

УДК 6252.83.550.3

В.В. Бодин

**ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНО-НАПРЯЖЁННЫХ ЗОН
ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ
НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
СПЕКТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

Рассмотрено пространственное распределение спектров сейсмических волн, распространяющихся в локально-напряжённых зонах тектонических нарушений. Показано, что характер распределения высокочастотных гармоник сейсмических волн подобен распределению напряжений в окрестности тектонических нарушений.

Ключевые слова: геодинамические явления, тектонические нарушения, сейсмические исследования, сейсмические волны, породный массив.

Анализ геодинамических явлений, регистрируемых на подземных рудниках, показывает, что подавляющее их большинство приурочено к тектоническим нарушениям [1, 2, 3]. Это связано с тем, что разномодульные неоднородности, к которым относятся и тектонические нарушения, формируют в своей окрестности локально-напряжённые зоны, уровень напряжений в пределах которых, превышает фоновые в 2-5 раз [4, 5, 6]. Натурными и лабораторными исследованиями процесса разрушения горных пород установлено, что параметром характеризующим геодинамическую опасность, является градиент распределения напряжений ($d\sigma/dx$) в зоне влияния тектонического нарушения [6, 7, 8]. Результаты мониторинга градиента напряжений дают возможность получать информацию для более достоверного прогноза геодинамической опасности.

Сейсмическими исследованиями, выполненными на ряде подземных рудников, показана связь напряжённого состояния локально-напряжённых зон со спектральными параметрами нелинейных колебаний [9,10], что является предпосылкой для исследования характера пространственного распределения спектров нелинейных колебаний в окрестности тектонических структур с целью определения градиента частоты для последующей оценки градиента напряжений в зоне тектонического влияния разлома.

В качестве одного из объектов исследования рассматривается породный массив, включающий крутопадающее тектоническое нарушение, мощность деформированной зоны которого составляет 3 метра. Геофизические наблюдения выполнялись на шахте «Магнетитовая» Всокогорского месторождения магнетита. Методика наблюдений выполненных исследований аналогична методике приведённой в работе [10]. Фотография тектонического нарушения и пересекающего его сейсмического профиля приведена на рис. 1. Видимая зона деформации разлома распложена между ПК 19 и ПК 22.



Рис. 1. Фотография сейсмического профиля, пересекающего тектоническое нарушение

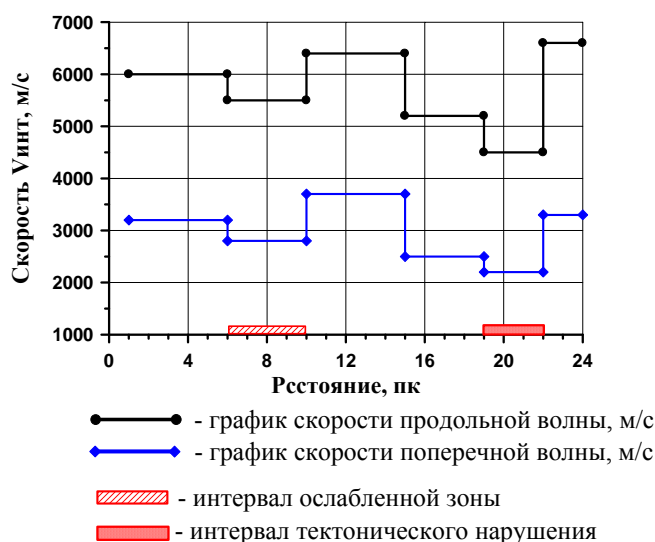


Рис. 2. Графики интервальных скоростей продольной и поперечной волн в окрестности тектонического нарушения. Высокогорский рудник, шахта «Магнетитовая»

Для оценки степени влияния тектонического нарушения на параметры упругости исследуемого породного массива, по линейным участкам годографов продольных и поперечных волн, зарегистрированных из выносных пунктов возбуждения колебаний (ПВ) определены значения интервальных скоростей ($\Delta x/\Delta t$).

Графики интервальных скоростей приведены на рис. 2. Анализ распределения интервальных скоростей показал, что резкое падение скорости сейсмических волн отмечено на интервале дислоцированных пород (ПК 19 – ПК 22), которое составляет, относительно скорости во вмещающем массиве, 29 % для продольной волны (V_p) и 35 % для поперечной (V_s). На интервале профиля (ПК 15 – ПК 19), который примыкает к зоне дислоцированных пород, также наблюдается уменьшение интервальной скорости - на 16 % для V_p и на 26 % для V_s . Эта зона пониженной скорости, согласно модели динамического влияния разлома [Шер, Выл], является зоной повышенной трещиноватости и пластической деформации горных пород. Кроме скоростной неоднородности, вызванной тектоническим нарушением, в пределах исследуемого массива присутствует визуально выделяемая зона пониженной скорости (ПК 6 – ПК 10, предположительно зона микротрещиноватости). Падение величины скорости

в этой зоне незначительное и составляет 13 % для V_p и 17% для V_s . Таким образом, исследуемый породный массив содержит две различные неоднородности с пониженными параметрами упругости, которые в поле действующих сил, согласно [11, 12], являются концентраторами напряжения.

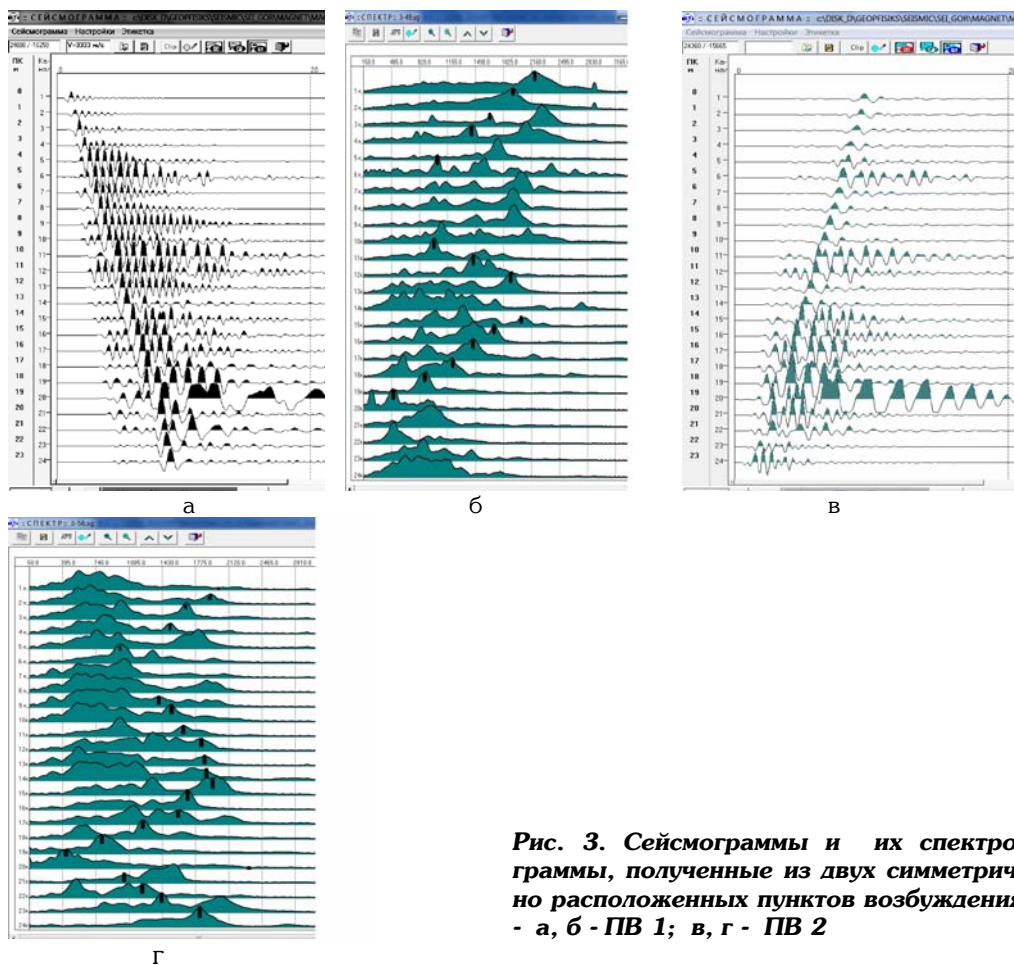


Рис. 3. Сейсмограммы и их спектрограммы, полученные из двух симметрично расположенных пунктов возбуждения - а, б - ПВ 1; в, г - ПВ 2

Для определения характера влияния упругих неоднородностей на пространственное распределение спектральных характеристик сейсмического волнового поля был выполнен спектральный анализ сейсмических данных, полученных на различных удалениях ПВ от базы наблюдения. Пример зарегистрированных сейсмограмм и определённых на их основе спектрограмм показан на рисунке 3. Визуальный анализ сейсмограмм показал, что скоростные неоднородности выделяются в структуре поля аномальными колебаниями на тех пикетах регистрации, которые расположены на границах и в пределах неод-

нородностей. Так, на контактах зоны микротрещиноватости (ПК 6, ПК 11) регистрируются продолжительные колебания, частота которых на 20% превышает частоту колебаний поперечных волн и на 30% ниже частоты продольной волны. В зоне дислоцированных пород тектонического нарушения (ПК 20) регистрируется длительное низкочастотное колебание, частота которого в 3 – 3.5 раз ниже частоты колебаний поперечной волны (рис. 3, а, 3, в). Анализ спектрограмм, определённых по волновому полю 20-ти сейсмограмм, показал, что на интервалах скоростных неоднородностей, кроме спектральных максимумов

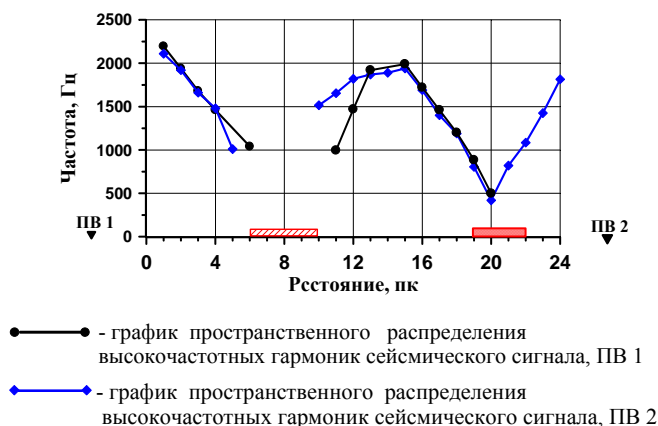


Рис. 4. Графики пространственного распределения амплитудных максимумов ультрагармоник, зарегистрированных из 2-х симметрично расположенных пунктов возбуждения – ПВ 1, ПВ 2

продольной и поперечной волн, присутствуют гармоники, частота которых превышает частоту колебаний продольной волны. Достаточно уверенная корреляция амплитудных максимумов позволяет получить графики изменения частоты ультрагармоник в зоне влияния низко модульных неоднородностей. Анализ спектрограмм, определенных по сейсмограммам, зарегистрированных на данном объекте, а так же на других объектах, показал, что на большинстве из них пространственное распределение ультрагармоник имеет закономерную форму, подобную характеру распределения напряжений в окрестности разломов [6]. Что указывает на общую закономерность изменения спектрального состава сейсмических волн при распространении их в породном массиве, включающем низко модульные неоднородности.

На рис. 4, в качестве примера приведены графики пространственного изменения частоты амплитудного максимума ультрагармоник сейсмических волн, зарегистрированных из двух симметрично расположенных пунктов

возбуждения колебаний (ПВ 1, ПВ 2). Согласно приведенным графикам, с удалением от зоны дислоцированных пород тектонического нарушения и границы зоны микротрещиноватости частота ультрагармоник линейно возрастает и, достигнув максимального значения, с большим или меньшим градиентом уменьшается. Градиенты частоты ультрагармоник восходящих ветвей в зоне влияния разлома (ПК 15 – ПК 20) и в зоне микротрещиноватости (ПК 1 – ПК 6) при возбуждении

колебаний в ПВ 1 и ПВ 2 совпадают и составляют 310 Гц/м и 230 Гц/м соответственно. Градиенты нисходящих ветвей графиков (ПК 10 – ПК 13) резко различаются и составляют для ПВ 1 - 440 Гц/м и 160 Гц/м для ПВ 2. Вероятной причиной различия градиентов частоты нисходящих ветвей графика является влияние анизотропных свойств рассланцованных горных пород в зоне динамического влияния разлома. Причиной же значительной величины градиента частоты, определенного по колебаниям, возбужденным в ПВ 1, является влияние суммарного напряжения, вызванного двумя близко расположенными низко модульными неоднородностями. Высокая концентрация напряжения на интервале ПК 11 – ПК 13 подтверждается определенным ранее напряженным состоянием породного массива методом шелевой разгрузки [13], которое составило 89,9 МПа, при фоновом значении напряжения в исследуемом блоке равным 43.6 МПа [13].

Таким образом, на основании анализа спектров сейсмических

волн, распространяющихся в локально-напряжённых зонах, сформированных низко модульными неоднородностями, можно сделать вывод о том, что, во-первых, характер пространственного распределения ультрагармоник сейсмических колебаний близок к характеру распреде-

ления напряжений, сформированных в окрестности тектонических нарушений, показанных в работе [6]. Во-вторых, градиент частоты ультрагармоник отражает изменение напряжённого состояния горных пород в окрестности тектонических нарушений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко А.А., Курленя М.В. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. №2. С. 3.
2. Ловчиков А.В., Гуменков В.П. О роли естественных и техногенных факторов в реализации горно-тектонических ударов на рудниках. \ Динамика и напряжённое состояние недр Земли. Труды международной конференции.- Новосибирск, СО РАН, 2001. – С. 243-250.
3. Егоров П.В., Редькин В.А. Мониторинг горных ударов при разработке рудных залежей с блочной структурой. // Международная конференция «Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли». – Новосибирск, 2-4 октября 2001. – С. 309-314.
4. Айтматов И.Т., Яльмов Н.Г., Кожугулов К.Ч., Рогожников О.В., Яльмов Р.Н. Формирование поля напряжений в районе активных разломов Тянь-Шаня. // Международная конференция «Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли». – Новосибирск, 4-7 октября 1999. – С. 289-294
5. Шабаров А.Н. О формировании геодинамических зон, опасных по горным ударам. / ФТПРПИ, 2001, №2. – С. 16-27.
6. Вылекжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашов В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов.- Новосибирск. Наука. Сиб. отд-ние. РАН 1990. - 205 с.
7. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. – М.: Наука. 2007. – 406 с.
8. Методические рекомендации и наказы по повышению безопасности ведения горных работ в удароопасных условиях у тектонических нарушений на шахтах СУБРа / Сост. А.А. Аксенов, Р.П. Потехин, В.С. Ломакин, А.Н. Шабаров. Североуральск, 1994. – 82 с.
9. Bodin V.V. Unlinear wave processes in the vicinity of tectonic heterogeneities by weak seismic waves. P. EGU 2009-222 .
10. Бодин В.В. Исследование нелинейных эффектов сейсмического волнового поля, вызванных тектоническим нарушением. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №4. – С. 93-97.
11. Эшелби Дж. Определение поля упругих напряжений, создаваемых эллипсоидальным включением и задачи, связанные с этой проблемой. // Континуальная теория дислокаций. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1963. – 248 с.
12. Панин В.Е., Гриняев В.И. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука. СО РАН, 1990. – 255 с.
13. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург. УрО РАН. 2001. – 335 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Бодин Валерий Викторович – старший научный сотрудник, Институт горного дела УрО РАН, e-mail: v-bodin@mail.ru

INFLUENCE OF LOCAL AND INTENSE ZONES OF TECTONIC FAULTS ON SPATIAL DISTRIBUTION OF SPECTRUM OF SEISMIC WAVES

Bodin V.V., Senior Researcher, The Institute of Mining, e-mail: v-bodin@mail.ru

Spatial distribution of ranges of the seismic waves extending in local and intense zones of tectonic faults is considered. It is shown that nature of distribution of high-frequency harmonics of seismic waves is similar to distribution of tension in a vicinity of tectonic faults.

As one of the objects of the research examines the rocks cent array, including крутопа-giving a tectonic disturbance, power deformed zones Ko-which is 3 meters. To determine the nature of the impact of elastic inhomogeneities on the spatial distribution of the spec-trawling characteristics сейсмическо-th wave field was performed spectral analysis of seismic data obtained at different distances ED from the base of observations. On the basis of the analysis of the spectra of seismic waves propagating in locally stressed zones, SFOR мированных низко модульными пот-однородностями, you can make you waters that, firstly, the nature of the spatial distribution ультрагармоник seismic stake-баний close to the character of the distribution of stresses, formed of the surroundings of tectonic disturbances shown in [6]. Secondly, gradient frequency ул-парармоник reflects the change in the pre-stressed state of the genus in the vicinity of tectonic disturbances.

Key words: geodynamic phenomena, faults, seismic exploration, seismic waves, rock mass.

REFERENCES

1. Eremenko A.A., Kurlenya M.V. *Razrabotka zhelezorudnykh mestorozhdenii v zonakh povyshennoi seismicheskoi aktivnosti* (Iron ore mining in the areas of increased seismic activity). *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayekh.* 1990. no. 2. p.3.
2. Lovchikov A.V., Gumenkov V.P. *O roli estestvennykh i tekhnogennykh faktorov v realizatsii gornotektonicheskikh udarov na rudnikakh. Dinamika i napryazhennoe sostoyanie neдр Zemli. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii.* (Natural and induced influence on rockbursting in mines. Geodynamics and stress state of the Earth's interior. International conference proceedings). Novosibirsk, SO RAN, 2001. pp. 243-250.
3. Egorov P.V., Red'kin V.A. *Monitoring gomnykh udarov pri razrabotke rudnykh zalezhei s blochnoi strukturoi. Mezhdunarodnaya konferentsiya «Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie neдр Zemli».* (Monitoring of rockburst in mining of block-structured ore bodies. Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior. International Conference Proceedings). Novosibirsk, 2-4 oktyabrya 2001. pp. 309-314.
4. Aitmatovl.T., Yalymov N.G., Kozhugulov K.Ch., Rogozhnikov O.V., Yalymov R.N. *Formirovanie polya napryazhenii v raione aktivnykh razlomov Tyan-Shanya. Mezhdunarodnaya konferentsiya «Geodina-mika i napryazhennoe sostoyanie neдр Zemli».* (Formation of stress field in the area of active faults of the Tian Shan). Novosibirsk, 4-7 oktyabrya 1999. pp. 289-294.
5. Shabarov A.N. *O formirovanii geodinamicheskikh zon, opasnykh po gomnym udaram.* (Formation of rockburst-hazardous geodynamic zones). FTPRPI, 2001, no. 2, pp. 16-27.
6. Vylekhanin V.N., Egorov P.V., Murashov V.I. *Strukturnye modeli gomogo massiva v mekha-nizme geomekhanicheskikh protsessov.* (Structural models of rock mass in the mechanism of geomechanical processes). Novosibirsk. Nauka. Sib. otd-nie. RAN 1990. 205 p.
7. Rebetskii Yu.L. *Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' gomnykh massivov.* (Tectonic stresses and strength of rock masses). Moscow. Izd. Nauka. 2007. 406 p.
8. Aksenov A.A., Potekhin R.P., Lomakin V.S., Shabarov A.N. *Metodicheskie rekomendatsii i nakazy po povysheniyu bezopasnosti vedeniya gomnykh rabot v udaroopasnykh usloviyakh u tektonicheskikh narushenii na shakhtakh SUBRa* (Recommended practice and orders on safe mining in rockburst-hazardous conditions near tectonic faults in the North Urals Bauxite Mine). Severoural'sk, 1994. 82 p.
9. Bodin V.V. *Unlinear wave processes in the vicinity of tectonic heterogeneities by weak seismic waves.* P. EGU 2009-222 .
10. Bodin V.V. *Issledovanie nelineinykh effektov seismicheskogo volnovogo polya, vyzvannykh tektonicheskimi narusheniyem. Informatsionno-analiticheskii byulleten'* (Analysis of nonlinear effects induced in the seismic wave field by a tectonic fault. Mining Information and Analysis Bulletin). Moscow. 2006. no. 4. pp. 93-97.
11. Eshelbi Dzh. *Opreделение polya uprugikh napryazhenii, sozdavaemykh ellipsoidal'nym vkluyche-niem i zadachi, svyazannye s etoi problemoi. Kontinual'naya teoriya dislokatsii* (Assessment of elastic stress field generated by an ellipsoidal inclusion and the related problems. Continuum theory of dislocations). Moscow, Izd-vo inostr. literatury, 1963. 248 c.
12. Panin V.E., Grinyaev V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniya* (Structural levels of plastic deformation and failure). Novosibirsk, Nauka. SO RAN 1990. 255 p.
13. Zubkov A.V. *Geomekhanika i geotekhnologiya. Ekaterinburg* (Geomechanics and geotechnology). UrO RAN. 2001. 335 p.