

УДК 622.831:622.023.623

**Токсаров Валерий Николаевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Горный институт УрО РАН,  
614007 г. Пермь, ул. Сибирская, 78а  
e-mail: [toksarov@mi-perm.ru](mailto:toksarov@mi-perm.ru)

**Асанов Владимир Андреевич**

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией  
физических процессов освоения георесурсов,  
Горный институт УрО РАН  
e-mail: [ava@mi-perm.ru](mailto:ava@mi-perm.ru)

**Бельтюков Николай Леонидович**

инженер,  
Горный институт УрО РАН  
e-mail: [bnl@mi-perm.ru](mailto:bnl@mi-perm.ru)

**Ударцев Артем Александрович**

инженер,  
Горный институт УрО РАН  
e-mail: [udartsev@mi-perm.ru](mailto:udartsev@mi-perm.ru)

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И  
ТРЕЩИНОВАТОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ  
ПОРОД САРБАЙСКОГО КАРЬЕРА***Аннотация:*

Для уточнения характера напряженно-деформированного состояния массива горных пород вмещающих выработки Сарбайского железорудного карьера были выполнены исследования по определению направления действия главных напряжений в нетронутом массиве. Для решения поставленной задачи использовался метод М.В. Гзовского, заключающийся в восстановлении ориентировки осей главных напряжений по результатам изучения трещиноватости массива горных пород. В соответствии с тектонофизическими основами данного метода формирование любой тектонической структуры определяется полем напряжений, действующих в земной коре и отнесенных к определенному месту и времени. По результатам экспериментального изучения трещиноватости на обнажениях глубоких горизонтов Сарбайского карьера выявлено 5 основных систем трещин. Сопряженными системами, определяющими направления действия главных напряжений, являются две системы трещин, имеющие субширотную ориентацию с азимутом простирания 250 – 290° и 80 – 100°. Исследованиями установлено, что направление действия наибольшего главного напряжения ориентировано в вертикальном направлении. Промежуточное главное напряжение ориентировано в субширотном направлении. Ось минимального главного напряжения ориентирована в субмеридиональном направлении, параллельно простиранию рудных залежей. В работе сделано предположение, что распределение напряжений в скальном массиве глубоких горизонтов Сарбайского карьера близко к гипотезе А.Н. Динника. Вертикальная компонента определяется весом пород вышележащей толщи, а коэффициент бокового распора зависит от свойств массива и в среднем составляет 0,55.

*Ключевые слова:* горные породы, тектоническая трещиноватость, трещины скола и отрыва, тектонические напряжения, сопряженная пара сколов, блочное строение

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.054

**Toksarov Valeriy N.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Worker,  
Mining Institute UB RAS,  
614007, Perm, Sibirskaya street, 78a  
e-mail: [toksarov@mi-perm.ru](mailto:toksarov@mi-perm.ru)

**Asanov Vladimir A.**

Head of laboratory of physical processes  
of georesources development,  
Mining Institute UB RAS  
e-mail: [ava@mi-perm.ru](mailto:ava@mi-perm.ru)

**Beltukov Nikolay L.**

Engineer,  
Mining Institute UB RAS  
e-mail: [bnl@mi-perm.ru](mailto:bnl@mi-perm.ru)

**Udartsev Artem A.**

Engineer,  
Mining Institute UB RAS  
e-mail: [udartsev@mi-perm.ru](mailto:udartsev@mi-perm.ru)

**THE STRESS STATE AND FRACTURING  
OF ROCK MASS OF SARBAY OPEN-CAST MINE***Abstract:*

To specify the pattern of stress-stain state of rock mass around mine openings of Sarbay iron-ore open-cast mine researches were carried out on principal determination of stress orientation in pristine environment. Gzovsky method was used for solving the assigned task. This method consists of restoration of principal stress axes orientation as the results of rock mass fracturing analysis. According to tectonic physical foundations of the method any tectonic structure is formed due to stress field existing in Earth's crust which is to be attributed to specified time and place. Five main conjugated fractures were revealed as the result of experimental survey of fracturing on deep levels out-crop of Sarbay pit. Two conjugated fractures that define the direction of principal stresses have sublatitudinal orientation with trend azimuth of 250° – 290° and 80° – 100°. It was determined, that maximal principal stress is oriented in vertical direction. In-between principal stress is oriented in sublatitudinal direction. Minimal principal stress axis is oriented in submeridional direction, parallel to general cleavage of ore bed. In the paper an assumption is made that stress distribution in rock mass of deep levels of Sarbay open-cast pit is similar to Dinnik hypothesis. Vertical stress component is determined by overburden weight, and lateral earth pressure coefficient depends on rock mass properties and at average is equal to 0.55.

*Keywords:* rocks mass, tectonic fracturing, shear and tensile cracks, tectonic stresses, conjugate cleavage pair, block structure

### Введение

Сарбайский карьер, обрабатывающий запасы железных руд на Соколовско-Сарбайском месторождении, расположен в северной части Казахстана. Сарбайское месторождение магнетитов приурочено к западному крылу Соколовско-Сарбайской антиклинали. В геологическом строении месторождения принимают участие вулканогенно-осадочные образования палеозоя. На верхних горизонтах до глубины 100–120 м массив сложен рыхлыми породами, представленными песчано-глинистым материалом, разрушенными коренными породами и окисленными рудами. Под слоем рыхлых отложений залегает массив из скальных пород: магнетитовой руды, туфов, базальтов, песчаников и т. д. Крутопадающие пластообразные рудные тела мощностью 170–185 м, имеющие субмеридиональное простирание, прослеживаются на глубину до 1800 м. На месторождении широко развита сеть тектонических нарушений. В настоящее время карьер отработан до глубины 600 м уступами высотой 20–30 м. Размер карьера в плане составляет примерно 5,5×3,0 км.

В результате планируемой углубки карьера до отметки 700 м и вовлечения в разработку новых участков месторождения потребовалось детальное изучение геомеханических условий ведения горных работ. Для уточнения характера напряженно-деформированного состояния пород приконтурной части массива были выполнены исследования по определению направления действия главных напряжений в нетронutom массиве. Для решения поставленной задачи использовался метод М.В. Гзовского, заключающийся в восстановлении ориентировки осей главных напряжений по результатам изучения трещиноватости горных пород [1–8]. В соответствии с тектонофизическими основами данного метода формирование любой тектонической структуры определяется полем напряжений, которое представляет собой совокупность напряжений, возникающих и действующих в земной коре в связи с ее развитием, отнесенных к определенному месту и времени. Предполагается, что при постоянной ориентировке главных нормальных напряжений и постоянном соотношении их величин в массиве может формироваться две системы трещин скола и одна трещина отрыва (рис. 1). Трещины скола симметрично отклоняются от оси алгебраически максимальных главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  на угол  $\varphi$ , а линия их пересечения параллельна оси средних главных нормальных напряжений  $\sigma_2$ . При наличии в массиве трещин отрыва они всегда перпендикулярны оси алгебраически наименьших главных нормальных напряжений  $\sigma_3$  [1].

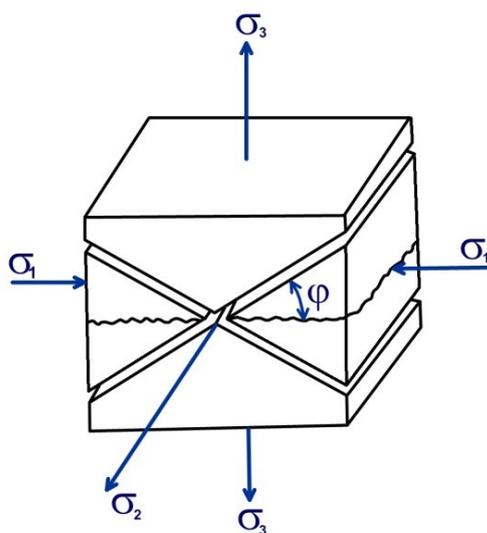


Рис. 1 – Расположение трещин скола и отрыва относительно осей главных нормальных напряжений

### Методика и результаты исследований трещиноватости массива горных пород

Изучение тектонической трещиноватости скального массива проводилось на 9-ти замерных станциях, расположенных в разных бортах карьера, позволяющих охватить все возможные направления простирания трещин (рис. 2).



- - замерные станции
- - тригопункты
- - места фотографирования карьера

Рис. 2 – Местоположение замерных станций

Внешний вид обнажений массива с разными системами трещин показан на рис. 4 и 5.

Первая система трещин совпадает с направлением напластования осадочных и вулканогенных пород (см. рис. 4). Азимут ее простирания колеблется в достаточно широких пределах – от 340 до 40°, в среднем составляет 10°. Углы падения составляют 40 – 65°, средний – 52°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 5 мм, средняя – 2,5 мм.

Вторая система трещин ориентирована в субширотном направлении и фактически имеет субвертикальное падение (см. рис. 5). При этом у части трещин этой системы ось падения ориентирована в южном направлении, а у другой – в северном.

Азимут простирания 2-й системы трещин изменяется в диапазоне 90 ÷ 120° и 270 ÷ 290°; азимут падения – в диапазоне 0 ÷ 30° и 180 ÷ 200°. Угол падения составляет в среднем 85°.

Третья система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в южном направлении под углом 50 – 80° (в среднем – 65°) (см. рис. 5). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 250 до 290°, в среднем составляет 265°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 3 мм.

Четвертая система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в северном направлении под углом 30 – 70° (в среднем – 52°) (см. рис. 5). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 80 до 100°, в среднем составляет 90°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 2,5 мм.

Пятая система трещин имеет субмеридиональную ориентацию и падение в восточном направлении под углом 30 – 50° (в среднем – 42°) (см. рис. 4). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 160 до 200°, в среднем составляет 180°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 5 мм.

Измерение параметров залегания отдельных трещин (азимута простирания, угла падения и ширины раскрытия) производилось горным компасом ГК-2. На замерных станциях, находящихся вблизи массива железной руды, в результате замеров азимута простирания трещин вводилась поправка, определяемая по результатам сопоставительных измерений одного и того же направления с использованием горного компаса и GPS-навигатора.

Обработка данных натурных измерений элементов залегания тектонических трещин производилась на точечных диаграммах по методике [2]. Результаты измерения параметров трещиноватости массива горных пород приведены на рис. 3. Всего было произведено 793 замера.

По результатам измерений выявлено 5 основных систем открытых тектонических трещин (табл. 1).

По результатам измерений выявлено 5 основных систем открытых тектонических трещин (табл. 1). Внешний вид обнажений массива с разными системами трещин показан на рис. 4 и 5.

Первая система трещин совпадает с направлением напластования осадочных и вулканогенных пород (см. рис. 4). Азимут ее простирания колеблется в достаточно широких пределах – от 340 до 40°, в среднем составляет 10°. Углы падения составляют 40 – 65°, средний – 52°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 5 мм, средняя – 2,5 мм.

Вторая система трещин ориентирована в субширотном направлении и фактически имеет субвертикальное падение (см. рис. 5). При этом у части трещин этой системы ось падения ориентирована в южном направлении, а у другой – в северном.

Азимут простирания 2-й системы трещин изменяется в диапазоне 90 ÷ 120° и 270 ÷ 290°; азимут падения – в диапазоне 0 ÷ 30° и 180 ÷ 200°. Угол падения составляет в среднем 85°.

Третья система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в южном направлении под углом 50 – 80° (в среднем – 65°) (см. рис. 5). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 250 до 290°, в среднем составляет 265°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 3 мм.

Четвертая система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в северном направлении под углом 30 – 70° (в среднем – 52°) (см. рис. 5). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 80 до 100°, в среднем составляет 90°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 2,5 мм.

Пятая система трещин имеет субмеридиональную ориентацию и падение в восточном направлении под углом 30 – 50° (в среднем – 42°) (см. рис. 4). Азимут ее простирания колеблется в диапазоне от 160 до 200°, в среднем составляет 180°. Ширина раскрытия трещин 0,5 – 10 мм, средняя – 5 мм.

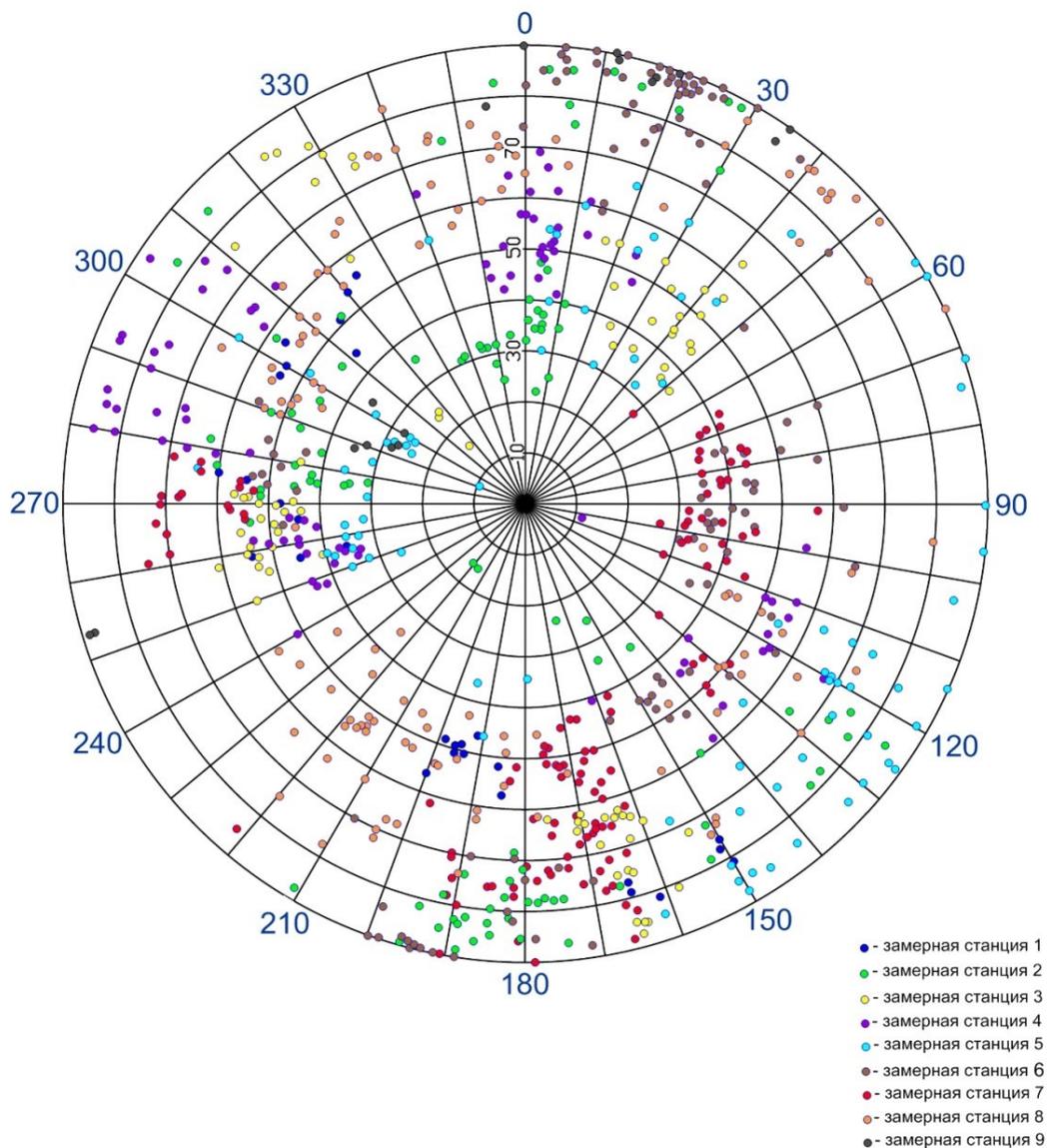


Рис. 3 – Точечная диаграмма трещиноватости породного массива Сарбайского карьера

Таблица 1

Параметры залегания основных тектонических систем трещин массива горных пород Сарбайского карьера

№ системы трещин	Азимут простирания, град	Азимут падения, град	Угол падения, град	Расстояние между трещинами, см	Ширина раскрытия трещин, мм
1	340/40(10)	250/310(282)	40/65(52)	15/50(25)	0,5/5(2,5)
2	90/120; 270/290	0/30; 180/200	85	40	3
3	250/290(265)	160/200(175)	50/80(65)	10/500(45)	3
4	80/100(90)	350/10(0)	30/70(52)	5/450(40)	2,5
5	160/200(180)	70/110(90)	30/50(42)	10/300(25)	0,5/10(5)

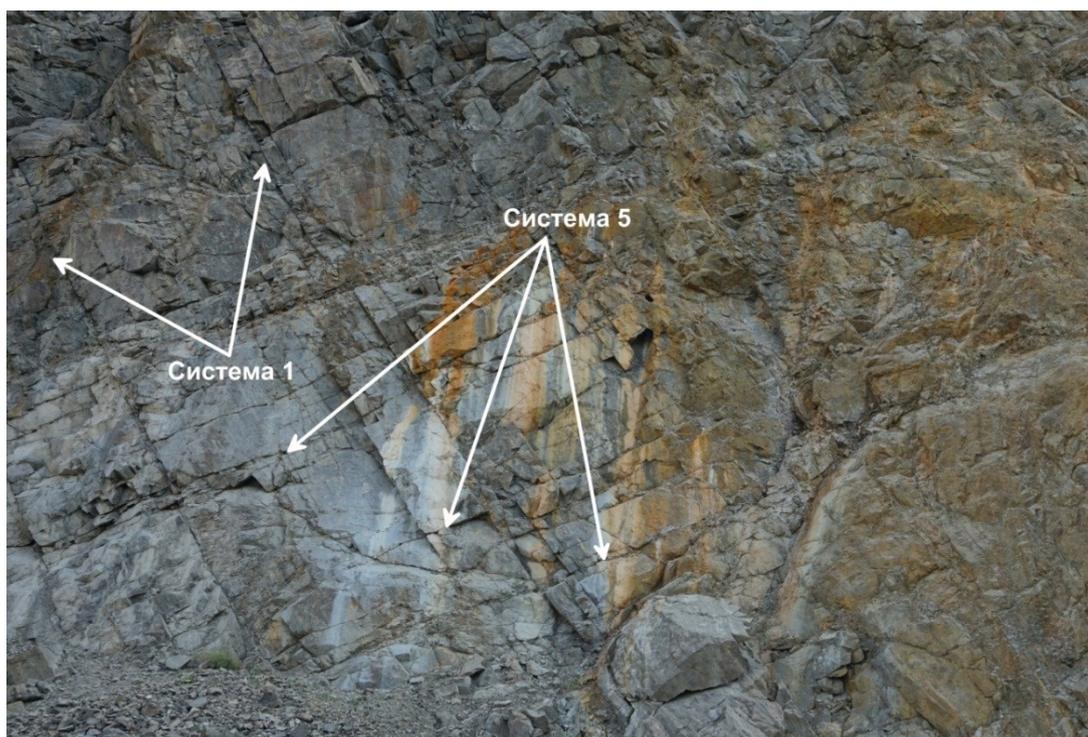


Рис. 4 – Системы тектонических трещин № 1 и 5  
в южном борту карьера (зам. станция 009)

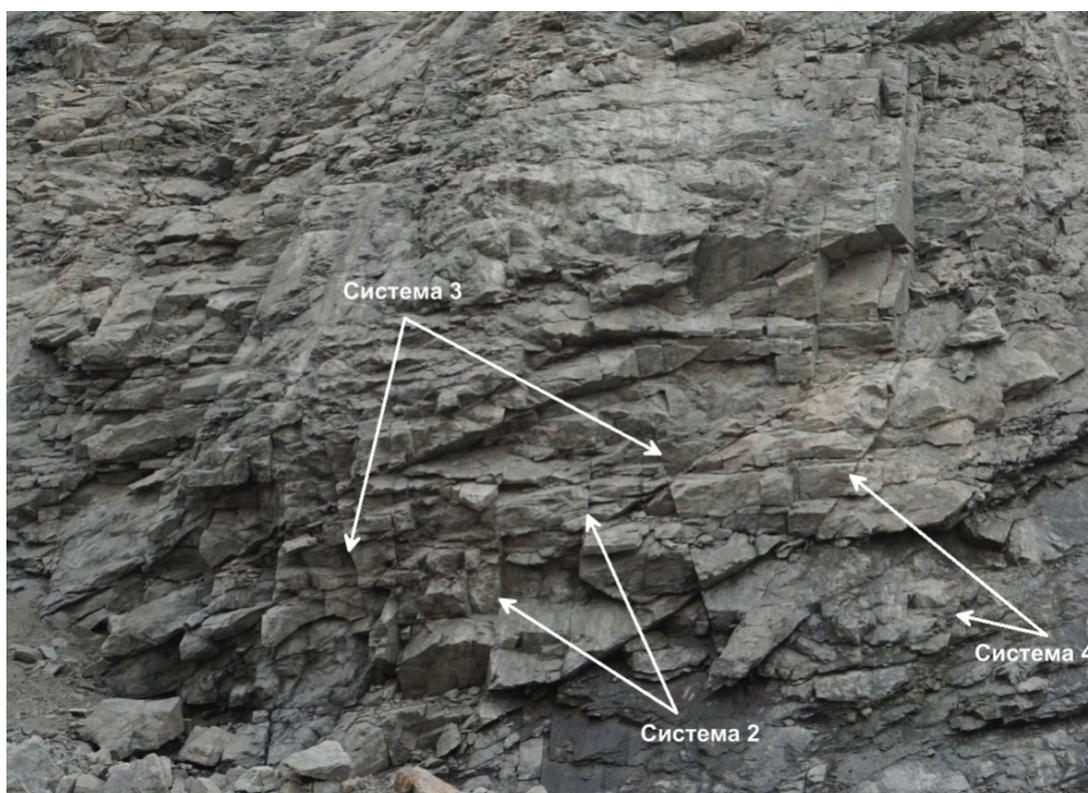


Рис. 5 – Система тектонических трещин № 2, 3, 4  
в восточном борту карьера (зам. станция 007)

### Интерпретация результатов натурных измерений

По результатам обработки данных установлено, что сопряженными системами трещин скола являются системы № 3 и 4 (см. табл. 1). Система субвертикальной трещиноватости № 2 фактически располагается посередине между системами № 3 и 4 (см. рис. 4) на месте возможной локализации системы трещин отрыва (см. рис. 1). При этом трещины системы № 2 по своему внешнему виду относятся к трещинам скола. При анализе результатов возник вопрос: возможно ли, что в процессе формирования породного массива трещины скола заместили трещины отрыва. В работе [9] геологи дают положительный ответ. В частности, отмечается, что «массив горных пород в процессе своего существования в течение длительного времени, порой сотен миллионов лет, неоднократно подвергался разносторонним сжимающим усилиям. При смене плана деформаций заложенные ранее трещины могли подновляться, при этом мог измениться их генетический тип. Так, заложенная ранее трещина скалывания при новом плане деформаций может занять положение, отвечающее ориентировке трещин отрыва. При этом она начинает выполнять функции отрыва, то есть раскрываться без существенных перемещений блоков. При этом закладываются и новые системы трещин. Практически в таких массивах насчитывают до 12 систем трещин». Данная цитата в полной мере подходит под описание структуры массива горных пород Сарбайского карьера.

Предположим, что ориентация систем тектонических трещин № 2, 3 и 4 в наибольшей степени соотносится с текущим полем напряжений в нетронutom массиве карьера. В этом случае, согласно методике М.В. Гзовского, главные напряжения в нетронutom массиве будут ориентированы следующим образом (рис. 6). Ось наибольшего главного напряжения ( $\sigma_1$ ) ориентирована в вертикальном направлении. Промежуточное главное напряжение ( $\sigma_2$ ) ориентировано субширотно, вдоль линии пересечения сопряженных систем тектонической трещиноватости № 3 и 4. Ось минимального главного напряжения ( $\sigma_3$ ) ориентирована в субмеридиональном направлении, параллельно общему простиранию рудных залежей.

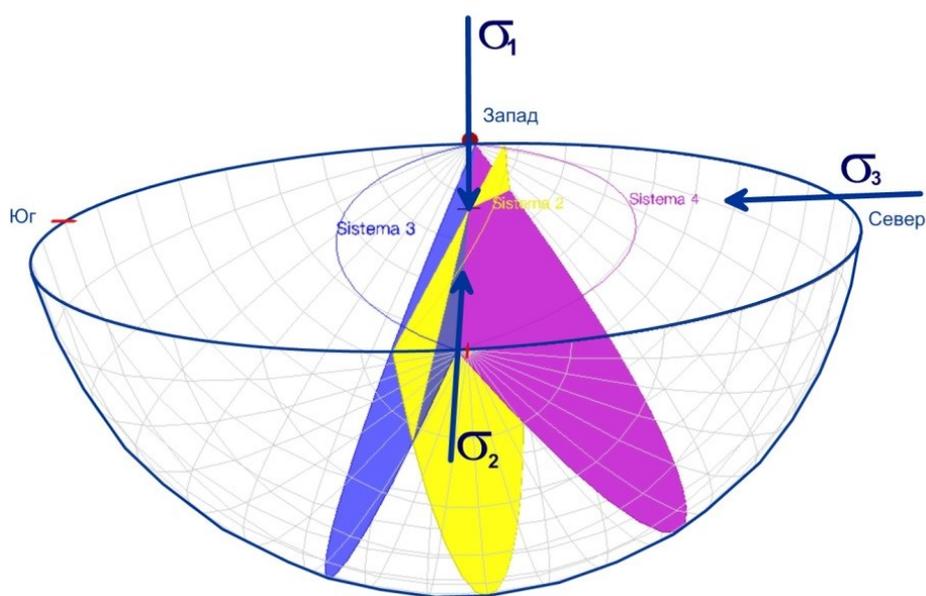


Рис. 6 – Восстановление ориентировки осей главных напряжений в нетронutom массиве горных пород Сарбайского карьера

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что поле напряжений в скальном массиве Сарбайского карьера близко к гипотезе А.Н. Динника. Это в определенной степени подтверждается и результатами натурных измерений горизонтальных напряжений в приконтурном массиве на глубине 450 – 550 м [10], где отмечается, что

горизонтальные напряжения изменяются в пределах от 4,0 до 8,0 МПа. Коэффициент бокового распора породного массива увеличивается с глубиной от 0,34 до 0,57. Исходя из веса вышележащей толщи, на нижних горизонтах карьера вертикальные напряжения будут составлять 12–15 МПа.

#### *Выводы*

По результатам измерений выявлено 5 основных систем открытых тектонических трещин. Трещины в системах № 1 и 5 ориентированы в субмеридиональном направлении, трещины в системах № 2 – 4 ориентированы в субширотном направлении.

Экспериментами установлено, что ось наибольшего главного напряжения ориентирована в вертикальном направлении. Промежуточное главное напряжение ориентировано субширотно. Ось минимального главного напряжения ориентирована в субмеридиональном направлении, вдоль линии простирания рудных залежей.

Распределение напряжений в скальном массиве Сарбайского карьера близко к гипотезе А.Н. Динника. Вертикальные напряжения, исходя из веса вышележащей толщи, на нижних горизонтах будут составлять 12 – 15 МПа. Коэффициент бокового распора породного массива в среднем составляет 0,55.

Результаты проведенных исследований будут использованы при трехмерном геомеханическом моделировании напряженно-деформированного состояния массива Сарбайского карьера с целью оценки устойчивости его бортов при ведении горных работ на глубине более 600 м.

#### **Литература**

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
2. Букринский В.А. Изучение связи трещиноватости с тектоническими структурами горных пород: учеб. пособие / В.А. Букринский, А.В. Михайлова; МИРиГЭ. – М., 1963. – 98 с.
3. Гончаров М.А. Введение в тектонофизику / М.А. Гончаров, В.Г. Талицкий, Н.С. Фролова. - М.: КДУ, 2005. — 496 с.
4. Sidelnik A. Determination of Fracture Tectonics of Rocks by Reconstruction of Stresses and Analysis of Displacements / Procedia Structural Integrity. - Vol. 6. - 2017. - P. 316 - 321.
5. Simón J.L. Forty years of paleostress analysis: has it attained maturity? / Journal of Structural Geology. - 2018.
6. Maerten, L., Maerten, F., Lejri, M., Gillespie, P., 2016. Geomechanical paleostress inversion using fracture data. J. Struct. Geol. 89. – P. 197 - 213.
7. Nováková L., Brož M. On the Paleostress Analysis Using Kinematic Indicators Found on an Oriented Core / Universal Journal of Geoscience 2(2). - 2014. - P. 76 - 83.
8. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов: научное издание / Ю.Л. Ребецкий. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 406 с.
9. Ольховатенко В.Е. Методы изучения трещиноватости горных пород: учеб.-метод. пособие / В.Е. Ольховатенко, Г.И. Трофимова, Т.В. Ожогина. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2015. – 80 с.
10. Токсаров В.Н. Изучение напряженного состояния массива прибортовых пород Сарбайского карьера / В.Н. Токсаров // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 119 - 123.