

УДК 622.831.32:551.24

Батугин Андриан Сергеевич

доктор технических наук,
профессор кафедры
БЭГП НИТУ «МИСиС»,
119049, г. Москва, Ленинский пр., д. 4
e-mail: as-bat@mail.ru

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.050

Batugin Andrian S.

Doctor of Engineering Sciences,
Professor of the Department
of Safety and Ecology of Mining,
NUST MISIS,
119049, Russia, Moscow, 4 Leninskiy av.
e-mail: as-bat@mail.ru

К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ МЕТОДАМИ ТЕКТОНОФИЗИКИ

ON EVALUATION OF STRESS STATE OF ROCK MASS IN DEPOSITS BY METHODS OF TECTONOPHYSICS

Аннотация:

Обобщается опыт использования методов тектонофизики для оценки напряженного состояния массива на участках рудных и угольных месторождений. На примере двух выборок данных показано, что рекомендованные методическими документами методы тектонофизического анализа нарушенности могут давать как близкие, так и значительно различающиеся результаты. Анализ распределения векторов смещения крыльев тектонических нарушений на стереограммах позволяет выработать некоторые рекомендации по предпочтительному использованию тектонофизических методов. Методы, в которых используется модель изотропной среды и направление смещения по нарушению однозначно связано с ориентировкой главных осей напряжений, рекомендуется использовать, когда разброс в ориентировке векторов смещения небольшой. При широком разбросе в ориентировке векторов смещения на нарушениях рекомендуется использовать методы, опирающиеся на модель анизотропной среды, допускающей смещения по произвольно ориентированным ослабленным сечениям.

Ключевые слова: напряженное состояние, геодинамическая опасность, горные удары, методы тектонофизики, стереографическая проекция, вектор смещения, ориентировка главных напряжений.

Abstract:

The paper summarizes the experience of using the tectonophysics methods to evaluate the stress state of the rock mass in areas of ore and coal deposits. Using the example of two data samples, it is shown that the methods of tectonophysical analysis of disturbances recommended by rock bumps manuals can give both close and significantly different results. Analysis of the distribution of displacement vectors of wings of tectonic disturbances on stereograms allows us to develop some recommendations on the preferred use of tectonophysical methods. The methods that use the isotropic medium model and uniquely relate the direction of disruption displacement to the orientation of the main stress axes are recommended when the spread in orientation of displacement vectors is small. If there is a wide spread in the orientation of displacement vectors for disturbances, it is recommended to use methods based on a model of an anisotropic medium that enables displacements along arbitrarily oriented weakened planes.

Key words: stress state, geodynamic hazard, rock bumps, tectonophysics methods, stereographic projection, displacement vector, orientation of main stresses.

Введение

Данные о напряженном состоянии горного массива, особенно на удароопасных месторождениях, имеют большое значение для обоснования геомеханических расчетов, оценки геодинамической опасности при разработке месторождений [1 – 4]. После установления факта превышения горизонтальных напряжений над вертикальными в Скандинавии [5], а в СССР на месторождении Таштагол [6], развернулись работы по измерению и изучению напряжений в массивах пород [7 – 10]. В настоящее время большие работы в этом направлении проводят сотрудники лаборатории геомеханики Института горного дела [11 – 17], а также другие исследователи [18 – 23].

Методическими документами по оценке удароопасности при ведении горных работ предусматривалось и предусматривается использование методов тектонофизики для оценки напряженного состояния горного массива [24 – 26]. Основным преимуществом

методов тектонофизики в данной области является возможность оценки исходного напряженного состояния крупных массивов горных пород, соизмеримых, например, с участками шахтных полей или в целом с месторождением. Основной трудностью является получение качественных исходных данных и последующее решение вопроса о соответствии результата современному полю напряжений. Одним из последних документов по геодинамической безопасности [26] рекомендуется к использованию несколько различных методов. Поскольку и трудоемкость, и требования к исходным данным для разных методов различаются, необходимо опираться на какой-либо обоснованный подход при выборе используемого метода. В данной работе сравниваются результаты тектонофизического анализа полей напряжений, полученные различными методами по одним и тем же выборкам данных на примерах рудного и угольного месторождений. Целью работы является выработка рекомендаций по выбору тектонофизического метода для исследований, предусмотренных методическими документами по проблеме горных ударов.

Метод

Методы тектонофизического анализа нарушенности для реконструкции полей напряжений рассмотрены в работах Е.Г. Андерсона (1942), М.В. Гзовского (1963), А.В. Долицкого (1978), А.С. Забродина (1974), О.И. Гущенко (1979), В.А. Корчемагина (1987), В.Д. Парфенова (1980), G. Angelier (1979), R. Armijo (1978), E. Carey (1979) и др. и направлены на изучение полей палеонапряжений. Для оценки современного напряженного состояния блочных массивов методы тектонофизики было предложено использовать в исследованиях по геодинамическому районированию территорий [24].

Первоначально рассматривались возможности восстановления палеополей напряжений и затем их идентификация с современным полем напряжений. Так, в работе [27] было предложено устанавливать соответствие палеополей напряжений современным полям напряжений путем сопоставления результатов тектонофизического анализа нарушенности с результатами инструментальных измерений. Затем было предложено использовать в качестве исходной информации в методах тектонофизики для анализа современного поля напряжений данные о границах блоков, выделяемых при геодинамическом районировании [28]. Эти подходы нашли отражение в ряде публикаций и в методических документах по геодинамическому районированию [25, 26, 29], но решение вопроса о выборе метода для исследования в конкретной ситуации и интерпретация получаемых результатов остается за исследователем. Так, среди рекомендованных методов тектонофизического анализа [26] перечислены методы А.С. Забродина и О.И. Гущенко. И тот и другой метод позволяет определить ориентировку главных напряжений, вызвавших смещение по дизъюнктиву, но эти методы опираются на разные геомеханические модели массива. В методе А.С. Забродина используется модель изотропной среды, в которой вектор смещения дизъюнктива однозначно связан с ориентировкой главных напряжений. В методе О.И. Гущенко используется модель анизотропной среды, в которой допускается возникновение смещений по различно ориентированным ранее существовавшим поверхностям ослабления. В ряде случаев наличие и качество исходных данных накладывает ограничения на выбор метода для исследования: при использовании метода А.С. Забродина достаточно данных об одном нарушении (дизъюнктиве), а при использовании метода О.И. Гущенко необходимо иметь данные о совокупности нарушений.

В шахтных условиях при обследовании поверхностей сместителей нарушений устанавливают азимут и угол падения сместителя в точке наблюдений, ориентировку следов скольжения и направление подвижки (вектор смещения). При определении ориентировки следов скольжения измеряют или их азимут и угол падения, или угол их склонения γ в плоскости сместителя. Угол γ отсчитывают от линии простирания сместителя до линии следов скольжения по часовой стрелке в висячем крыле нарушения или против

часовой стрелки в лежачем крыле нарушения. Данные наносят на стереографическую сетку, на которой производят необходимые построения и анализ. Значения коэффициента Лоде-Надаи $\mu\sigma$ определяют графическим или расчетным путем. Реализация методов рассмотрена как в авторских публикациях [30, 31], так и в других источниках [25, 29, 32].

Шахтные исследования и тектонофизические построения

Исходные данные для сравнительного анализа результатов применения методов тектонофизики были получены в шахтных условиях на рудном и угольном месторождении (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Данные о тектонических нарушениях со следами смещения (шахта 15-15 СУБР, гор.-320, район орт-заездов 14 и 15 юг)

№ п/п	Азимут/угол падения сместителя	Азимут/угол следов скольжения	Тип смещения
1	80/25	150/8	Взброс
2	125/82	89/79	Взброс
3	240/35	262/33	Взброс
4	230/55	311/13	Взброс
5	25/25	92/12	Взброс
6	90/80	7/33	Взброс
7	270/85	359/30	Взброс
8	215/74	145/47	Сброс
9	230/65	293/43	Взброс
10	260/65	297/60	Сброс
11	240/67	314/35	Взброс
12	140/55	123/54	Взброс

Таблица 2

Данные о тектонических нарушениях со следами смещения (шахта им. Ярославского, пл. Журицкий, лавы 50-54, Кузбасс)

№ пп	Азимут/угол падения сместителя	Азимут/угол следов скольжения	Тип смещения
1	160/52	160/52	Взброс
2	95/35	140/32	Взброс
3	330/22	330/22	Взброс
4	350/30	6/28	Взброс
5	95/30	95/30	Взброс
6	135/15-25	135/15-25	Взброс
7	100/26	160/18, 100/23	Взброс
8	120/10-20	160/12	Взброс
9	335/35	335/35	Взброс
10	345/40	345/40	Взброс
11	335/25	335/25	Взброс
12	145/20	145/20	Взброс
13	130/25	130/25	Взброс
14	300/32	300/32	Взброс
15	160/20-24	160/20-24	Взброс
16	340/30	340/30	Взброс

В табл. 1 и 2 в столбце «Тип смещения» приведена информация, необходимая для указания ориентировки вектора смещения. Фактически некоторые нарушения, как, например, 2, 8 из табл. 2 являются взбросо-сдвигами, но для представления об ориентировке вектора смещения достаточно указать только часть этой информации, «Взброс».

На рис. 1 (а-г) приведены результаты тектонофизического анализа данных таблиц 1 (а, б) и 2 (в, г) методами А.С. Забродина (а, в) и О.И. Гущенко (б, г).

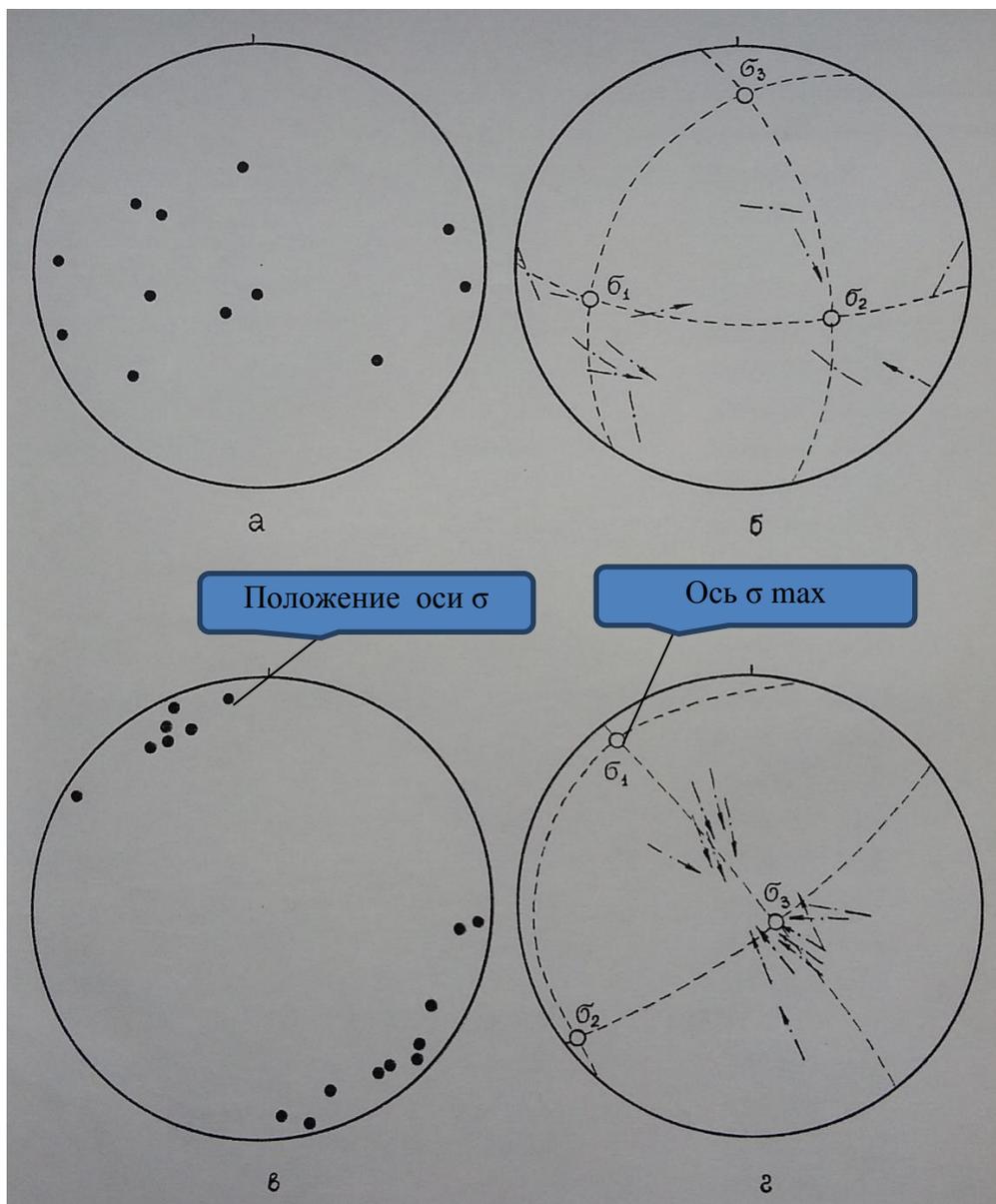


Рис. 1 – К сравнительной оценке результатов тектонофизического анализа:
а, б – для рудного месторождения; в, г – для угольного; а, в – по методу А.С. Забродина;
б, г – по методу О.И. Гущенко

Обсуждение результатов и выводы

Как можно видеть из рис. 1 а, неопределенность в определении положения осей главных напряжений методом А.С. Забродина и близким к нему методом В.Д. Парфенова может быть очень высокой: на стереограмме возможные проекции оси σ_{\max} занимают большую зону, что допускает ориентировку этой оси в широком диапазоне ориентаций (от вертикальной до субгоризонтальной в разных направлениях). В то же время анализ тех же данных методом О.И. Гущенко (рис. 1 б) дает однозначный результат. В другом

случае, для угольного месторождения, оба метода дают сопоставимый результат (рис. 1 в, з).

Сопоставление полученных результатов, представленных на рис. 1, с результатами других методов и опытом ведения горных работ на этих месторождениях показывает, что реконструируемые поля напряжений соответствуют в целом современному напряженному состоянию массива пород и методы тектонофизики находят свое место при геомеханических и геодинамических исследованиях [32, 33].

Выводы

1. Рекомендованные «Методическими рекомендациями по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам» различные методы тектонофизического анализа нарушенности для изучения современного напряженного состояния массива пород могут давать как близкие, так и трудно сопоставимые результаты при анализе одних и тех же данных, что необходимо учитывать при выборе метода для исследований.

2. Методы А.С.Забродина, В.Д. Парфенова рекомендуется использовать, когда разброс в ориентировке векторов смещения небольшой. При широком разбросе в ориентировке векторов смещения на нарушениях рекомендуется использовать методы, опирающиеся на модель анизотропной среды, допускающей смещения по произвольно ориентированным ослабленным сечениям (метод О.И. Гущенко).

Литература

1. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах / И.М. Петухов. - М.: Недра, 2004.
2. Zubkov A.V. 2012. Stress State of the Earth's Crust in the Urals. Lithosphere. - № 3. - P. 3–18.
3. Han, J., Zhang, H., Liang, B. et al. Influence of Large Syncline on In Situ Stress Field: A Case Study of the Kaiping Coalfield, China. Rock Mech Rock Eng (2016) 49: 4423, doi.org/10.1007/s00603-016-1039-4
4. Kaiser P.K., Amman F., Steiner W. 2010. How highly stressed brittle rock failure impacts tunnel design. Eurock'10, Lausanne, Switzerland, Zhao, Labious. Didt and Mathier (eds), Taylor & Francis Group, London, 27-38.
5. Hast N. The measurement of rock pressure in mines. - 1958. Norstedt, Stockholm.
6. Батугин С.А. Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения / С.А. Батугин, А.Т. Шаманская // ФТПРПИ. – 1965. – № 2. – С. 28 – 33.
7. Влох Н.П. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин. – М.: Недра, 1970. - 123 с.
8. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов и др. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.
9. Егоров П.В. Результаты исследования напряженного состояния Горной Шории и южной части Кузбасса / П.В. Егоров, А.Т. Шаманская, И.П. Аман // Проблемы механики горных пород: матер. всесоюз. науч. конф. (Новосибирск). – Новосибирск, 1971. – С. 246 - 249.
10. Петухов И.М. Геодинамика недр / И.М. Петухов, И.М. Батугина. - М.: Недра, 1996. – 196 с.
11. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени / А.В. Зубков, О.В. Зотеев, О.Ю. Смирнов, Я.И. Липин, С.В. Худяков, Р.В. Криницын, К.В. Селин, А.А. Ершов, Л.Р. Валиуллов // Литосфера. - 2010. - № 1. - С. 84 - 93.

12. Зубков А.В. Исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород / А.В. Зубков, И.В. Бирючев, Р.В. Криницын // Горный журнал. - 2012. - № 1. - С. 44 - 47.
13. Криницын Р.В. Мониторинг напряженного состояния и обеспечение устойчивости массивов руд и пород в очистных блоках ш. "Магнетитовая" / Р.В. Криницын, С.В. Худяков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - № 7. - С. 250 - 256.
14. Пат. 2540694 Российская Федерация, МПК E21C 39/00. Способ определения природных напряжений в массиве горных пород / И.В. Бирючев, А.В. Зубков, Р.В. Криницын, Я.И. Липин, К.В. Селин, С.В. Сентябов; заявитель и патентообладатель ИГД УрО РАН. - № 2013134578, заявл. 23.07.2013, опубл. 27.01.2017, Бюл. № 4
15. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования / А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов, Я.И. Липин, С.В. Худяков, Р.В. Криницын // Проблемы недропользования. - 2016. - № 4 (11). - С. 41 - 49.
16. Krinitsyn R., Avdeev A., Khudyakov S. Evaluation of geomechanical conditions at magnetitovaya mine when undermining natural and anthropogenic objects. In: E3S Web of Conferences. - 2018. - С. 02017.
17. Корнилков С.В. Уральская научная школа геомехаников: фундаментальные и прикладные исследования / С.В. Корнилков, А.А. Панжин // Проблемы недропользования. - 2018. - № 3 (18). - С. 10 - 20. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.010
18. Шабаров А.Н. Концепция геодинамического моделирования месторождений / А.Н. Шабаров // ГИАБ. - 2001. - № 1.
19. Зыков В.С. Техногенная геодинамика: учебное пособие / В.С. Зыков. - Кемерово: ГУ КузГТУ, 2006. - 266 с.
20. Игнатов Ю.М. Совместное использование горно-геометрических данных и цифрового маркшейдерского плана в геоинформационной системе для поиска опасных зон / Ю.М. Игнатов // Вестник КузГТУ. - 2010. - № 1. - С. 139 - 143
21. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении / И.Ю. Рассказов, Б.Г. Саксин, В.И. Усиков, М.И. Потапчук // Горный журнал. - 2016. - № 12. - С. 13 - 19. Doi: 10.17580/gzh.2016.12.03.
22. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на Объединенном Кировском руднике ОАО «Апатит» / А.А. Козырев, М.М. Каган, Д.В. Жиров, К.Н. Константинов // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. науч. тр. - Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. - Т. 2. - С. 228 - 234.
23. Активизация блоков земной коры под влиянием горных работ как фактор геологических нарушений на шахте Хуафэн в Китае. / Ц. Цяо, Ц. Чжао, И.М. Батугина, А.С. Батугин, Л. Юй, Ч. Сунь, Б.И. Ань // Горный информационно-аналитический бюллетень -- 2012. - № 12. - С. 132 - 137.
24. Методические указания по профилактике горных ударов с учетом геодинамики месторождений. - Л.: ВНИМИ, 1983. - 138 с.
25. Геодинамика недр. Методические указания. - Л.: ВНИМИ, 1990.
26. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216. - М.: 2016. - 52 с.
27. АС № 1121429, СССР. Способ оценки регионального напряженного состояния массива горных пород / Батугина И.М., Петухов И.М., Винокур Б.Ш., Батугин А.С., Гущенко О.И. Оpubл. В Б.И. - 1984. - № 34, ил.: 3 с.
28. Батугин А.С. Напряженно-деформированное состояние и особенности блочного строения некоторых шахтных полей Кузбасса / А.С. Батугин, Т.И. Лазаревич // Совершенствование способов разработки удароопасных месторождений: Сб. науч. трудов. - Л.: ВНИМИ, 1986. - С. 34 - 38.

29. Батугина И.М. Геодинамическое районирование месторождений при строительстве и эксплуатации рудников / И.М. Батугина, И.М. Петухов. - М.: Недра. 1988. – 166 с.
30. Забродин А.С. Элементы геометрического и геомеханического анализа дизъюнктивов / А.С. Забродин // Маркшейдерское дело в социалистических странах. Том 6. Катовице. - 1974. – С. 317 - 324.
31. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений / О.И. Гущенко // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М., 1979. – С. 7 - 25.
32. Батугина И.М. Горное дело и окружающая среда. Геодинамика недр: учебное пособие / И.М. Батугина, А.С. Батугин, И.М. Петухов. - М: Горная книга, 2012.
33. Батугин А.С. Тектонофизические условия проявления техногенных землетрясений / А.С. Батугин // Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых: сборник материалов всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Тайлаков О.В. (отв. редактор). - 2015. - С. 36.