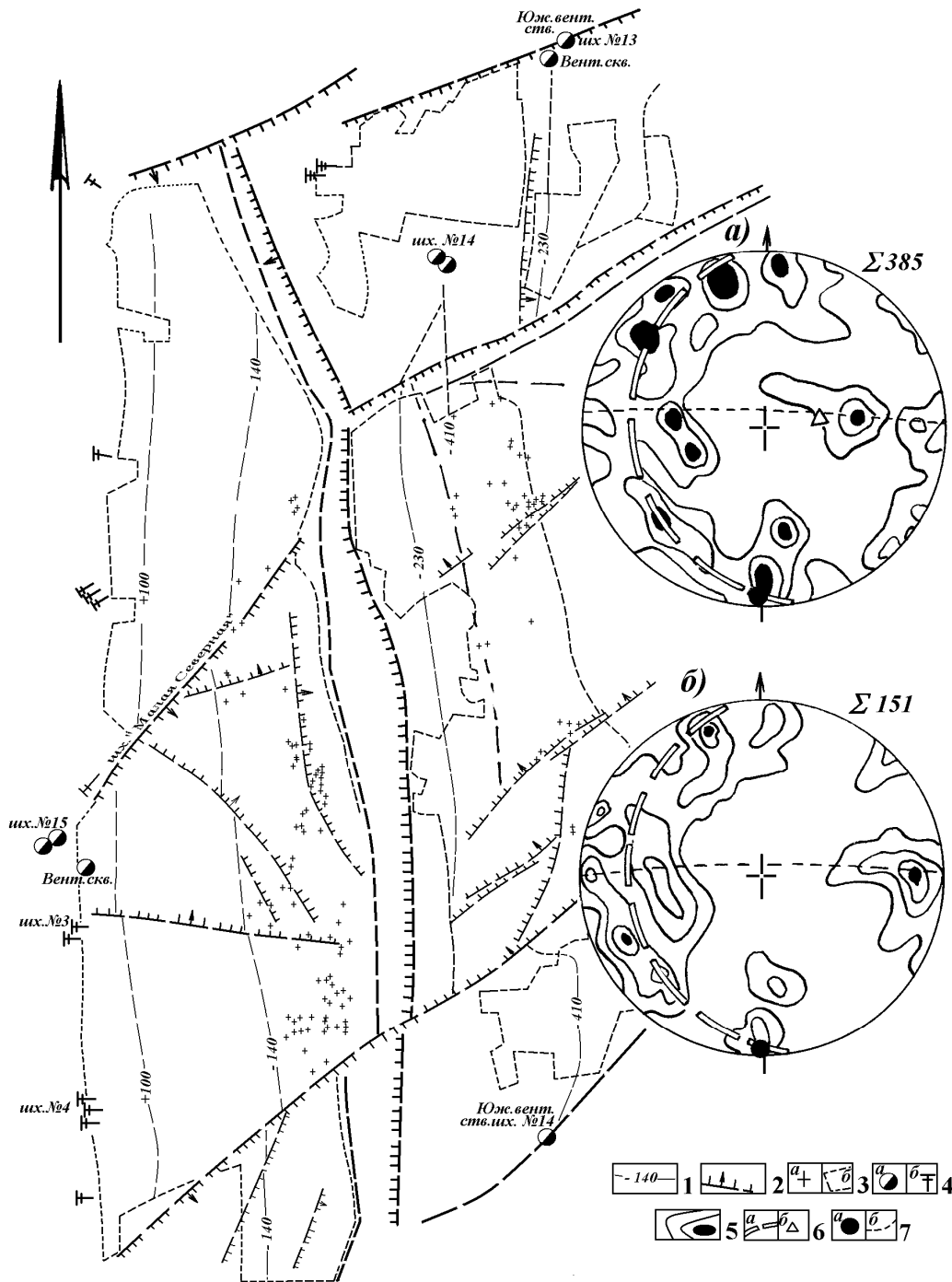
Данные, приведенные в настоящей работе, были получены в ходе структурно-тектонических исследований, проводившихся в горных выработках шахт №13, №14, №15 СУБРа, а также в естественных обнажениях по берегам рек Вагран и Калья.

В геологическом строении полей шахт №13, №14, №15, в горных выработках которых был выполнен основной объем тектонических исследований, принимают участие образования верхнего силура и девона [5]. Силурийские отложения представлены андезитобазальтовыми порфиритами (покровская свита), которые выше по разрезу перекрываются

массивными и слоистыми известняками (воскресенская и колонгинская свиты), а также вулканогенно-осадочными и осадочными породами сосьвинской свиты. Субровский рудный горизонт, мощностью до 20 м, залегает на размытой неровной поверхности петропавловской свиты ( $S_2^2-D_1$ ), и перекрыт известняками вагранской свиты (эйфель,  $D_1^2$ ). Мощность известняковых горизонтов весьма изменчива, нередко их замещения гравелитами, песчаниками, глинистыми и туфогенными сланцами. В структурном плане поля шахт размещены на западном крыле крупной синклинали меридионального простирания. Залегание рудного горизонта довольно выдержанное, средние значения элементов залегания тел горных пород: азимут падения 80-90°, угол падения 20-30°. Шахтные поля находятся в лежащем крыле крупного надвига север-северо-восточного простирания (азимут простирания 5-20°), сместитель которого падает на восток под углом 40-50°. На дневной поверхности сместитель этого надвига закартирован восточнее полей шахт. По простиранию с юга на север он постепенно удаляется от выходов рудного горизонта на расстояние до 2-3 км.

К структурам более мелкого ранга относятся крупные разрывы, служащие техническими границами шахтных полей. Среди них преобладают относительно крутопадающие разрывы северо-восточного простирания, в кинематическом плане представляющие собой левые сбросо-сдвиги.

Горизонтальная амплитуда смещения по наиболее крупным из них достигает 750 м при вертикальной составляющей разобщения одноименных стратиграфических горизонтов до 500 м. Подобные разрывы ограничивают шахтные поля по простиранию и, по видимому, являются наиболее молодыми, нередко смещая разрывы других ориентировок. Продольные (по отношению к простиранию тел горных пород) разрывы ограничивают шахтные поля по падению. Так поля шахт №14 и №15 разобщены субмеридиональным разрывом с азимутом падения 250-260° и углом падения 50°. Стратиграфическая амплитуда смещения рудного горизонта по этому нарушению достигает 300-500 м (рис. 1).



**Рис. 1.** Схематический план горных работ шахт №14, №15 и ориентировка тектонических сколов для района (а) и для поля шахты №15 (б).

1 – изогипсы почвы рудного горизонта; 2 – тектонические разрывы; 3 – контур горных работ (б) и места горных ударов (а); 4 – шахтные стволы: вертикальные (а), наклонные (б).

На стереограммах: 5 – изолинии плотности распределения полюсов разрывов; 6 – след (а) и полюс (б) плоскости напластования; 7 – ось (а) и пояс (б) симметрии.

Судя по ориентировке борозд скольжения на стенках сместителя, этот разрыв представляет собой сбросо-сдвиг.

Кроме упомянутых, горными выработками шахт №13, №14 и №15 были встречены многочисленные более мелкие разрывы, среди которых преобладают сместители северо-восточной, меридиональной и близширотной ориентировки (рис. 1).

Амплитуды смещений по ним составляют единицы и десятки метров. По многим из них фиксируются сдвиговые подвижки с разной вертикальной составляющей. Эти нарушения обуславливают мелкоблоковую структуру отдельных шахтных полей (преобладают блоки треугольной или трапецевидной формы). Средние линейные размеры таких блоков составляют 300-500 м. Они часто характеризуются разной интенсивностью тектонической нарушенности и разным видом напряженного состояния массива горных пород.

Трещинная тектоника блоков определяется, прежде всего, пространственным положением и кинематикой ограничивающих их разрывов. Наиболее интенсивная тектоническая трещиноватость фиксируется на участках, непосредственно прилегающих к разрывам. По мере удаления от тектонических границ блоков ее интенсивность падает. Мелкие тектонические нарушения и зеркала скольжения в крыльях таких разрывов обычно субпараллельны основному сместителю или образуют с ним острый угол. На стереограммах полюса таких трещин формируют максимумы разной интенсивности вокруг полюса основного сместителя (рис. 2а). Иногда полюса зеркал скольжения на стереограммах концентрируются вдоль больших кругов, образуя непрерывные или фрагментированные (состоящие из нескольких отдельных максимумов) пояса. Обычно эти пояса совпадают с кинематической плоскостью крупного разрыва или с плоскостью напластования (рис. 2б). Реже полюса мелких разрывов рассеиваются вдоль следа плоскости самого основного нарушения (рис. 2в).

На сводных стереограммах, характеризующих трещинную тектонику отдельных шахтных полей и участка в целом, отчетливо выде-

лены пояса полюсов оперяющих трещин, совпадающие со следом усредненной плоскости напластования и менее выраженные ортогональные им пояса (рис. 1а, б).

Таким образом, основная масса мелких тектонических разрывов обладает двойной симметрией – относительно напластования горных пород и относительно плоскостей более крупных нарушений. Такая симметрия свидетельствует о генетическом родстве всех этих структурных элементов.

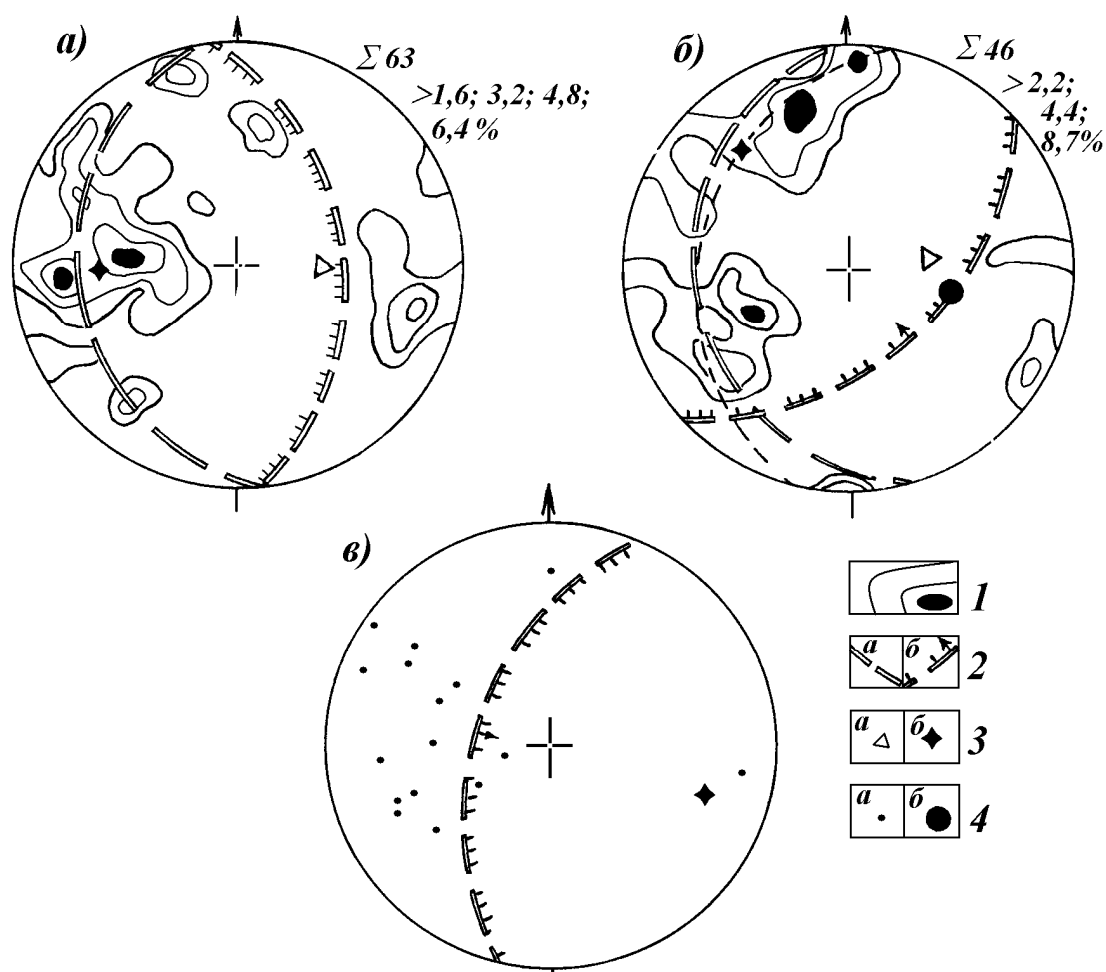
Образование большинства мелких тектонических разрывов было обусловлено смещениями по плоскостям более крупных дизъюнктивов. При этом активизировались подвижки по уже существующим в горном массиве первичным неоднородностям – «нормальносекущим» трещинам и плоскостям межслоевых срывов.

Для реконструкции параметров тектонических полей напряжений применялся метод кинематического анализа трещинно-разрывных структур [3, 4]. При этом использовалась вся совокупность замеренных тектонических сколов (всего более 400). На локальном структурном уровне, наиболее полная характеристика которого получена для полей шахт №13 и №15, наблюдаются довольно значительные изменения параметров напряженного состояния массива горных пород (рис. 3). Траектории главных нормальных напряжений и коэффициент Лодэ-Надаи особенно резко изменяют свои значения при переходе через разрывы, ограничивающие отдельные блоки шахтных полей. В пределах шахты №15 ориентация осей напряжения относительно устойчива. Ось главных нормальных растягивающих напряжений ( $\sigma_1$ ) в локальных объемах занимает, преимущественно, близгоризонтальное положение и ориентируется в северо-восточном направлении. Ось главных сжимающих напряжений ( $\sigma_3$ ) изменяет свое положение от почти вертикального до горизонтального и ориентирована в субширотном направлении.

Суммарное для рудного поля шахты поле напряжений характеризуются следующими элементами залегания осей главных нормальных напряжений: ось  $\sigma_1$  – азимут падения  $188^\circ$ , угол падения  $7^\circ$ ; ось  $\sigma_3$ , – соответственно,

284° и 63°. В границах поля шахты №13 более выдержана ориентировка в пространстве оси  $\sigma_3$  при более нестабильном положении оси  $\sigma_1$ . На мезорегиональном структурном уровне (т.е. в объемах, соизмеримых с размерами шахтного поля) тектоническое поле напряжений имеет здесь следующие характеристики: ось  $\sigma_1$  – азимут падения 8°, угол падения 6°;

ось  $\sigma_3$  – соответственно, 265° и 58°. Поле, восстановленное по замерам, выполненным в естественных обнажениях на поверхности в долине р. Калья, характеризуется следующей ориентировкой осей:  $\sigma_1$  – азимут падения 358°, угол падения 20°; ось  $\sigma_3$  – соответственно, 262° и 22°.



**Рис. 2.** Распределение тектонических сколов в крыльях крупных разрывов (участок горных работ шахты №15).

1 – изолинии плотности распределения полюсов трещин; 2 – плоскости: напластования (а), крупных разрывов (б); 3 – полюса: напластования (а), основного разрыва (б); 4 – полюса отдельных трещин (а) и ось пояса симметрии (б).

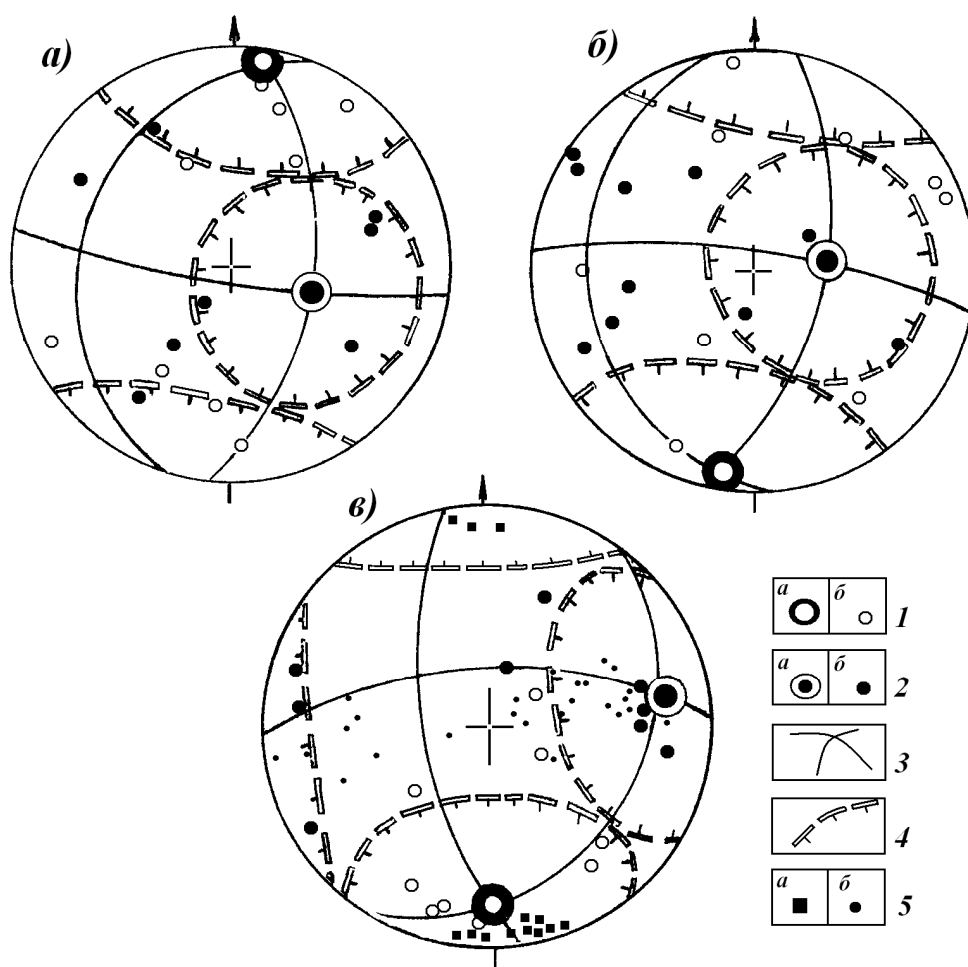
Восстановленное поле тектонических напряжений в целом характеризуется практически горизонтальным субмеридиональным

(азимут простираия 360-10°) растяжением и широтным (азимут простираия 265-275°) сжатием. Значения коэффициента Лодэ-Надаи

суммарного поля тектонических напряжений близко к 0 ( $\mu_0=+0,1-0,2$ ), т.е. напряженное состояние горного массива близко к чистому сдвигу с небольшим дополнительным сжатием.

Можно отметить, что реконструированное структурными методами поле тектонических напряжений по своим параметрам совпадает с полем, действующим в горном массиве в настоящее время и зафиксированным инструментальными методами. Было установлено,

что в горном массиве действуют сжимающие напряжения, по величине существенно превышающие теоретические значения, вычисленные для соответствующей глубины без учета тектонических сил. При этом максимальные сжимающие напряжения ориентированы в субширотном направлении, перпендикулярно простиранию уральских структур. По простиранию этих структур фиксировалось минимальное сжатие или даже растяжение.



**Рис. 3.** Реконструкции поля тектонических напряжений (а – поле шахты №13; б – поле шахты №15; в – долина р. Калья).

1 – ось растяжения  $\sigma_1$  мезорегионального (а) и локального (б) уровней; 2 – ось сжатия  $\sigma_3$  мезорегионального (а) и локального (б) уровней; 3 – плоскости действия главных нормальных напряжений; 4 – конические поверхности, ограничивающие области с одноименными осями; 5 – шарниры мелких складок (а), полюса плоскостей напластования (б).

### Выводы

1. В горном массиве Североуральского бокситоносного района реконструировано поле палеотектонических напряжений, характеризующееся широтным сжатием и близмеридиональным растяжением. Поле с подобной же ориентировкой главных усилий действует в массиве и в настоящее время.

2. Основная масса трещинно-разрывных структур района формировалась в этом поле. При этом смещения по крупным дизъюнктивам вызывали подвижки по уже существующим неоднородностям горного массива (первичной трещиноватости, плоскостям наложения).

3. Для зон горных ударов зафиксирован специфический «пульсирующий» тип поля напряжений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Алейников А.Л. и др.* Геодинамика Урала по данным натурных и модельных исследований // *Геология и геофизика.* – 1977. – №2. – С. 156-158.

2. *Беседа А.П. и др.* Особенности палеотектонических полей напряжений в выбросоопасных зонах Донецко-Макеевского и Цен-

трального районов Донбасса // *Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия горно-геологическая.* – 2007. – Вып. 6 (125). – С. 19-23.

3. *Гуценко О.И.* Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // *Доклады АН СССР.* – 1973. – Т. 210, №2. – С. 331-334.

4. *Гуценко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции тектонических напряжений / *Поля напряжений и деформаций в литосфере* // Москва: Наука, 1979. – С. 7-25.

5. *Кирпаль Г.Р.* Промышленные типы месторождений бокситов и их геолого-экономическая оценка // Москва: Недра, 1977. – 264 с.

6. *Корчемагин В.А., Емец В.С.* К методике реконструкции и разделения наложенных полей напряжений // *Доклады АН СССР.* – 1982. – Т. 263, №1. – С. 163-168.

7. *Ломакин В.С., Потехин Р.П., Гореев Е.С., Колесов В.А.* К оценке подвижности блочной структуры месторождений по сейсмологическим наблюдениям / *Геодинамика месторождений. Сборник научных трудов* // Кемерово: Кузбасский политехнический институт, 1988. – С. 95-98.

### **ЧЕРНИШ О.Г. Тектонічні поля напружень і ударонебезпека на шахтах ПУБРу.**

*Резюме.* Вивчено механізм динамічних явищ у шахтах Північноуральського бокситоносного району. З використанням методики кінематичного аналізу тріщинно-розривних структур реконструйовані тектонічні поля напружень за всією сукупністю тектонічних сколів досліджених ділянок. Поле палеонапружень гірничого масиву району характеризується широтним стисненням і субмеридіональним розтяганням. Така орієнтація головних нормальних напружень діє в масиві і в поточний час. Для зон гірничих ударів характерний «пульсуючий» тип поля напружень.

**Ключові слова:** родовища бокситу, Північноуральський бокситоносний район, тектоніка, розривні порушення, гірничі удари.

### **ЧЕРНЫШ О.Г. Тектонические поля напряжений и удароопасность на шахтах СУБРа.**

*Резюме.* Изучен механизм динамических явлений в шахтах Североуральского бокситоносного района. С использованием методики кинематического анализа трещинно-разрывных структур



реконструированы тектонические поля напряжений по всей совокупности замеренных тектонических сколов изученных участков. Поле палеонапряжений горного массива района характеризуется широтным сжатием и субмеридиональным растяжением. Такая ориентировка главных нормальных напряжений действует в массиве и в настоящее время. Для зон горных ударов характерен «пульсирующий» тип поля напряжений.

**Ключевые слова:** месторождения боксита, Североуральский бокситоносный район, тектоника, разрывные нарушения, горные удары.

### **CHERNYSH O.G. Tectonic stress fields and rock-bump hazards at SUBR mines.**

*Summary.* The mechanism of dynamic phenomena at the Severouralskiy bauxite-bearing region has been studied. Tectonic stress fields per totality of measured tectonic shears of studied areas have been reconstructed using method of kinematic analysis of fractures and faults structures. The field of paleostresses of the rock mass of the region is characterized by latitudinal compression and submeridional extension. Such orientation of principal normal stresses has effect at current. Pulsating type of stress field is typical for rock bump zones.

**Key words:** bauxite deposits, the Severouralskiy bauxite-bearing region, tectonics, faults, rock bumps.

*Надійшла до редакції 2 жовтня 2012 р.  
Представив до публікації доцент Є.В.Євтехов.*