

УДК 622.831.32: 550.348.42

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ
ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ**

Д. В. Яковлев, С. В. Цирель, С. Н. Мулев

*АО “Научно-исследовательский институт горной геомеханики
и маркшейдерского дела” — Межотраслевой научный центр ВНИМИ,
E-mail: vnimioao@yandex.ru,
21-я линия, 6, лит. А, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

Описываются особенности развития природно-техногенной сейсмичности, трансформация графиков повторяемости при переходе от природной сейсмичности к природно-техногенной в горнодобывающем регионе и от техногенной сейсмичности на шахтах и рудниках к природно-техногенной. Показана сложная связь техногенной сейсмичности со сдвижением (оседанием) вышележащей толщи на рудниках — сейсмический процесс развивается вместе с оседанием, но в годы максимальных скоростей оседания сейсмическая активность снижается и возрастает при остановках и замедлениях процесса сдвижения. Особое внимание уделено оценкам сейсмической активности на подземных горных предприятиях; подробно описана методика, использующая комплексный параметр F , апробированная на ряде рудников и шахт и скорректированная на основании почти десятилетнего опыта применения.

Сейсмические события, землетрясения, горные работы, график повторяемости, сдвижение, сеть сейсмостанций, геодинамический мониторинг, оценки опасности, прогноз

Впервые влияние техногенных процессов на сейсмичность было отмечено при заполнении водохранилищ после строительства плотин еще в конце 30-х годов прошлого века [1–4]. Так как сейсмическая активность более всего реагировала на заполнение крупных водохранилищ, то поначалу полагали, что основным фактором является масса воды. Однако ряд наблюдений (в том числе изменения сейсмической обстановки после закачки жидких отходов в скважины [5]) показал, что основное влияние оказывают другие факторы — уменьшение горного давления из-за подъемной силы (противодавления) воды, изменения коэффициента трения по сейсмогенным разломам, перераспределение напряжений в массиве, в том числе нарушения квазиравновесного состояния механической системы “горный массив – жидкость – газ”.

Влияние горных работ на сейсмическую активность, за исключением локальных динамических событий в зоне ведения горных работ и в оседающем массиве над ними, длительное время было предметом дискуссий [6–8]. Однако в последние 15–20 лет в России и в мире научное сообщество пришло к мнению, что горные работы влияют на сейсмическую активность не только самой зоны ведения горных работ, но и более широких областей [3, 9, 10]. В то же время закономерности развития техногенной сейсмической активности до сих пор остаются предметом дискуссий [10–19].

Прежде чем перейти к выявленным закономерностям, рассмотрим определение и классификацию форм техногенной сейсмической активности [2, 4], предложенные А. В. Николаевым и В. В. Адушкиным (рис. 1).

Техногенной сейсмичностью называют микроколебания, сейсмические толчки и землетрясения, возникающие в земной коре при любых антропогенных воздействиях на окружающую среду либо появляющиеся и развивающиеся вслед за воздействием уже с участием собственных энергетических запасов в самих структурах земной коры.

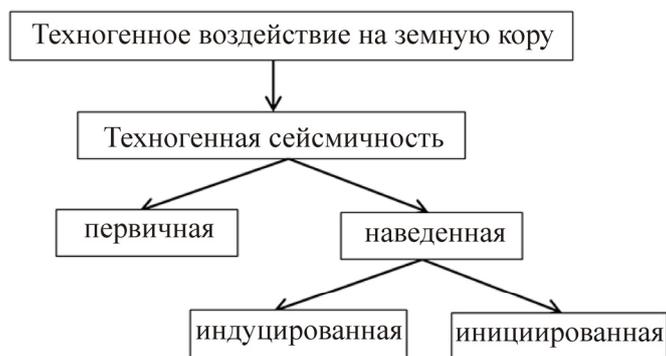


Рис. 1. Классификация техногенной сейсмичности А. В. Николаева и В. В. Адушкина

В приведенной на рис. 1 классификации [2, 4] *первичная техногенная сейсмичность* — это сейсмические колебания, вызванные непосредственно ведением горных и взрывных работ, а также событиями в горных выработках (обрушения, горные удары, динамические события в ходе оседания массива), т. е. тот вид техногенной сейсмичности, в существовании которого не было сомнений. *Наведенная техногенная сейсмичность* — это сейсмические колебания, возникающие в земной коре после или в процессе какого-либо постоянно действующего техногенного возмущения. Наведенная сейсмичность в свою очередь подразделяется на индуцированную (возбужденную или вынужденную) и инициированную (триггерную) сейсмичность. *Индуцированная сейсмичность* возникает как реакция горного массива на техногенное воздействие, в том числе ведение горных работ, и без воздействия не появляется. *Инициированная сейсмичность* является результатом высвобождения под техногенным воздействием собственных избыточных запасов энергии горного массива, содержащихся внутри него в виде некоторой области высокого напряженного состояния или готового очага землетрясения. Техногенное воздействие в этом случае только ускоряет или запускает (является триггером) процесс высвобождения избыточных напряжений массива или срабатывания существующего очага землетрясения.

Эта классификация удобна, но сильно упрощает ситуацию. Во-первых, отметим, что весьма важным или основным источником энергии техногенной сейсмичности, даже согласно приведенному выше определению, являются тектонические процессы, поэтому корректнее говорить о природно-техногенной сейсмичности. Во-вторых, развитие природно-техногенной сейсмичности идет в двух противоположных направлениях [3, 10]. Проведенный анализ этих процессов показывает, что в асейсмичных и сейсмически спокойных регионах преобладает движение от первичной сейсмичности к инициированной и далее от нее к индуцированной, т. е. сейсмоактивность распространяется от мест добычи полезных ископаемых (или других антропогенных воздействий). В то же время существует и встречное движение, наиболее заметное в сейсмически активных регионах, заключающееся в том, что техногенные процессы модифицируют естественную сейсмичность, ведут к стягиванию сейсмических событий к зонам ведения горных работ, а также изменениям их глубин, графиков повторяемости сейсмособытий, активности тех или иных разломов.

В качестве примера преобладания центробежного развития можно привести трансформацию сейсмической активности Кольского полуострова (рис. 2 [20])*.

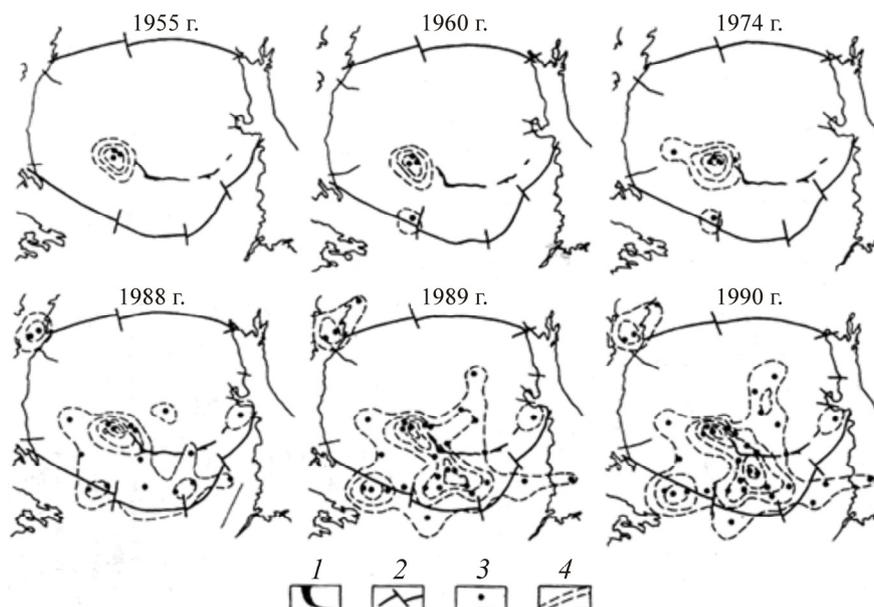


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений с $M > 2$ в Хибинах на различных этапах отработки руд: 1 — апатито-нефелиновые месторождения; 2 — разломы, обрамляющие Хибинь; 3 — эпицентры землетрясений; 4 — изолинии плотности землетрясений

Другими примерами распространения сейсмической активности от мест ведения горных работ являются соляные месторождения Урала, каменноугольные (Рурский бассейн) и рудные месторождения Германии, угольные бассейны (Нижнесилезский) Польши и др.

В Кузнецком угольном бассейне наблюдаются оба явления — как стягивание сейсмической активности к местам ведения горных работ (малоглубинные землетрясения вблизи Таштагола, Междуреченска, Прокопьевска), так и распространение шахтной сейсмоактивности на окружающий район. Техногенные сейсмические процессы 2005–2015 гг. на территориях шахтерских городов Кузбасса (Полысаево, Осинники, Бачаты и др.) в периоды максимальных активизаций захватывают зоны радиусом 20–30 км и более, причем проявляются не только в форме “роевых” неглубоких малоамплитудных сейсмособытий, но также достаточно мощных землетрясений, включая землетрясение в районе Белово магнитудой $M_s = 5.2$, произошедшее 19.06.2013 г.

Возрастание региональной сейсмоактивности и изменения географии ее распространения определяются перестройками напряженно-деформированного состояния больших участков горных массивов. Проведенные ранее исследования [10] показали, что природно-техногенная сейсмоактивность в Кузбассе в большей степени связана со слабо проявленными в рельефе глубинными разломами, чем с известными региональными разломами. На первый взгляд, активизация региональных и особенно глубинных структур в результате сугубо поверхностных техногенных воздействий представляется парадоксальной. Суть этого явления, по-видимому, заключается в том, что изменения напряженно-деформированного состояния массива ведут к концентрациям напряжений на замыканиях формирующихся разрывов и их ускоренному росту, сопровождающемуся динамическими проявлениями.

*Нельзя исключить, что частично процесс распространения сейсмоактивности от мест ведения горных работ к периферийным районам связан с совершенствованием наблюдательной сети, развивающейся в тех же направлениях.

Другой пример “неожиданного выбора разлома” — Нефтегорское землетрясение 27.05.1995 г., имеющее, по-видимому, смешанный природно-техногенный характер. Несмотря на близость к основной сейсмогенной структуре — Сахалино-Хоккайдскому разлому, подвижка произошла по вторичному Верхне-Пильтунскому разлому, причем едва ли не по всей его длине [21]. Еще более наглядными являются результаты исследований ГС СО РАН [15], обнаружившие роевые мало-глубинные сейсмические активизации не только на территориях действующих шахт, но и на удалении от них на 5–10 км, не имеющие прямой связи с ведением горных работ.

Важно отметить, что если сейсмоактивность на шахтах и рудниках или вблизи крупных карьеров непосредственно следует за ведением горных работ (проведением массовых взрывов, работой добычных комбайнов, обрушениями руды в камерах или пород кровли в выемочных столбах и т. д.), то уже на удалении 3–5 км от них непосредственная связь с горными работами нивелируется. Основным фактором выступают не скорость выемки или энергия взорванных ВВ, а общая степень нарушения равновесия массива, мерами которого может служить суммарная извлеченная горная масса [20] и/или изменения уровней и давления подземных вод и других флюидов (газа, нефти) [3].

Механизмы столь сильного влияния относительно малых локальных техногенных процессов на сейсмическую активность больших регионов требуют дополнительных исследований. Наиболее обоснованной представляется гипотеза о роли деформационных или маятниковых волн [22–25], согласно которой перестройки геодинамических процессов обусловлены взаимодействиями между блоками, при которых длительность и масштаб явлений определяются не скоростями распространения упругих волн, а жесткостью и добротностью межблоковых (разломных) зон и соотношениями размеров этих зон с размерами блоков. Изменения характеристик одного блока с оконтуривающими его разломами порождают колебательный процесс, охватывающий соседние блоки, который в дальнейшем вызывает колебания системы блоков следующего иерархического ранга. Анализ данных мониторинга сейсмичности на рудниках Талнаха показывает, что средние периоды вариации геодинамической активности составляют от 1.5–2 до 3–4 мес.

Переход от шахтных динамических процессов к региональной геодинамике и сейсмике наглядно показывает трансформация повторяемости динамических процессов. Повторяемость техногенных геодинамических событий — горных ударов на двух весьма удароопасных горных предприятиях России — Кизеловском угольном бассейне (1947–1983 гг.) и СУБРе (1970–1995 гг.) — существенно отличается от закона Гутенберга – Рихтера (рис. 3а) и наилучшим образом описывается логарифмическими зависимостями (рис. 3б). В качестве количественной меры мощности горного удара выбран объем разрушенной породы (V , м³), значения которого, в отличие от более адекватной характеристики сейсмических волн, их энергии (E , Дж), известны для большей части горных ударов. Важно отметить, что, несмотря на большие различия горно-геологических условий, систем разработки и т. д., полученные зависимости весьма близки между собой:

$$N_{SUBR} = N_{\Sigma} [1 - F(N)] = 231(1 - 0.169 \ln V), \quad (1)$$

$$N_{Kizel} = N_{\Sigma} [1 - F(N)] = 368(1 - 0.158 \ln V), \quad (2)$$

где N_{SUBR} и N_{Kizel} — соответственно количество горных ударов в СУБРе и Кизеловском бассейне, с объемом разрушенной породы, большим или равным V ; N_{Σ} — общий объем выборки (231 горный удар в СУБРе и 368 ударов на шахтах Кизеловского бассейна).

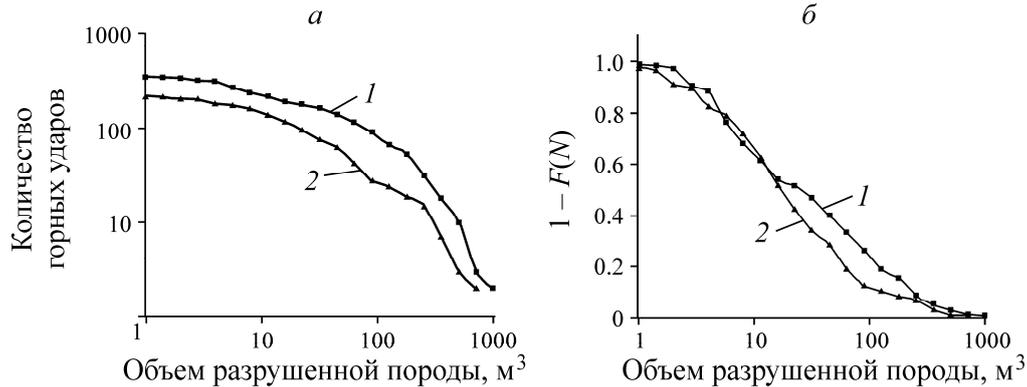


Рис. 3. Повторяемость горных ударов: *а* — билогарифмические координаты, *б* — полулогарифмические координаты (линейная шкала по оси ординат); 1 — Кизеловский угольный бассейн, 1947–1983 гг.; 2 — СУБР, 1970–1995 гг.

Иная картина, но также отличная от классических степенных законов повторяемости, наблюдалась при сейсмическом мониторинге на угольной шахте “Комсомольская” в Воркутинском бассейне. Динамические события происходят почти исключительно при движении лавы, при этом рост динамической активности отвечает переходам очистными лавами участков пласта со сложными горно-геологическими условиями (наличие песчаника в кровле, близость разрывных нарушений и т. д.). На рис. 4 представлены кумулятивные кривые сейсмических событий в полулогарифмических координатах (*а* — логарифмическая шкала энергий, *б* — логарифмическая шкала количества событий) и билогарифмических координатах (*в*).

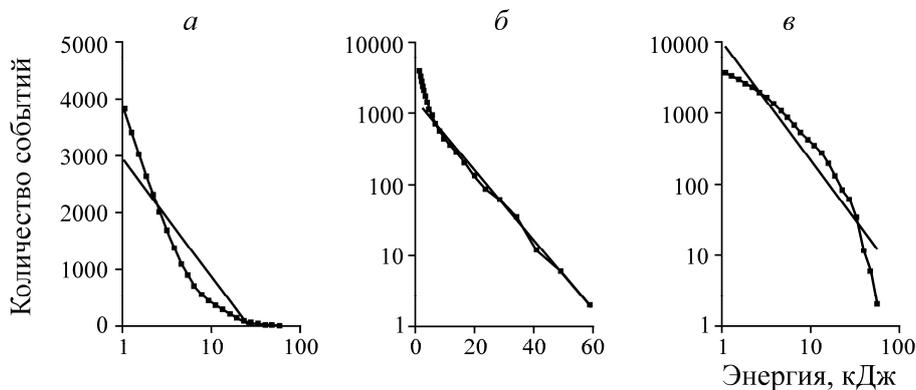


Рис. 4. Повторяемость сейсмических событий на шахте “Комсомольская” Воркутинского бассейна (пояснения в тексте)

Сейсмические события лучше всего описываются экспоненциальной зависимостью вида $N \approx 1500 \exp(-0.11E)$, т. е. имеются промежуточные формы между зависимостями для горных ударов в СУБРе и Кизеловском бассейне и законом Гутенберга–Рихтера (рис. 4б).

При развитой сейсмоактивности [10] распределение количества сейсмических событий по энергии хорошо описывается законом Гутенберга–Рихтера, однако наклон кривой повторяемости существенно зависит от вклада техногенной составляющей. С распространением геодинамического процесса из шахты (рудника) на окружающий регион кривая становится более полой и соответственно доля мощных событий увеличивается. И наоборот, с ростом влияния техногенных процессов на региональную сейсмику угол наклона кривой, доля и количество малоамплитудных сейсмических событий увеличиваются.

Изменения геодинамических процессов затрагивают не только сейсмические явления, но и более медленные квазистатические подвижки. Весьма наглядно это показывают соотношения между сейсмической активностью и скоростью сдвижения (оседания) подработанной толщи. На рис. 5 показан временной ход скорости сдвижения подработанной толщи и сейсмической активности на руднике “Октябрьский” ГКМ “Норильский никель” (Таймыр, Талнахский рудный узел); выбраны средние скорости сдвижения по всей совокупности реперов над рудниками и среднемесячные значения суммарной энергии всех сейсмических событий, зафиксированных сейсмостанцией. Прослеживается сложная связь между процессом сдвижения и сейсмической активностью.

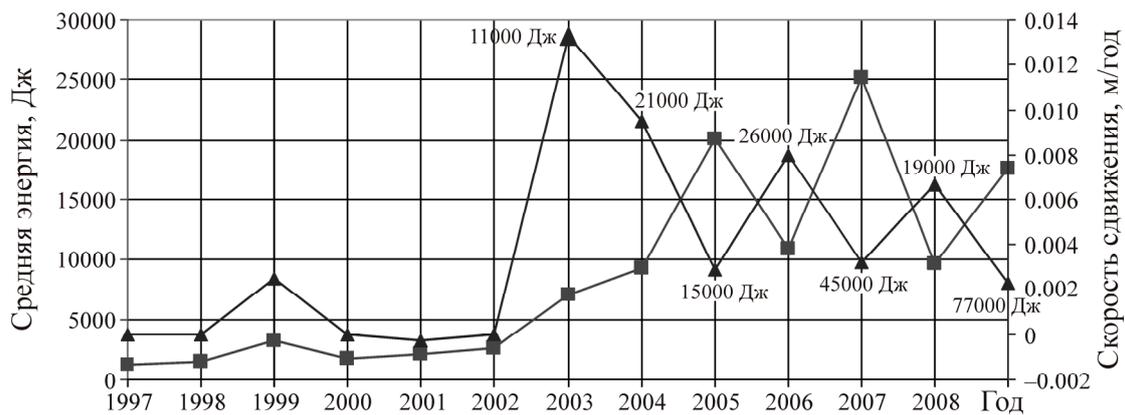


Рис. 5. Сопоставление хода средней скорости сдвижения земной поверхности (1) и среднемесячной энергии сейсмических событий (2) (числами около кривой 1 обозначены энергии наиболее мощных сейсмических событий за год)

До начала активной фазы сдвижения (в 2003 г.) сейсмическая активность незначительна и имеет место прямая корреляция скоростей оседания и сейсмоактивности, во время активной фазы сдвижения растет и сейсмическая активность (рис. 6а). Развитие процессов сдвижения повышает подвижность блоков, что приводит к росту количества и энергии динамических событий, а сейсмические волны от динамических проскальзываний и прорастания новых трещин активизируют процессы сдвижения. Однако в течение активной фазы характер корреляции меняется (рис. 6б): наибольшая сейсмическая активность наблюдается при остановках и замедлениях процесса сдвижения, ведущих к образованию зон, аккумулирующих упругую энергию и сбрасывающих ее в виде динамических событий с излучением сейсмических волн.

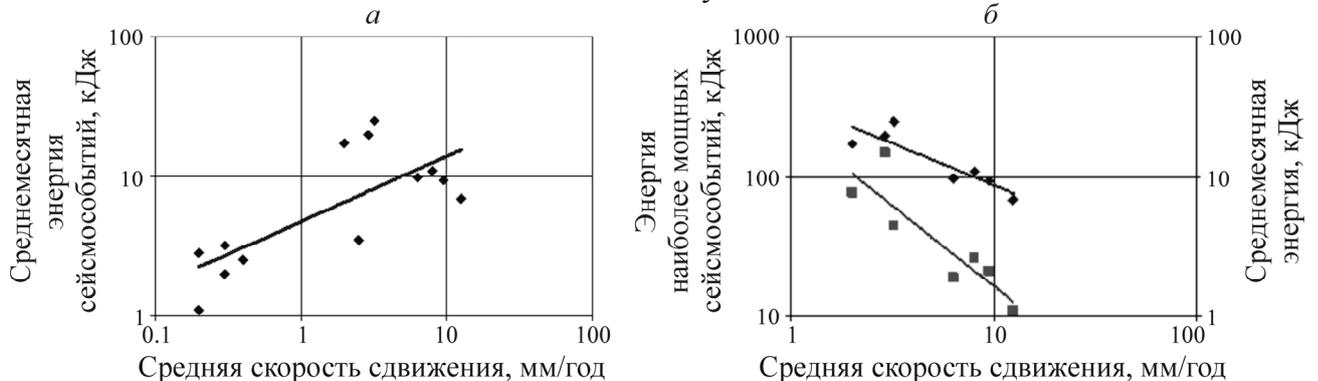


Рис. 6. Соотношение скоростей оседания в мульде сдвижения и энергии сейсмических событий на руднике “Октябрьский”: а — зависимость энергии сейсмических событий от скорости сдвижения 1997–2009 гг.; б — то же 2003–2009 гг.

Другим примером являются процессы подготовки горно-тектонических ударов на СУБРе [26]. Подготовка проходит две стадии — длительную стадию подвижек и относительно низких напряжений, продолжающуюся от полугода до полутора лет, и короткую (в 3–4 раза короче первой) стадию “заклинивания” и резкого возрастания напряжений, заканчивающуюся при отсутствии адекватных мероприятий горно-тектоническим ударом. Это свидетельствует о том, что, несмотря на существенные различия факторов, вызывающих горно-тектонические удары и землетрясения, а также энергетические масштабы событий, общий ход изменений уровней риска примерно одинаков. После крупного события и последующих за ним афтершоков (или вторичных ударов) наступает достаточно длительный период пониженной опасности, составляющий примерно три четверти цикла, и сменяющийся более короткой стадией повышенной опасности.

Стадии подготовки горно-тектонических ударов можно сопоставить с обнаруженным явлением чередования периодов “суперинтенсивных” деформаций и сейсмических событий на крупных разломах [27, 28], причем даже длительность стадий (от полугода до полутора лет) достаточно близка к выявленным им периодам (2–4 года). В соответствии с представлениями о толчкообразном деформировании [29], стадию 1 можно “отождествить” со спокойным протеканием деформационных процессов и относительно “нестесненными” подвижками одного берега разрыва относительно другого. На стадии 2 происходит “заклинивание” блоков и энергия тектонического процесса концентрируется вблизи одного или нескольких мест заклинивания, что выражается в изменениях ориентации главных осей поля напряжений, общем повышении напряженности и увеличении частоты сейсмических событий. При отсутствии специальных мероприятий, например проведения серии камуфлетных взрывов, ситуация разрешается преодолением эффекта заклинивания динамической подвижкой. Из этих представлений следует, что целесообразно вести непрерывные маркшейдерские наблюдения первого класса точности в местах пересечения опасных разрывов, используя соответствующие данные в прогнозировании динамических событий. Существенное замедление или остановка смещений могут служить признаком начала процесса заклинивания и перехода от стадии 1 к стадии 2.

Наиболее принципиальные различия общей и горнотехнической сейсмологии касаются не самой физики явлений природной и природно-техногенной сейсмической активности, а наших подходов и требований к их анализу и прогнозу, а также наших возможностей их предотвращения.

Естественные землетрясения предотвратить практически невозможно, поэтому способы снижения количества жертв и разрушений заключаются в оценке вероятностей сейсмических колебаний высокой интенсивности в течение заданных периодов времени (сейсмическое районирование) и в использовании полученных оценок для выбора сейсмостойких методов строительства [30], а также в оперативном краткосрочном прогнозе таких сейсмособытий. Наблюдается определенный прогресс в развитии методов оценки потенциальных рисков и, особенно, сейсмостойкого строительства, но эффективные способы оперативного краткосрочного прогноза землетрясений так до сих пор не созданы. Более того, ряд сейсмологов вообще сомневается в возможности их создания [31, 32].

По отношению к природно-техногенной сейсмичности на горных предприятиях имеем существенно иную ситуацию:

— в отличие от природных землетрясений, на техногенные динамические события при ведении горных работ можно воздействовать, поэтому кроме районирования и непосредственного прогноза также нужны оценки опасности, позволяющие идентифицировать критические ситуации, в которых нужны профилактические воздействия;

— роль сейсмического районирования в практике проектирования и планирования горных работ выполняет геодинамическое районирование, с использованием данных которого должна проводиться раскройка шахтных полей, выбор порядка и способов разработки [33–36];

— из-за сложности геодинамических процессов при ведении горных работ (наличия динамических событий различных типов — от обрушений до раскрытия трещин или схлопывания полостей) методы прогноза, малоэффективные в “большой сейсмологии”, оказываются еще менее эффективными в шахтном сейсмомониторинге;

— существует реальный доступ к формирующимся очагам динамических событий, что позволяет вести дополнительные виды мониторинга (контроль акустической и электромагнитной эмиссии, измерения деформаций, сейсмическую томографию и др.), которые могут не только следить за сейсмическим процессом, но и контролировать изменения НДС, а также процессы трещинообразования в очагах напряженности;

— методы оценки опасности (называемые в нормативных документах методами прогноза [34–36], хотя они не указывают ни вероятность динамических событий, ни их ожидаемую интенсивность, ни предполагаемое время) позволяют выбирать наиболее адекватные методы предотвращения или провоцирования динамических явлений и тем самым избежать жертв и минимизировать материальный ущерб;

— ввиду существования рисков катастрофических событий различного масштаба (от угроз разрушений в пределах отдельного участка выработки до размеров шахтного поля), необходимы методы оценки опасности породных массивов соответствующих масштабных уровней;

— так как современные методы оценки “опасности” не позволяют с приемлемой точностью прогнозировать уровень “угрозы”, то наряду с ними необходимо развивать методы прогноза в традиционном понимании, предсказывающие с той или иной степенью достоверности место, время и энергию (интенсивность) формирующихся динамических событий.

Остановимся подробнее на двух последних позициях. Базовым методом оценки степени региональной (общешахтной, общерудничной) опасности был и остается сейсмический мониторинг, осуществляемый с помощью шахтных сейсмостанций ISS, “Арамис”, “Релос”, “Регион”, а также получивший наибольшее распространение в России комплекс GITS, разработанный во ВНИМИ. Для оценки уровня опасности используется ряд методов, основанных на соотношении энергии сейсмических волн и сейсмического момента (ISS), на плотности сейсмической энергии (АО “Апатит”) и др., однако наиболее надежным остается метод, основанный на эмпирическом показателе F , предложенный во ВНИМИ [37].

Оценка опасности в отличие от истинного прогноза должна минимизировать только ошибки 2-го рода (пропуск опасности), включая вероятные опасности, пренебрегая ошибками 1-го рода (ложная тревога, перестраховка, “гипердиагностика”). Так как в шахтной практике опасность могут представлять не только наиболее крупные сейсмические события, но и низкоэнергетические, если они происходят вблизи выработок, то предложенный нами показатель F суммирует различные признаки активности — количество сейсмособытий с накопленной деформацией, оцененной в первом приближении методом Беньофа [38]*, причем весовые коэффициенты при этих двух величинах (см. ниже) подбираются таким образом, чтобы в сопоставимой мере учесть оба признака. Еще одним учитываемым критерием опасности является регистрация крупных сейсмических событий (как правило, с энергиями более 10^{3-5} Дж) в исследуемом участке массива. Этот критерий используется при установлении уровня опасности независимо от значения F . Опыт применения данной методики на трех рудниках (ОАО “ГМК “Норильский никель”, Таш-

*Для оценки деформаций сейсмических событий на шахтах и рудниках ввиду большого разнообразия динамических явлений целесообразно использовать более общий способ, так как специальные модели (например, модель Брюна) предполагают учет определенного механизма протекания динамических процессов.

тагольский и Шерегешский), двух шахтах Воркутинского бассейна и двух шахтах в Кузбассе потребовал скорректировать исходный вариант методики. В первую очередь был учтен угол наклона кривой повторяемости, а также изменена методика учета давности сейсмособытий.

В окончательном варианте разработанная методика включает следующие этапы.

1. Сейсмостанция определяет координаты гипоцентров сейсмических событий и рассчитывает их энергии E_c .

2. Для выделения зон активации геомеханических процессов массив горных пород разделяют на “равновеликие” блоки с длиной ребра 60–150 м. Выбор оптимальных размеров блоков производится с учетом тектонического строения месторождения, системы разработки и уточняется в ходе эксплуатации сейсмостанции. Начальные размеры блоков составляют 100×100×100 м.

3. В каждом блоке подсчитывается количество сейсмособытий $N_{T,Bl}$ за выбранный период T и суммарная деформация $D_{T,Bl}$, причем для расчетов энергий и деформаций в энергию более давних событий вносятся понижающие коэффициенты (см. формулу (1)). Длительность периода времени T выбирается в зависимости от уровня сейсмоактивности в диапазоне 15–90 сут. Величина T связана с продолжительностью сейсмических активизаций и составляет приблизительно 1/4–1/2 от ее длительности (примерно равна времени, в течение которого сохраняется характер изменения сейсмоактивности). Понижающие коэффициенты минимизируют влияние более ранних событий, в меньшей степени характеризующих сейсмическую ситуацию на момент расчета F (см. пп. 4 и 5). Начальное значение $T = 30$ сут.

4. При подсчете количества сейсмических событий в блоке $N_{T,Bl}$ за период времени T суммированию подлежат сейсмические события, скорректированная энергия которых $E_{cor} > E_{min}$, где $E_{min} = 30–150$ Дж — уровень энергии сейсмических событий, отвечающий 50%-й вероятности регистрации сейсмособытий с возможностью определения их энергии. Начальное значение $E_{min} = 70$ Дж.

5. Скорректированная энергия сейсмического события E_{cor} находится по формуле

$$E_{cor} = E_c \exp(-3t/T) \frac{T-t}{T}, \quad (3)$$

где t — время, прошедшее от момента регистрации сейсмического события с энергией E_c до времени определения E_{cor} , сут.

6. Сейсмическая активность блоков оценивается по параметру $F_{T,Bl}$:

$$F_{T,Bl} = N_{T,Bl} + D_{T,Bl}, \quad (4)$$

где $D_{T,Bl}$ — суммарная деформация блока за период времени T , вычисляемая по формуле

$$D_{T,Bl} = \sum_{t=0}^T \sqrt{E_{cor} / E_k}, \quad E_{cor} > E_{min}, \quad (5)$$

здесь E_k — фоновое значение сейсмической энергии в пределах шахтного поля; E_k определяется из условия, что средние значения $N_{T,Bl} \approx D_{T,Bl}$. Начальное значение $E_k = 100$ Дж.

7. Для учета свойств массива (в первую очередь трещиноватости) и характера сейсмического процесса параметр $F_{T,Bl}$ делится на значение тангенса угла β наклона кривой повторяемости сейсмических событий в данном блоке за период T (при расчете тангенса угла наклона корректировка значений E_c не проводится). Таким образом, обеспечивается повышение оценки опасности в менее трещиноватых участках массива и при снижении наклона кривой повторяемости сейсмособытий:

$$F = F_{T,Bl} / \text{tg} \beta. \quad (6)$$

8. Для вычисления угла β строится график кумулятивного распределения сейсмособытий по энергиям в билогарифмическом масштабе: на оси абсцисс откладывается десятичный логарифм энергии E_c , а на оси ординат — десятичный логарифм общего количества сейсмособытий N , энергия которых больше E_c . В диапазоне от E_{\min} до E_{cr} методом наименьших квадратов строится линейная зависимость $\lg N$ от $\lg E$ (рис. 7):

$$\lg N = \lg N_0 - b \lg E, \quad (7)$$

где $b = \operatorname{tg} \beta$ — угловой коэффициент этой зависимости, β — угол наклона графика, E_{cr} — граничное значение энергии крупных сейсмических событий, распределение которых отличается от общего закона, начальное значение $E_{cr} = 10000$ Дж.

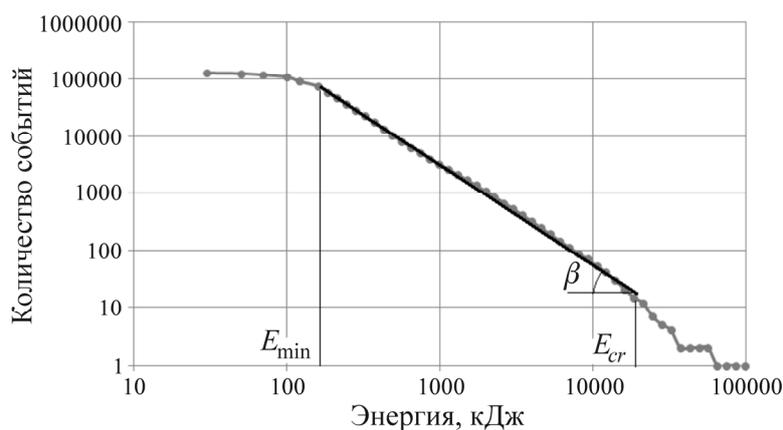


Рис. 7. Вычисление угла β наклона кривой повторяемости сейсмических событий

9. Для очистных забоев на основании полученных значений параметра F (6), а также наличия крупных сейсмических событий участки (блоки) шахтного поля классифицируют по уровню сейсмоактивности (региональной удароопасности).

Начальные значения для определения уровней опасности

Уровень 0 (фоновый). За 30 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий, $F < 10$.

Уровень 1. Значение $F < 100$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $E_c > 1000$ Дж.

Уровень 2. Значение F находится в диапазоне от 100 до 200 или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $E_c > 5000$ Дж.

Уровень 3. Значение F находится в диапазоне от 200 до 400 или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $E_c > 10000$ Дж.

Уровень 4. Значение F находится в диапазоне от 400 до 800 или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $E_c > 15000$ Дж.

Уровень 5. Значение $F > 800$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $E_c > 30000$ Дж.

На основании опыта построения карт выбрана градация по пяти уровням, которая обеспечивает наглядное представление на карте оценки удароопасности местоположения границ и энергетических центров напряженных (сейсмоактивных) зон в пределах шахтного поля. При этом уровень 1 соответствует оценке “неопасно”, 2 и 3 — оценке “напряженно, но неопасно”, а уровни 4 и 5 — “опасно”.

10. Для подготовительных забоев уровень опасности определяется на основании полученных значений параметра N (число сейсмических событий в единицу времени в блоке $50 \times 50 \times 50$ м) при пониженном значении E'_{\min} . Начальное значение $E'_{\min} = 30$ Дж. Участки шахтного поля, относящиеся к трассам проведения подготовительных выработок, классифицируются по уровню сейсмоактивности по параметру N или по наличию крупных сейсмических событий на трассе проводимой выработки. Выбор начальных значений проводился на основании сопоставления с данными оценки локальной удароопасности штатными инструментальными методами.

Начальные значения для определения уровней опасности

Уровень 1. $N < 3$ сейсмособытий за 7 дней;

Уровень 2. $N = 3 - 10$ сейсмособытий за 7 дней или крупное событие $E_c > 1000$ Дж.

Уровень 3. $N > 10$ сейсмособытий за 7 дней или крупное событие $E_c > 10000$ Дж.

При этом уровень 1 соответствует оценке “неопасно”, уровень 2 — оценке “напряженно, но неопасно”, а уровень 3 — оценке “опасно”.

11. Определение опасной зоны крупных сейсмических событий с условной энергией E_{cr} и выше проводится исходя из расчетного размера опасной зоны влияния динамического события, вычисленного по эмпирической формуле [39]:

$$R_e = 1.5E^{1/3}, \quad (8)$$

где R_e — радиус круга на плоскости или радиус сферы с центром в месте события, м.

12. Прогнозный размер радиуса опасной зоны оценивается по формуле

$$R_m = R_e + \delta_r, \quad (9)$$

где δ_r — погрешность определения координат места события; для условий угольной шахты в пределах зоны уверенной регистрации событий (внутри зоны, оконтуренной датчиками) δ_r принимается равной 15 м, за ее пределами — 30 м.

13. После запуска шахтной (рудничной) сейсмостанции в эксплуатацию предварительные значения критериев устанавливаются по результатам работы сейсмостанции в течение первых 6 мес и утверждаются техническим руководителем (главным инженером) шахты. В последующем критерии проверяют и уточняют с периодичностью один раз в год на основании данных оценок локальной удароопасности в выработках и данных о сейсмоактивности, предшествующих крупным событиям.

Следует подчеркнуть, что изложенная методика предназначена для оценки уровня опасности и необходимости проведения различных противоударных мероприятий (площадной разгрузки, камуфлетного взрывания, изменения направления ведения или интенсивности ведения горных работ и т. д.). Зафиксирован ряд успешных опытов ее применения для прогноза крупных динамических явлений. Так, перед крупным динамическим событием на руднике “Октябрьский” (ГМК “Норильский никель”) был зафиксирован существенный подъем значения F (рис. 8), причем именно в зоне произошедшего горного удара. Однако наряду со случаями успешного прогноза, имели место пропуски динамических событий и ошибочные предсказания.

Сейсмическая активность, наблюдающаяся в зонах ведения горных работ и в горнодобывающих регионах, носит природно-техногенный характер. Ее развитие может идти в двух противоположных направлениях. В геодинамически “спокойных” регионах сейсмоактивность распространяется преимущественно от мест добычи полезных ископаемых или других антропогенных воздействий на окружающий горный массив. В сейсмически активных регионах техногенные процессы существенно модифицируют естественную сейсмичность и ведут к “стягиванию” сейсмических событий к зонам ведения горных работ, а также к качественным изменениям характеристик сейсмического процесса.

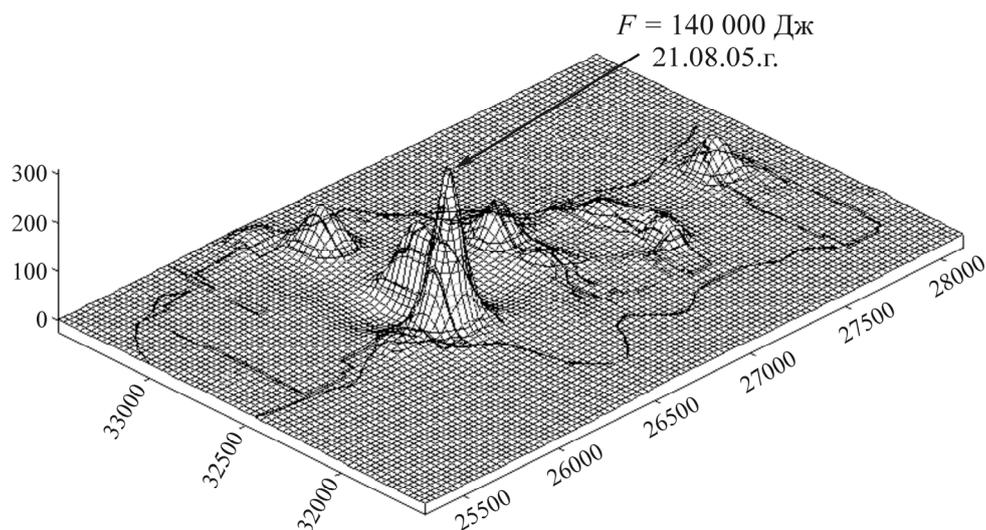


Рис. 8. Пример успешного ретроспективного прогноза крупного сейсмособытия на руднике “Октябрьский” (Норильск) с помощью параметра F

ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований природно-техногенной сейсмичности получены следующие основные результаты.

При переходе от локальной техногенной сейсмичности на рудниках и шахтах к природно-техногенной сейсмичности на кривой повторяемости динамических событий наблюдается переход от логарифмической зависимости через экспоненциальную к степенной зависимости. При трансформации природной сейсмичности горнодобывающего региона в природно-техногенную кривая повторяемости сохраняет степенной характер, но ее угол наклона увеличивается.

Между техногенной сейсмичностью и сдвижением (оседанием) вышележащей толщи на рудниках (шахтах) наблюдается сложная связь. Сейсмический процесс развивается параллельно с оседанием, но при этом в годы максимальных скоростей оседания сейсмическая активность снижается и, наоборот, возрастает при остановках и замедлениях процесса сдвижения.

На техногенную сейсмичность на рудниках (шахтах) в отличие от “чисто” природной можно влиять — предотвращать динамические события с помощью разгрузочных мероприятий или, наоборот, провоцировать их в заданные сроки. Поэтому требуется не только прогноз сейсмических событий, но и оценка сейсмической активности для определения необходимости применения противоударных мероприятий. Для оценки региональной (общешахтной, общерудничной) опасности рекомендуется использовать методику, основанную на использовании эмпирического показателя F , предложенного во ВНИМИ. Данная методика прошла почти десятилетнюю апробацию на трех рудниках ОАО “ГМК “Норильский никель”, Таштагольском и Шерегешском рудниках, двух шахтах Воркутинского бассейна и двух шахтах в Кузбассе. В результате в методику были внесены соответствующие поправки, уточняющие количественные оценки геодинамической опасности при ведении горных работ.

Опыт экспериментальных исследований показал, что для надежного прогноза динамических событий на шахтах и рудниках необходимо ведение комплексного мониторинга, включающего три масштабных уровня — региональный, зональный и локальный, а также изучение характеристик сейсмического процесса, изменения деформаций, сейсмоакустической и/или электромагнитной эмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khallurin V. I., Rauetian T. O., Richards P. O.** The seismic signal strength of chemical explosions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1998, Vol. 88, No. 6. — P. 1511–1524.
2. **Адушкин В. В.** Техногенная сейсмичность: основные источники, причины возникновения и классификация // *Горная геомеханика и маркшейдерия в III тысячелетии*. — СПб.: ВНИМИ, 2004. — С. 45–57.
3. **Адушкин В. В., Турунтаев С. Б.** Техногенные процессы в земной коре (опасности катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005. — 252 с.
4. **Николаев А. В.** Проблемы наведенной сейсмичности // *Наведенная сейсмичность*. — М.: Наука, 1994. — С. 5–15.
5. **Гупта Х., Растоги Б.** Плотины и землетрясения. — М.: Мир, 1979. — 251 с.
6. **Simpson D. W., Leith W.** The 1976 and 1984 Gazli, USSR, earthquakes were they induced? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, Vol. 75, No. 5. — P. 1465–1468.
7. **Wetmiller R. J., Plouffe M., Cajka M. G., and Hasegawa H. S.** Investigation of natural and mining-related seismic activity in northern Ontario, Rockbursts and seismicity in mines, Rotterdam: Brookfield, 1990. — P. 249–254.
8. **Williams T. J., Cuvelier D. J.** Report on a field trial of an underhand longwall mining method to alleviate rockburst hazards, Rockbursts and seismicity in mines, Rotterdam: Brookfield, 1990. — P. 349–353.
9. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.
10. **Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В.** Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса // *ФТПРПИ*. — 2013. — № 4. — С. 20–34.
11. **Wettainen T. and Martinsson J.** Estimation of future ground vibration levels in Malmberget town due to mining-induced seismic activity, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, Oct. 2014, Vol. 114, No. 10. — P. 835–843.
12. **Vallejos J.A., McKinnon S.D.** Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, Vol. 48. — P. 616–625.
13. **Snelling P., Godin L., and McKinnon S.** The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, Vol. 58. — P. 166–179.
14. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В., Фатеев А. В., Сёмин А. Ю., Демидова А. А., Янкайтис В. В.** Наблюдения с временными сетями. Техногенная сейсмичность в Кузбассе // *Землетрясения России в 2007 году*. — Обнинск: ГС РАН, 2009. — С. 86–93.
15. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В. и др.** Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // *Физ. мезомеханика*. — 2009. — № 12. — С. 37–43.
16. **Butra J., Kudeiko J.** Rockburst hazard evaluation and prevention methods in Polish copper mines, *Cuprum*, 2011, Vol. 61, No. 4. — P. 5–20.
17. **Hudyma M., Potvin Y.** An engineering approach to seismic risk management in Hardrock Mines, *Journal Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, Vol. 43. — P. 891–906.
18. **Suorineni F. T., Hebblewhite B., Saydam S.** Geomechanics challenges of contemporary deep mining: a suggested model for increasing future mining safety and productivity, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2014, Vol. 114, No. 12. — P. 1023–1032.
19. **Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / под ред. В. В. Адушкина и А. А. Маловичко**. — М.: ГЕОС, 2013. — 384 с.
20. **Тряпицын В. М., Шабаров А. Н.** Современная геодинамика и тектоника Хибин. — Кострома: Авантитул, 2007. — 146 с.

21. **Арефьев С. С.** Эпицентральные сейсмологические исследования. — М.: Академкнига, 2003. — 375 с.
22. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И., Аршавский В. В., Мамадалиев Н.** Волны маятникового типа Ч. III: Данные натуральных наблюдений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5. — С. 3–27.
23. **Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6. — С.49–57.
24. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Харлампенков И. Е.** Фрактальный анализ траекторий миграции геодинамических событий в Кузбассе // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 75–81.
25. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С.10–38.
26. **Шабаров А. Н., Дупак Ю. Н., Цирель С. В. и др.** Практические приложения геодинамики недр // Горная геомеханика и маркшейдерия в III тысячелетии. — СПб.: ВНИМИ, 2004. — С.137–161.
27. **Кузьмин Ю. О.** Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. — М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. — 220 с.
28. **Касьянова Н. А., Кузьмин Ю. О.** Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса (научные основы, практические приложения и методы учета аномальных геодинамических проявлений). — М.: АОЗТ “Геоинформмарк”, 1996. — 56 с.
29. **Петухов И. М., Линьков А. М.** Механика горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1983. — 280 с.
30. **СП 14.13330.2014.** Строительство в сейсмических районах. — М., 2015.
31. **Geller R. J., Jackson D. D., Kagan, Y. Y., and Mulargia F.** Earthquakes cannot be predicted, *Science*, 1997, Vol. 275, No. 5306. — P. 1616–1617.
32. **Matthews R. A.** Decision-theoretic limits on earthquake prediction, *Geophysical Journal International*, 1997, Vol. 131, N. 3. — P. 526–529.
33. **Геодинамическое районирование недр: методические указания / под ред. И. М. Петухова и И. М. Батугиной.** — Л.: ВНИМИ, 1990. — 129 с.
34. **Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам.** — М.: Ростехнадзор, 2014. — 59 с.
35. **РД 06-329-99.** Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. — М.: Ростехнадзор, 2003.
36. **РД 05-328-99.** Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам. — М.: Ростехнадзор, 2000.
37. **Ломакин В. С., Мулев С. Н., Скакун А. П., Цирель С. В., Беляева Л. И., Лопатков Д. Г., Каплуненко А. К.** Методика прогноза удароопасного состояния массива. — СПб.: ОАО ВНИМИ, 2007. — 62 с.
38. **Venioff H.** Earthquakes and rock creep, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1951, Vol. 41, No. 1. — P. 31–62.
39. **Петухов И. М., Смирнов В. А., Винокур В. Ш., Дальнов А. С.** Геофизические исследования горных ударов. — М.: Недра, 1975. — 134 с.

Поступила в редакцию 24/XI 2015