

СВЯЗЬ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ С РЕЖИМОМ ГОРНЫХ РАБОТ НА ШАХТАХ г. ВОРКУТЫ

Т.Ю. Змушко, С.Б. Турунтаев, В.И. Куликов

В статье анализируется шахтная сейсмичность Воркутинского угольного бассейна. В работе показано, что чувствительность сейсмической сети позволяет представительно регистрировать события с $K \geq 4$. Получено, что по времени большая часть событий, как по количеству, так и по энергии приурочена ко времени работы комбайна. Анализ пространственного распределения сейсмических событий показывает, что 80% всех событий происходит там, где ведутся работы по добыче угля. Эпицентры сейсмических событий располагаются вокруг выработки и до 500 м перед ней в толще массива. Вместе с тем отдельные события регистрируются на расстоянии до 3 км от места выработки. В работе показана определяющая роль горных работ в развитии сейсмического процесса на данном месторождении.

Введение

Проблема техногенной сейсмичности зачастую становится весьма значимой при разработке месторождений углеводородов и закачке жидкостей, заполнении водохранилищ, горных работах, а также при крупномасштабных подземных взрывах. Более чем на половине разрабатываемых в нашей стране месторождений наблюдаются сейсмические события, связанные с добычей полезных ископаемых. Шахтные техногенные землетрясения (горные удары), приводят к крупным авариям, большому материальному ущербу и человеческим жертвам. Своевременный прогноз катастрофических горных ударов и заблаговременные меры по снижению риска нарастания техногенной сейсмической активности позволят избежать роста затрат на эксплуатацию месторождения и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций.

Прогноз техногенных землетрясений имеет ряд отличий от прогноза естественных землетрясений. В частности, не ставится вопрос о месте техногенного землетрясения: оно ожидается в районе воздействия на недра. В силу самой обусловленности техногенного сейсмического процесса воздействием человека, этот процесс не может рассматриваться как случайный, стохастический. При этом становится возможной постановка задачи по уменьшению риска появления катастрофического сейсмического события путем изменения технологии ведения подземных работ или применения каких-либо специальных мер воздействия на породный массив с целью заблаговременного снижения опасного уровня напряжений.

Техногенная сейсмичность связана, главным образом, с изменением напряженного состояния среды, изменением порового или пластового давления, перемещением объемов жидкости внутри среды, изменением величин приложенных сил и нагрузок. Согласно принятой классификации [Адушкин, Турунтаев, 2005] техногенная сейсмичность подразделяется на индуцированную и триггерную. Индуцированная сейсмичность – реакция среды на техногенные воздействия в условиях невысокого уровня естественных тектонических напряжений и накопленной энергии, когда без внешнего воздействия землетрясение не произошло бы. Гипоцентры таких землетрясений находятся на небольшом расстоянии или в пределах объекта, оказывающего воздействие. Ярким примером индуцированной сейсмичности могут служить горные удары, возникающие при подземных работах. Триггерная сейсмичность возникает в районах с высоким уровнем естественных напряжений за счет высвобождения собственной накопленной энергии. В таком случае даже слабое воздействие может привести к сильным землетрясениям. Энергия землетрясения зависит не столько от энергии воздействия, сколько от энергии, накопленной в массиве, вследствие чего она может значительно превышать энергию воздействия.

Сейсмические события, происходящие при горных работах, можно разделить на слабые динамические явления с энергией меньше 10^4 Дж (шелушение, стрелание, заколообразование, толчки и микроудары) и сильные явления с энергией 10^4 – 10^9 Дж (собственно горные удары). Слабые горные удары, как правило, хорошо коррелируют с временем проведения работ и располагаются вблизи от местоположения выработок. Хотя известны случаи горно-тектонических ударов, произошедших в первые минуты после проведения массовых взрывов, сильные горные удары могут не иметь привязки ни ко времени, ни к месту проведения работ. Имеющийся опыт показывает, что каждый породный массив по-своему реагирует на воздействие в ходе подземных работ, которое, в свою очередь, определяется технологией, принятой на данном месторождении. В связи с этим методики прогноза и предупреждения горных ударов, разработанные для одного месторождения, нельзя переносить без адаптации на другое месторождение: необходимо проводить предварительные исследования в условиях конкретных объектов.

Целью данной работы является анализ техногенной сейсмичности Воркутинского угольного бассейна, определение связи шахтной сейсмичности с временными и пространственными параметрами ведения шахтных работ. Разработка Воркутинского угольного месторождения осложнена негативными геодинамическими явлениями в углевмещающем горном массиве, к числу которых относят горные удары и пылегазовые взрывы. Явления обусловлены аномалиями напряженно-деформированного состояния горного массива и инициируются проходкой шахтных горных выработок, извлечением горной породы, дегазацией угля. Это локальные сейсмические явления, которые до настоящего времени практически не изучались. Их изучение важно, прежде всего, для прогноза геодинамических явле-

ний, выделения зон риска сейсмических событий и обеспечения безопасности разработки месторождения.

В настоящей работе получены оценки углов наклона графиков повторяемости землетрясений на рассматриваемых месторождениях в сопоставлении с естественной сейсмичностью, исследована зависимость вариаций сейсмической активности от режима шахтных работ, изучено пространственное распределение источников сейсмических событий и их привязанность к непосредственному месту работ по добыче угля, проанализировано распределение количества событий и выделяемой энергии в течение исследуемых периодов по пространству.

Характеристика района работ и используемых данных

Воркутинское месторождение расположено в северо-восточной части Воркутинского угленосного района в среднем течении р. Воркуты, в тундровой зоне Коми. Месторождение имеет форму мульды с длинной осью, ориентированной в направлении с северо-востока на юго-запад. По контуру мульды расположены поля шахт: «Северная», «Южная», «Аяч-Яга», «Октябрьская», «Заполярная», «Юр-Шор», «Центральная», «Промышленная», «Воркутинская», «Комсомольская». Площадь месторождения 300 кв. км. Общие ресурсы оценены в 2,2 млрд т, разведанные запасы – 1,145 млрд т. Добыча ведется с 1934 г. подземным способом. Достигнутая глубина разработки – 1040 м. Суммарная добыча на шахтах составляет 12,3 млн т в год. Половина шахт – опасные по внезапным выбросам угля и горным ударам.

В данной работе анализировались сейсмические события, происходящие на шахтах «Комсомольская» и «Северная». Шахта «Комсомольская» является самой глубокой угольной шахтой России: работы ведутся на глубинах порядка 1100 м. Поле шахты «Комсомольская» расположено в западном крыле Воркутинской мульды, на расстоянии 11 км от г. Воркуты. Шахта «Северная» создана на базе групповой реконструкции шахт с увеличением добычи до 2,1 млн т угля в год.

При разработке шахты проходятся два горизонтальных штрека: вентиляционный и конвейерный. Пространство между ними разделяется на лавы – прямоугольные участки. Комбайн проходит от края до края лавы, в направлении от конвейерного к вентиляционному штреку, срезая уголь. По конвейерному штреку осуществляется вывоз руды.

В шахтных полях шахт «Комсомольская» и «Северная» размещены локальные геоинформационные сейсмические сети (ГИТС), разработанные ВНИМИ (НИИ Горной геомеханики и маркшейдерского дела). Каждая сеть состоит из двенадцати трехкомпонентных акселерометров, установленных в семиметровых горизонтальных скважинах, которые пробурены в стенках шахтных выработок. Расстояние между соседними акселерометрами от 200 м до 1 км. Сеть акселерометров охватывает практически все шахтное поле, разрабатываемые лавы находятся в пределах сети.

Каталог сейсмических событий шахты «Комсомольская» содержит 9020 записей, шахты «Северная» – 6140 за период с 01.09.2008 по 15.04.2011 гг. Максимальный энергетический класс землетрясения $K = 7,8$ (событие произошло 03.11.2008). Каталоги содержат данные о времени сейсмического события, его координатах и сейсмической энергии. Координаты сейсмического события рассчитывались по времени прихода продольной волны с погрешностью 10 метров, при этом глубина

события определялась с большой погрешностью, поскольку все датчики располагаются примерно на одном горизонте.

Энергия сейсмического события на Воркутинском угольном месторождении рассчитывалась по эмпирической формуле зависимости энергии от длительности цуга колебаний, в котором амплитуда колебаний превышала фоновую больше, чем в 3 раза. Такой расчет не является точным, и для уточнения энергии событий на территории шахты «Комсомольская» были использованы записи трехкомпонентной сейсмостанции ИДГ РАН, по данным которой для 50 событий был проведен корректный расчет энергии по методике Раутиан Т.Т. Согласно [Раутиан, 1960г], величина сейсмической энергии характеризуется потоком энергии упругих волн через замкнутую полусферическую поверхность S с центром в фокусе сейсмического события за время τ , в течение которого происходят колебания.

$$E = \int_0^{\tau} \int_S (\vec{P} \cdot \vec{n}) ds dt$$

Здесь $\vec{P}$ – вектор плотности потока энергии в точках поверхности S , по которой производится интегрирование, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к площадке ds . Для однозначности определения потока энергии в качестве поверхности S берут референц-сферу радиуса $R_0 = 10$ км. Зарегистрированную на расстоянии R сейсмограмму пересчитывают к расстоянию R_0 , для чего используется экспериментально полученный по сейсмическим записям взрывов [Гончаров, Куликов, 2010] закон затухания амплитуды сейсмической волны:

$$V = 5030 \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1.7}$$

В результате получим:

$$E = 2\pi \cdot R_0^2 \cdot \rho \cdot C \cdot \left(\frac{R}{R_0} \right)^{2n} \int_0^{\tau} V^2 dt$$

Поток сейсмической энергии вычисляют в Дж, класс сейсмических событий по определению равен логарифму энергии.

Рассчитанная энергия сравнивалась с энергией, оценивавшейся по данным шахтной сети, определялся коэффициент пересчета. Таким образом, энергия всех сейсмических событий в использовавшемся каталоге была пересчитана в соответствии с методом Раутиан [Раутиан, 1960].

Результаты

График повторяемости. Согласно закону повторяемости (или закону Гуттенберга–Рихтера) между сейсмической энергией и количеством событий данной энергии в логарифмических координатах существует линейная связь:

$$\lg N = \alpha - \gamma K,$$

где $K = \lg(E)$. Коэффициент γ отражает соотношение между числом сильных и слабых сейсмических событий, свободный член α – суммарную активность событий в горном массиве. Отклонение от закона Гуттенберга–Рихтера в области слабых сейсмических событий свидетельствует о недостаточной чувствительности сейсмологической сети; отклонение в области сильных сейсмических событий – о недостаточ-

ной длительности периода наблюдений. Линейный участок графика повторяемости определяет диапазон представительных событий для данной сейсмической сети. Из рис. 1 видно, что чувствительность сейсмологической сети позволяет представительно регистрировать события с $K \geq 4$. Тангенс угла наклона графика повторяемости равен $-0,57$ для «Комсомольской» и $-0,67$ для «Северной» шахт.

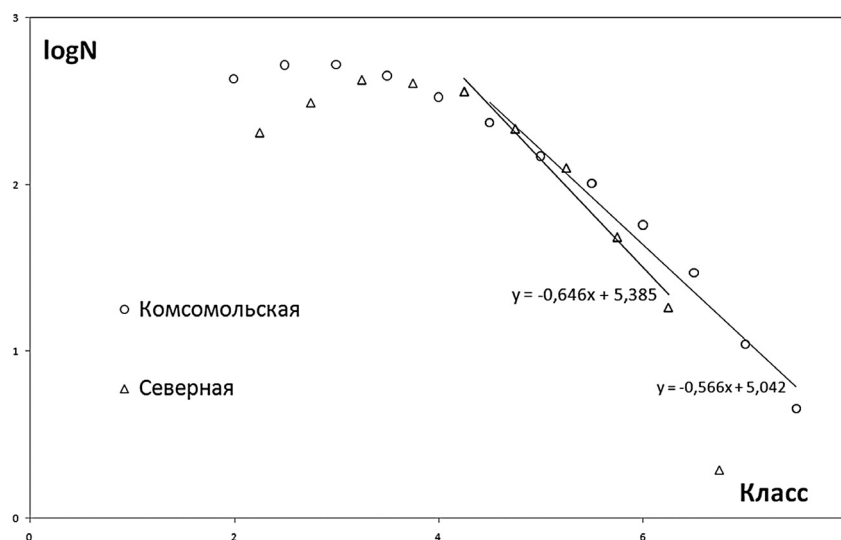


Рис. 1. График повторяемости сейсмических событий на шахтах «Комсомольская» и «Северная».

По данным каталога «Евразия» за последние 300 лет, [Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии, 1993] был рассчитан тангенс угла наклона для естественной сейсмичности района Северного Урала и найдено, что он составляет $-0,55$.

Таким образом, тангенс угла наклона для шахтной сейсмичности оказался выше, чем для естественной, что наблюдается и в других случаях техногенной сейсмичности [Адушкин, Турунтаев, 2005].

На основании графика повторяемости в дальнейшем непредставительными событиями будут называться события с $K < 4$, представительными событиями — с $K \geq 4$.

Изменение сейсмической активности во времени. Рассмотрим изменение сейсмической активности на шахтах со временем. В качестве меры сейсмической активности используем сумму корней кубических из энергии событий за месяц ($\sum E_i^{1/3}$) и количество событий за месяц, рассмотрим также изменение во времени энергии, приходящейся на одно событие. На рис. 2 приведены полученные кривые для шахт «Северная» и «Комсомольская», сглаженные скользящим окном с перекрытием 60%.

Из рис. 2 можно видеть, что если во время невысокого уровня сейсмической активности отношение суммы корней кубических из энергии к количеству событий со временем почти не меняется, (на одно событие приходится одно и то же количество энергии), то рост активности проявляется прежде всего в увеличении средней энергии событий и в большей вариабельности этой величины.

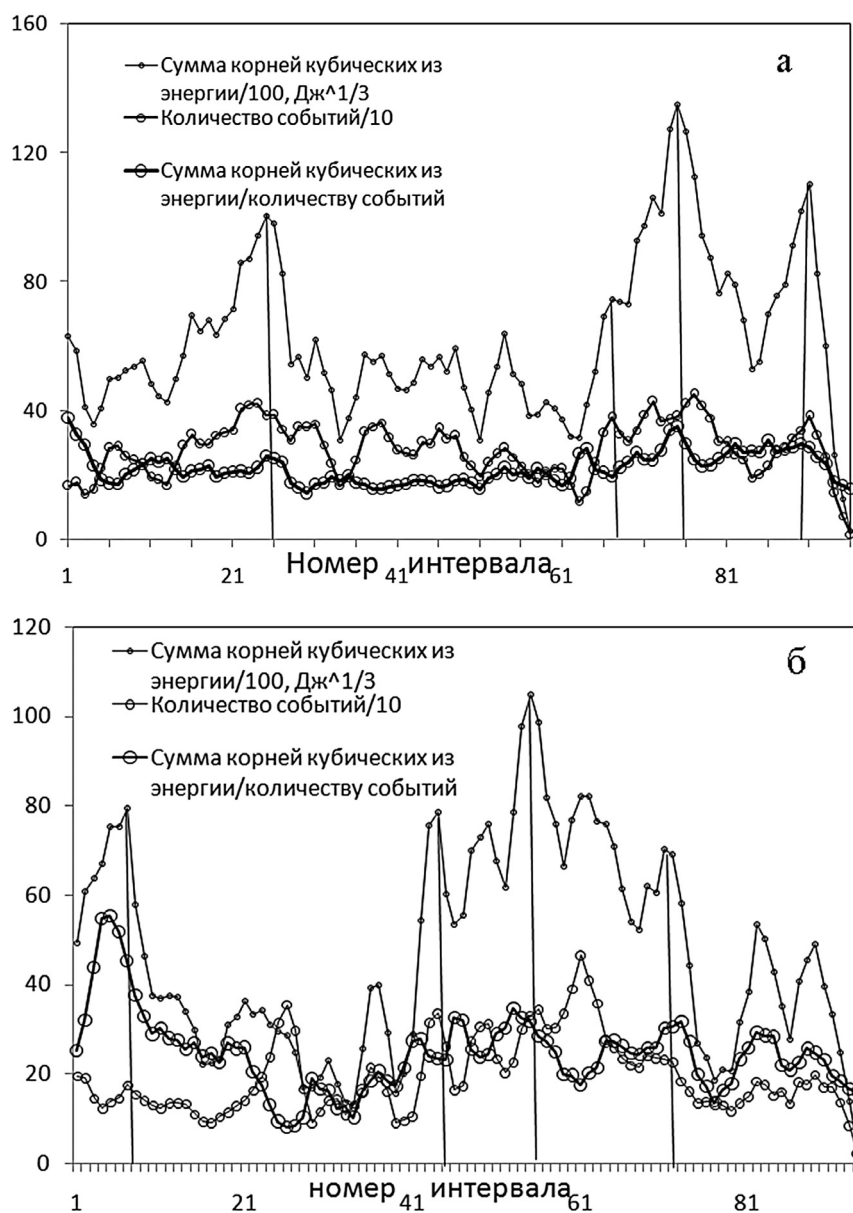


Рис. 2. Зависимость суммы кубических корней из энергии сейсмических событий, количества событий и их отношения от времени: а) на шахте «Комсомольская», б) на шахте «Северная».

Сопоставляя пики энергии и отношения $(\sum E_i^{1/3})/N$ можно заметить, что максимум зависимости доли энергии, приходящейся на одно событие, от времени обычно несколько отстает от максимума зависимости энергии от времени, т.е. энергетический класс событий вначале нарастает, а непосредственно перед сильным событием начинает спадать. Следует ожидать, что более детальный анализ позволит выявить сейсмические затишья перед сильными горными ударами.

Пространственное изменение сейсмической активности. Рассмотрим распределение сейсмической активности по пространству. На рис. 3–4 показаны области, в пределах которых выделявшаяся за рассматриваемый период сейсмическая энергия или количество событий имеют различные значения, соответствующие разной интенсивности окраски этих областей.

На шахтных полях обеих шахт области, в которых произошло максимальное количество сейсмических событий и выделилось максимальное количество сейсмической энергии, соответствуют более светлым областям. При сопоставлении этих пространственных распределений концентраций эпицентров и концентраций выделяемой сейсмической энергии можно видеть, что эти области практически совпадают.

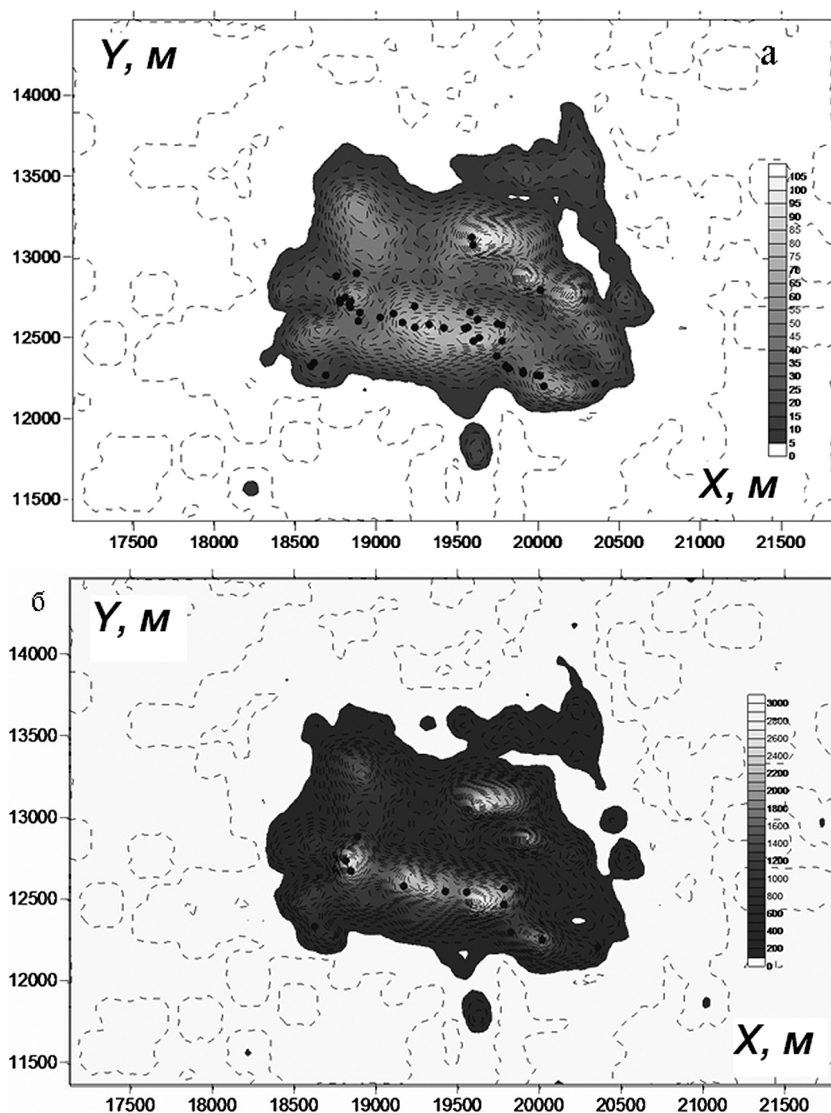


Рис. 3. Изоклины количества сейсмических событий (а) и выделяемой сейсмической энергии (б) на шахте «Комсомольская».

Точками показано положение эпицентров сейсмических событий с $K \geq 6,5$.

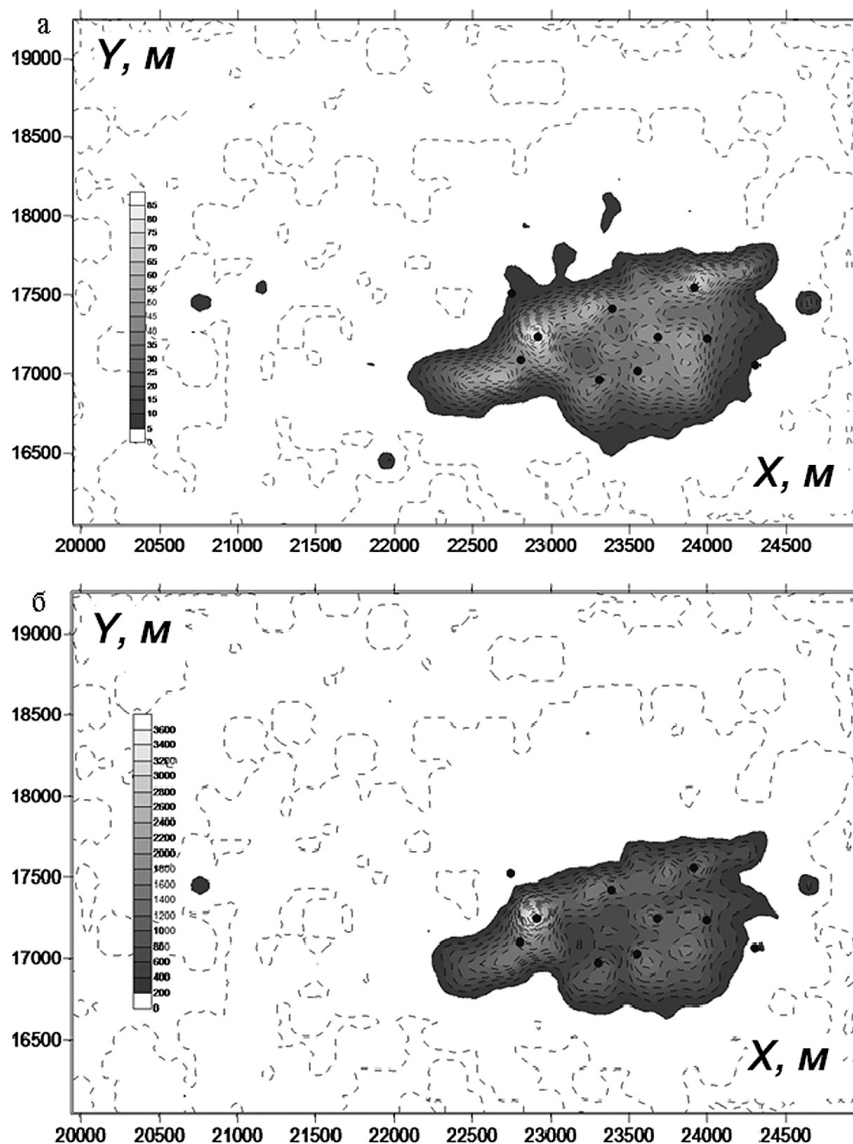


Рис. 4. Изоклины количества сейсмических событий (а) и выделяемой сейсмической энергии (б) на шахте «Северная». Точками показано положение эпицентров сейсмических событий с $K \geq 6$.

На рис. 3–4 показано также положение эпицентров событий с $K \geq 6,5$. Видно, что большая часть сильных событий пространственно приурочена к областям, в которых количество событий и выделяемая сейсмическая энергия максимальны, однако некоторые сильные события происходят и на краю активизации в нетронутым массиве.

Связь сейсмичности с шахтными работами. На рис. 5 приведены зависимости количества событий и суммы энергий событий, произошедших за час, от времени суток. В нижней части графиков прямоугольниками показаны интервалы времени, когда работа комбайна на шахтах прекращалась (пересменки, сравнимые по времени с часом, и профилактика техники, занимающая 6 часов).

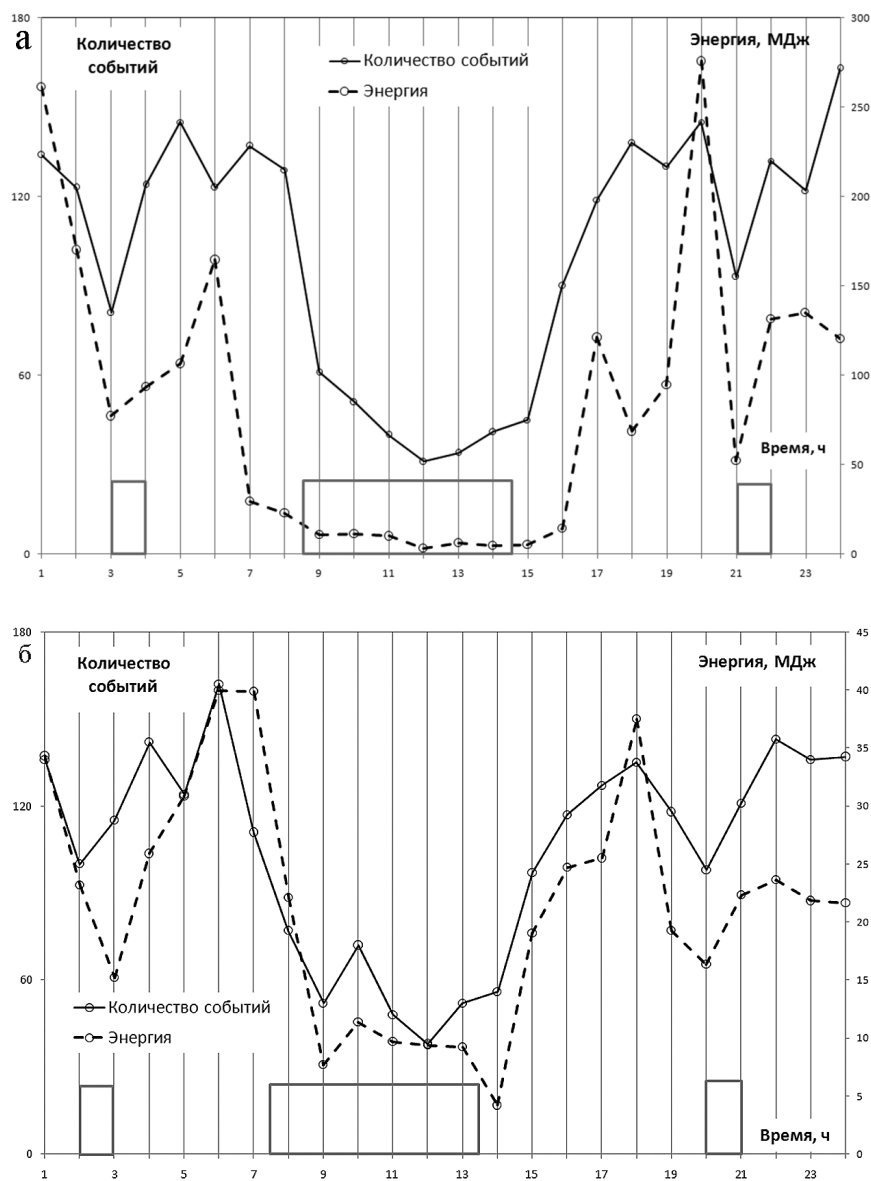


Рис. 5. Зависимость количества сейсмических событий и суммы их энергий от времени суток для всех событий: а) на шахте «Комсомольская», б) на шахте «Северная».

Из графиков видно, что на обеих шахтах количество сейсмических событий во время длительного перерыва в работе комбайна снижается в 3–5 раз по отношению к количеству сейсмических событий во время его работы.

На рис. 5 видно, что энергия сейсмических событий также коррелирует с режимом работ. Примечательно, что сейсмическая активность во время работы комбайна постепенно возрастает. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что количество событий и сумма энергий событий за час хорошо коррелируют с режимом работ комбайна – источника воздействия на массив.

Для определения связи между горными работами и распределением сейсмической активности по пространству на координатную плоскость наносились места ведения работ и положения эпицентров сейсмических событий за этот период (рис. 6).

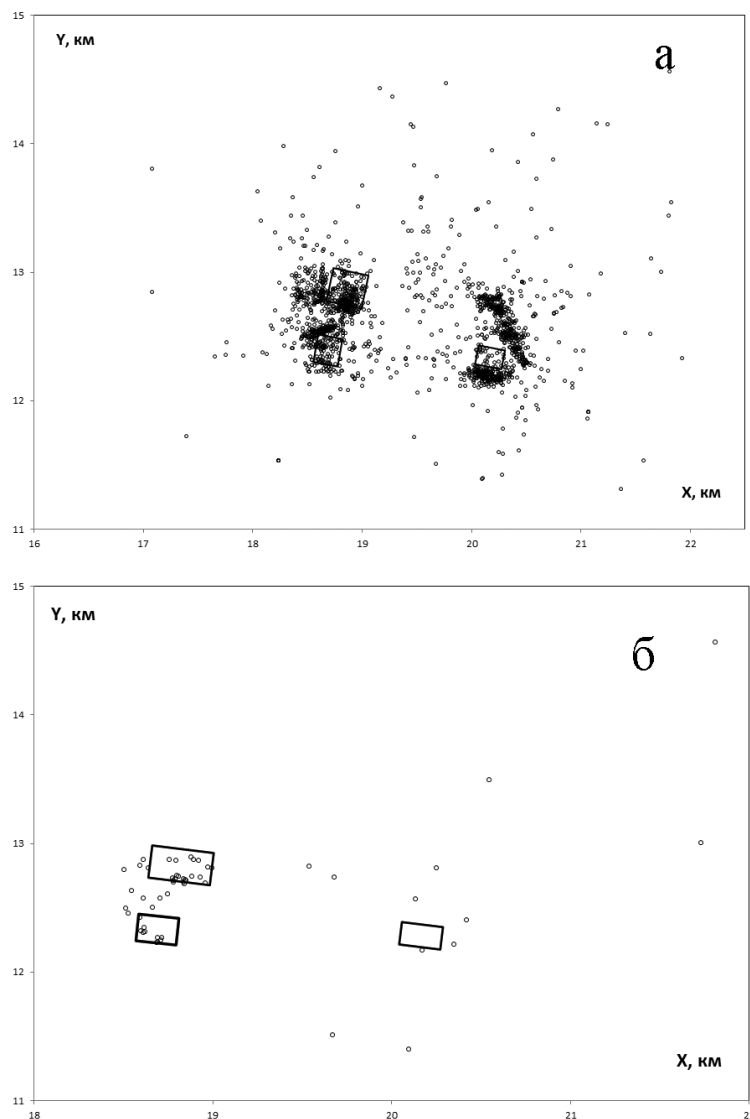


Рис. 6. Пространственное распределение сейсмических событий и разрабатываемых лав на шахте «Комсомольская»: а) все события б) события с $K > 6$.

На обеих шахтах около 85% эпицентров представительных сейсмических событий расположено не далее 0,5 км от места ведения работ. Максимальное удаление эпицентров от разрабатываемых лав не превышает 3 км. Направление прохождения лав на рис. 6 справа налево. Из рис. 6,а видно, что перед лавами (обозначенными прямоугольниками) концентрация событий значительно меньше, чем после них, то есть сейсмическая активность в отработанном массиве падает после окончания работ в нем, тог-

да как в нетронутом массиве непосредственно перед местом разработки количество сейсмических событий сравнимо с количеством событий в самом месте разработки.

Наибольший интерес представляет расположение сильных событий $K > 6$, потому что именно они представляют наибольшую опасность для людей и выработок. На рис. 6,б видно, что также примерно 85% сильных событий происходит в районе разработок.

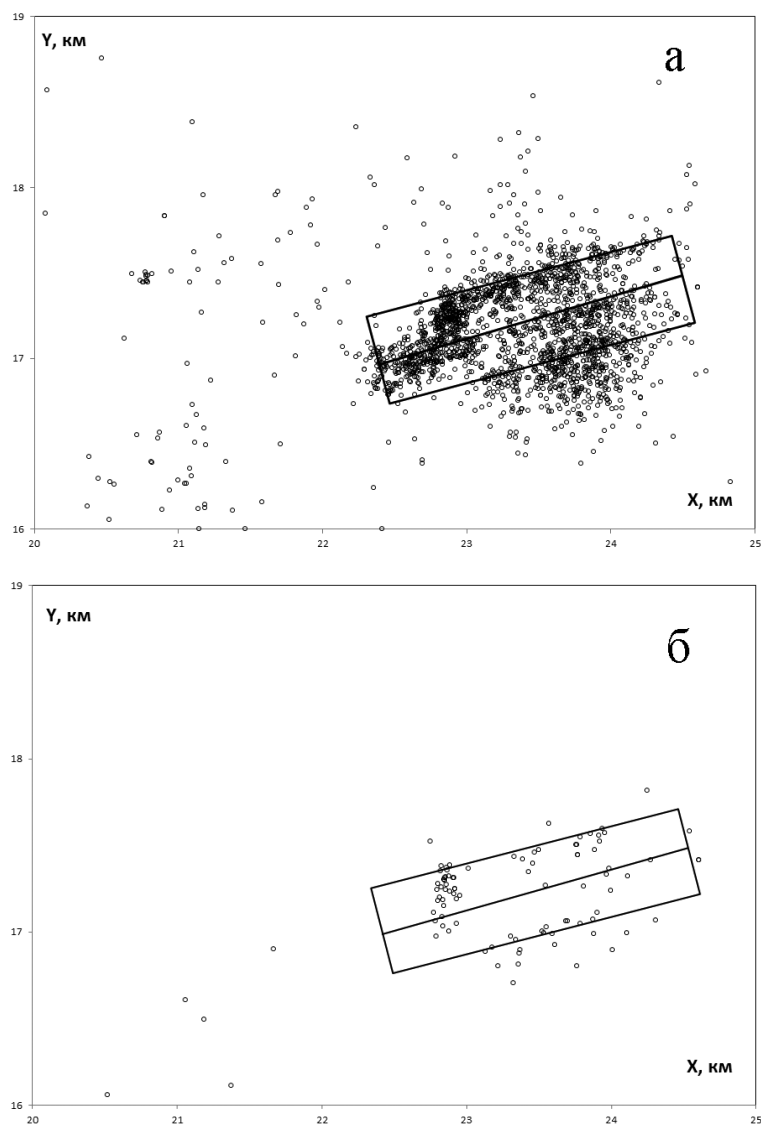


Рис. 7. Пространственное распределение сейсмических событий на шахте «Северная» во время работы комбайна и место разработки: а) $K \geq 4$, б) $K \geq 6$.

На шахте «Северная» для представительных событий ($K \geq 4$) (рис. 7) большая часть событий происходит в пределах или около разрабатываемых лав, однако некоторые из них удалены на расстояние до 3 км от места разработки.

Рассмотрим пространственное распределение сейсмических событий во время перерыва в работе комбайна (рис. 8). Следует заметить, что хотя этих событий намного меньше, общая картина привязанности к разрабатываемым лавам сохраняется. Для очень сильных событий (рис. 8, б) более 90% происходит в пределах или около разрабатываемых лав.

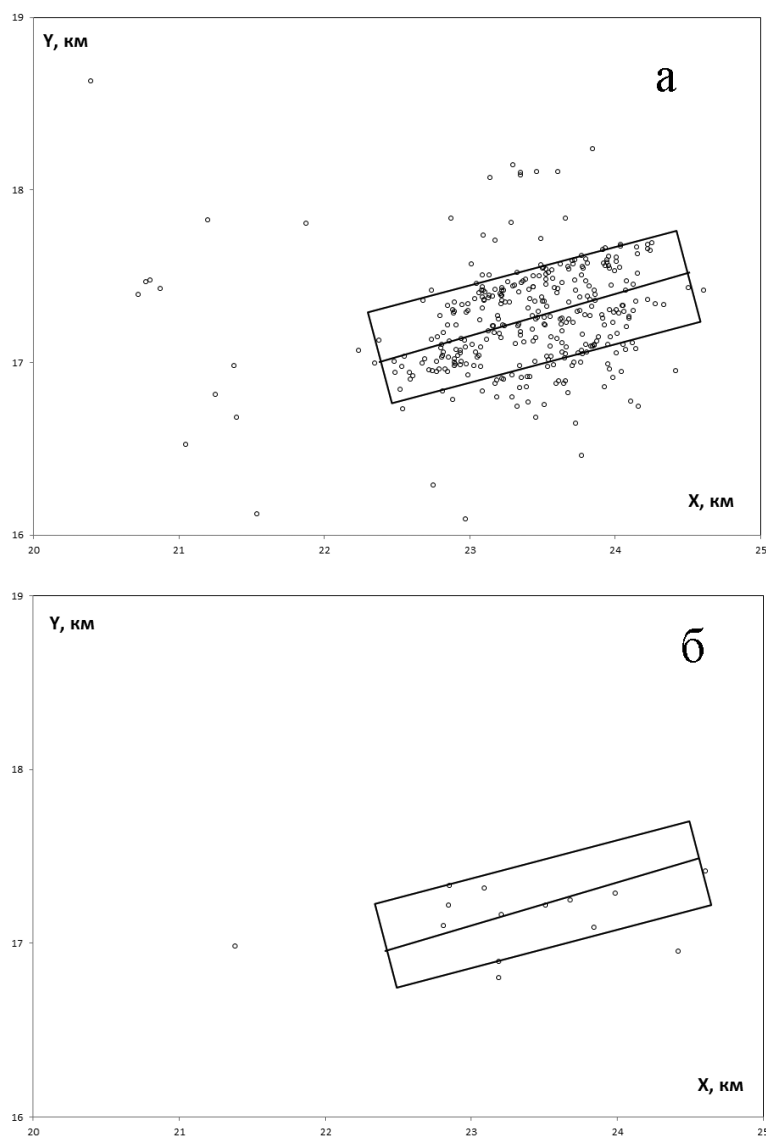


Рис. 8. Пространственное распределение сейсмических событий на шахте «Северная» во время перерыва в работе комбайна: а) $K \geq 4$, б) $K \geq 6$.

Исходя из построенных зависимостей, можно сказать, что как во время перерыва, так и во время работы комбайна, большая часть событий всех энергетических классов происходит в непосредственной близости от разрабатываемых лав.

На рис. 9 показаны изоклины количества событий и выделения сейсмической энергии в то время, когда разрабатывались показанные на этих рисунках лавы.

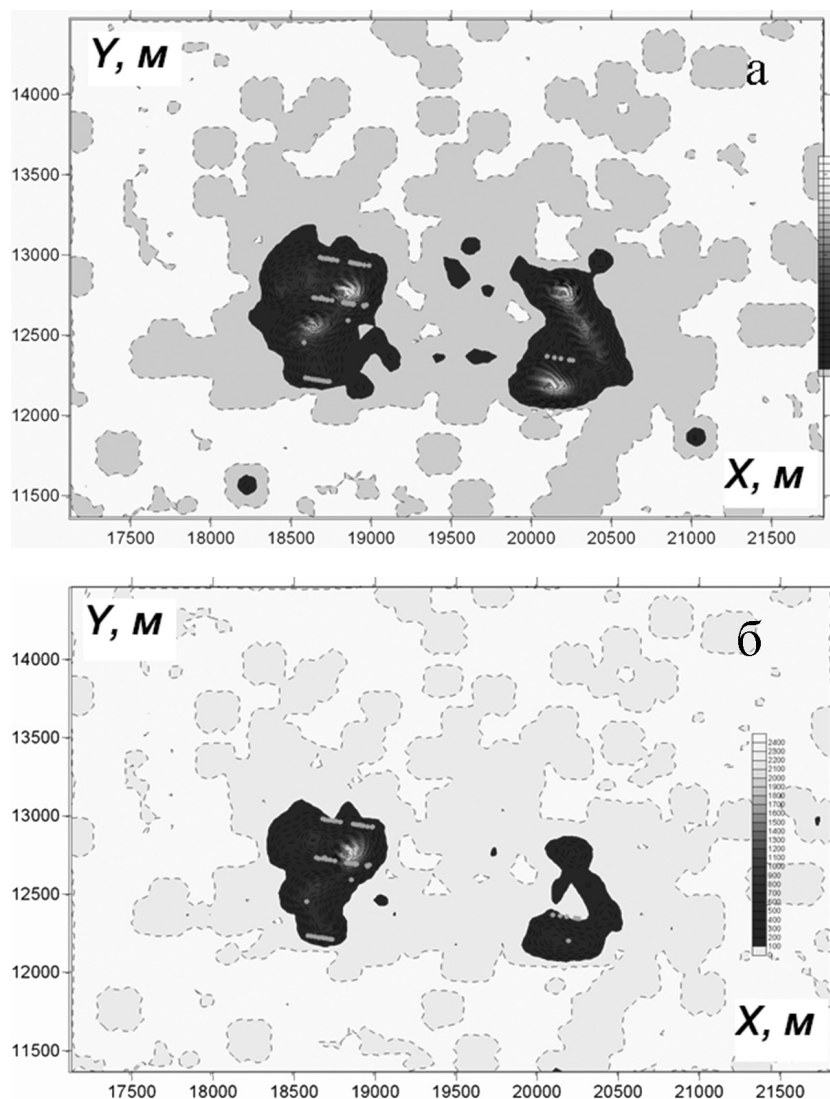


Рис. 9. Изоклины количества событий (а) и выделения сейсмической энергии (б) на шахте «Комсомольская».

Показаны разрабатываемые в этот период лавы

Из полученных карт можно видеть, что максимальная сейсмическая активность приурочена к положению разрабатываемых в это время лав.

Заключение

В работе найдено, что углы наклона графиков повторяемости рассмотренных шахтных сейсмических событий имеют большее значение, чем в случае естествен-

ной сейсмичности. Получено, что количество сейсмических событий, происходящих за час, во время работы комбайна, нарезающего уголь в выработке, превышает количество событий во время перерыва в работе в 3–5 раз. Сумма энергий событий, происходящих за час, во время работы комбайна превышает аналогичную величину во время перерыва в 2,5–6 раз.

Пространственное распределение сейсмических событий показывает, что 80% эпицентров всех событий приурочено к месту проведения работ и располагается вокруг выработки и до 500 м перед ней в толще массива. Вместе с тем отдельные события регистрируются на расстоянии до 3 км от места выработки.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что основное число сейсмических событий на Воркутинском угольном месторождении происходит во время работ комбайна и пространственно приурочены к разрабатываемой лаве. Найдена связь между сейсмичностью на данных месторождениях и проводимыми на них работами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 4 Президиума РАН, РФФИ (проект 10-05-00638) и гранта Президента для ведущих научных школ РФ (грант НШ-4304.2010.5).

Литература

Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК. 2005. 251 с.

Раутиан Т.Т. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений // Труды ИССС АН Таджикской ССР, в. 7, 1960, с. 41–66.

Гончаров А.И., Куликов В.И. Геодинамические явления в Воркутинском угольном бассейне // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2010, с. 269–277.

Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 1993 г. / под ред. Н.В. Кондорской и В.И. Уломова. М.: 1993. 536 с.