

УДК 550.34; 550.343; 622.831.32

Оценка сейсмической опасности в рудниках

© 2020 г. Д.А. Маловичко

Institute of Mine Seismology, Тасмания, Австралия

Аннотация. Оценка сейсмической опасности в рудниках имеет ряд отличий от подобной оценки для тектонических землетрясений: а) в рудниках сейсмичность вызвана извлечением горных пород, что делает оценку опасности зависимой от планируемых горных работ; б) значительная часть сейсмических событий в рудниках имеет механизмы очагов, отличные от механизмов тектонических землетрясений; в) в рудниках представляют интерес не только вероятности сильных сотрясений массива, но также вероятности внезапной неупругой деформации на контуре выработок; г) пространственные характеристики сейсмической опасности в рудниках могут испытывать существенные изменения за относительно короткие интервалы времени (несколько лет), что даёт возможность их объективного тестирования, выбора оптимального метода оценки и его калибровки. Данная работа содержит краткий обзор недавних публикаций, посвящённых оценке сейсмической опасности в рудниках. Подробно рассмотрен один из подходов к оценке средне- и долгосрочной опасности, основанный на совместном анализе наблюдаемой в прошлом сейсмичности и модельной сейсмичности для планируемых горных работ. Применение данного подхода проиллюстрировано на примере действующего рудника в Австралии.

Ключевые слова: прогноз сейсмической опасности, планы горных работ, геомеханическое моделирование, тестирование прогноза.

Для цитирования: Маловичко Д.А. Оценка сейсмической опасности в рудниках // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>

Введение

Естественное сейсмическое событие представляет собой внезапную (скачкообразную) неупругую деформацию в массиве горных пород, которая излучает детектируемые сейсмические волны [Mendecki, 2017]. Подобная деформация может привести к разрушениям в горных выработках, если они расположены внутри неупруго деформируемого объёма или подвержены сотрясательному воздействию со стороны излучаемых сейсмических волн. Для того, чтобы иметь возможность управлять данными неблагоприятными сценариями, необходимо уметь оценивать сейсмическую опасность – вероятность возникновения потенциально разрушительной внезапной неупругой деформации в заданном объёме массива горных пород в заданный интервал времени в будущем. Следующим шагом рассчитанная сейсмическая опасность может быть транслирована в опасность, выраженную в терминах, пригодных для проектирования горных выработок и их крепления (например, вероятность превышения потенциально разрушительного уровня

динамических касательных деформаций на контуре выработки или потенциально разрушительного уровня сотрясений массива).

В сейсмологии разработано довольно много методов оценки вероятностей (или частот) реализации потенциально разрушительных тектонических землетрясений в локальных областях. Обычно данные методы базируются на имеющихся каталогах землетрясений (инструментальных и исторических) и предположении, что наблюдаемые в прошлом характеристики сейсмичности могут экстраполироваться в будущее («завтра будет таким же, как вчера»). В расчётах также широко используются другие данные и вычислительные процедуры [Field, 2007]: частота подвижек по картированным разломам, скорость деформации земной коры по данным GPS-наблюдений, численное моделирование напряжений и неустойчивых подвижек по разломам (симуляторы землетрясений).

В рудниках сейсмическая опасность обычно связана не с тектоническими землетрясениями, а с сейсмичностью, вызванной (индуцированной) горными работами. В связи с этим

зарегистрированные сейсмические данные могут использоваться для оценки сейсмической опасности в течение сравнительного небольшого интервала времени в будущем, за которое горно-геологическая обстановка может считаться схожей с обстановкой, имевшей место в прошлом. Однако вполне ожидаемо, что с течением времени горные работы могут изменить состояние породного массива, или новые геологические факторы станут играть роль. При этом наблюдаемая в прошлом сейсмичность более не будет являться репрезентативной для оценки сейсмической опасности. Данные аспекты проиллюстрированы на рис. 1.

Схематическое изображение на рис. 1а показывает крутопадающее маломощное рудное тело, находящееся в поле напряжений с субгоризонтальным максимальным напряжением (σ_1), ориентированным параллельно простиранию рудного тела. Если рудник имеет действующую систему сейсмомониторинга, то зарегистрированные сейсмические данные могут выглядеть примерно так, как это показано на рис. 1б. Небольшие сейсмические события в лежачем и висячем боках рудного тела могут быть связаны с развитием зоны разрушения, тогда как крупное событие вблизи фронта горных работ может быть интерпретировано как внезапная подвижка по известному нарушению F1, которое испытывает уменьшение нормального напряжения и/или увеличение сдвигового напряжения при приближении горных работ. Если актуальной задачей является прогноз вероятности возникновения крупного сейсмического события на рассматриваемом участке рудника в ближайшем будущем, то сейсмическая опасность может быть оценена на основе имеющегося каталога сейсмических событий. Это подразумевает, что сейсмичность в ближайшем будущем будет обусловлена процессами развития зоны разрушения в боках рудного тела и повторными подвижками по разлому F1. Следуя данной логике, можно получить карту сейсмической опасности, показанную на рис. 1в, где контуры отмечают изолинии равной вероятности возникновения крупных сейсмических событий.

Однако данные контуры могут не соответствовать действительности для более длительных интервалов времени, принимая во внимание будущие горные работы (к примеру, планируемое продвижение фронта горных работ, показанное на рис. 1г). Возможна ситуация, при которой фронт горных работ приближается к другому закартированному разлому (F2), характеристики которого подобны разлому F1. Хотя в прошлом

не было зарегистрировано сейсмических событий, связанных с F2, будет разумным предположить, что данный разлом станет неустойчивым в процессе приведения в исполнение запланированных горных работ, что может привести к реализации крупной внезапной подвижки. Также разумно обратить внимание на то, что планируемые горные работы увеличивают общую площадь отработки, что повлечёт общий рост зоны разрушения в висячем и лежачем боках отработанных частей рудного тела. Это может дестабилизировать разлом F1 на удалении от рудного тела (в районе его пересечения с транспортными выработками). Принимая данные соображения во внимание, прогнозная карта сейсмической опасности, основанная только на зарегистрированных сейсмических событиях (в виде, показанном на рис. 1д), не будет корректной. Более правильным будет распределение опасности, показанное на рис. 1е.

Другое важное отличие сейсмичности в рудниках от тектонических землетрясений в земной коре связано с механизмами очагов. Очаги тектонических землетрясений хорошо описываются моделью подвижки по плоской поверхности. Данная модель также применима к части сейсмических событий, регистрируемых в рудниках. В то же время в рудниках довольно часто наблюдаются сейсмические события с механизмами, указывающими на внезапное сдвижение выработок (конвергенцию). Это касается и крупных разрушительных событий, которые порой представляют собой каскадное повреждение или разрушение целиков [Malovichko et al., 2018]. Оценка сейсмической опасности в рудниках должна учитывать данную особенность.

В глобальной сейсмологии конечным результатом оценки сейсмической опасности является вероятность превышения уровня потенциально разрушительных сотрясений, вызванных землетрясением. В случае рудников целесообразно разделять сейсмическую опасность (вероятность проявления потенциально разрушительного сейсмического события в заданном объёме в течение заданного интервала времени в будущем) и опасность сильных сотрясений (вероятность потенциально разрушительного сотрясения в заданном местоположении в течение заданного интервала времени в будущем). Целесообразность обусловлена двумя факторами:

– не все случаи динамического разрушения выработок могут быть объяснены сильными сотрясениями массива, вызванными сейсмическими волнами от удалённого очага (например, внезапной подвижки по разрывному нарушению).

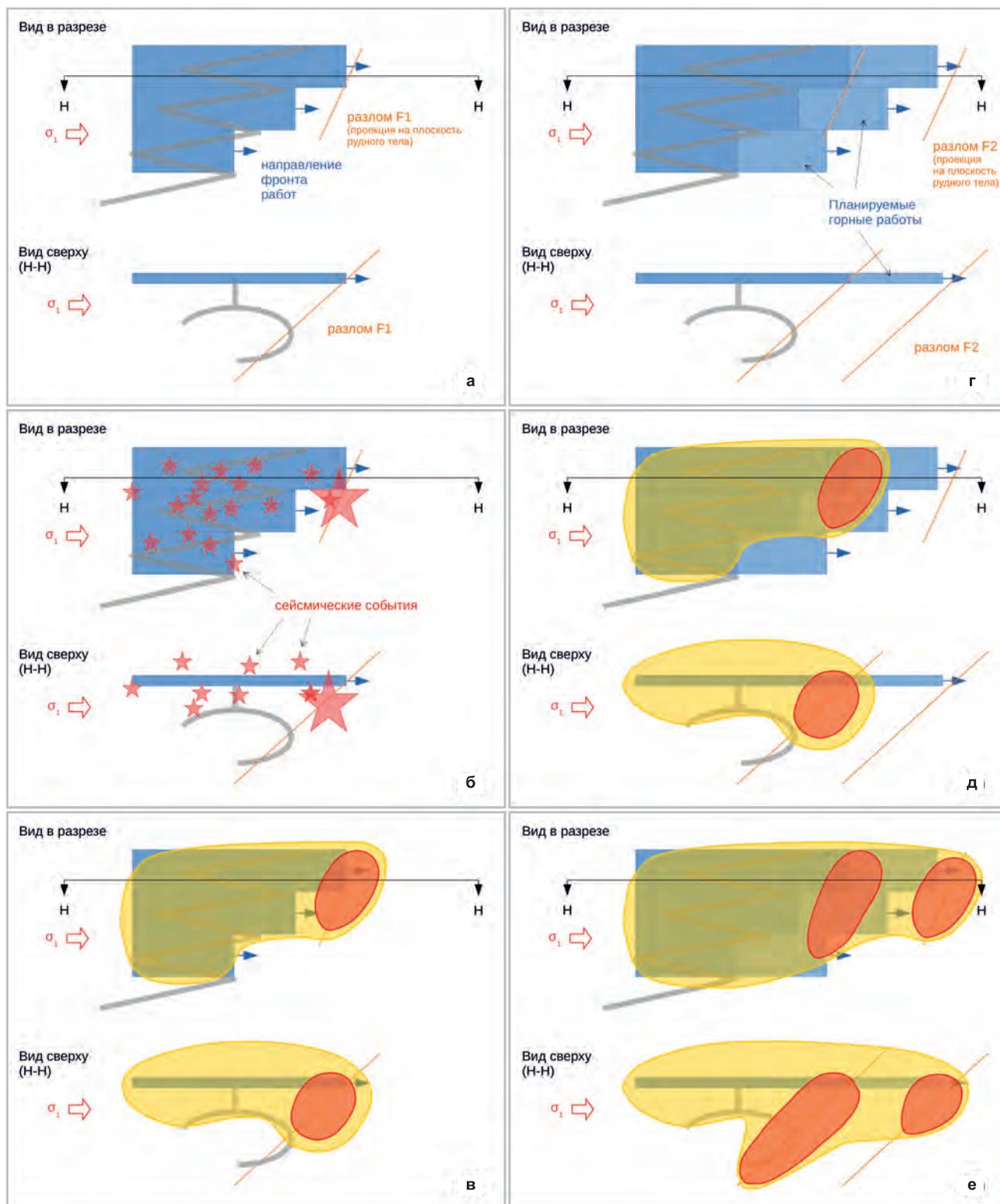


Рис. 1. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая одну из особенностей оценки сейсмической опасности в рудниках. Рисунки (а–в) показывают текущую конфигурацию горных работ, зарегистрированные сейсмические данные и контуры сейсмической опасности, вычисленные на основе этих данных. Рисунок (г) отображает планируемые горные работы и новые геологические данные (разлом F2). Прогноз сейсмической опасности на основе зарегистрированных данных может быть некорректен для интервала времени, соответствующего планируемым горным работам (д). Ожидаемый сейсмический отклик на планируемые горные работы должен использоваться при оценке опасности (е)

В последние годы всё большее распространение получает объяснение многих случаев разрушения исключительно процессами, происходящими на контуре горных выработок без привлечения сейсмического воздействия от удалённого источника [Cai, Kaiser, 2017]. В связи с этим прогноз вероятностей внезапных неупругих деформаций на контуре выработок (которые также являются очагами сейсмических событий) представляет самостоятельный интерес;

— тестирование прогнозов опасности сильных сотрясений затруднено тем, что сейсмические павильоны редко оказываются расположенными вблизи очагов событий и, в связи с этим, количество измерений сильных сотрясений ограничено. Даже если сейсмическое событие происходит рядом с сеймопавильонами, то довольно часто стандартные сейсмические датчики оказываются зашкаленными, и измерения сильных сотрясений не являются корректными. Данные трудности не касаются тестирования прогнозов сейсмической опасности (вероятностей происхождения крупных сейсмических событий).

Все описанные выше особенности сейсмичности в рудниках указывают на то, что стандартные подходы к оценке сейсмической опасности, разработанные в глобальной сейсмологии для тектонических землетрясений, не могут быть напрямую заимствованы и использованы на рудниках без должной корректировки. Раздел статьи «Краткий обзор современных методов оценки сейсмической опасности в рудниках» описывает подходы к оценке сейсмической опасности в рудниках, которые были предложены в последние 15 лет. Один из подходов, использующий явное геомеханическое моделирование ожидае-

мой сейсмичности, представлен в более подробном виде в разделе «Оценка средне- и долгосрочной сейсмической опасности на основе моделирования ожидаемой сейсмичности». Последний раздел («Тестирование прогнозов средне- и долгосрочной сейсмической опасности») кратко касается вопроса тестирования прогнозов сейсмической опасности.

Краткий обзор современных методов оценки сейсмической опасности в рудниках

Оценке сейсмической опасности в рудниках посвящена довольно обширная литература. Многие публикации предлагают новые методы количественной оценки опасности или демонстрируют их применение на реальных данных. Некоторые публикации не следуют традиционному определению сейсмической опасности и представляют результаты в относительных единицах (например, «рейтинг опасности»). Эти публикации не будут обсуждаться в данном обзоре.

Оценка сейсмической опасности включает несколько аспектов: размеры ожидаемых сейсмических событий и их пространственное распределение, пространственное распределение вызванных сейсмическими событиями сильных сотрясений массива, изменение во времени вероятности крупных событий или сотрясений массива, связь опасности с горными работами. Предлагаемые в публикациях методы обычно подразумевают один или несколько из указанных аспектов. Краткий обзор работ, опубликованных за последние 15 лет (после 1 января 2005 г.), представлен ниже. Упрощённая классификация предлагаемых методов приведена в табл. 1.

Таблица 1. Обзор работ, опубликованных после 1 января 2005 г.

Публикация	Аспект оценки сейсмической опасности				
	$Pr(>M)$	$Pr(>M, X)$	$Pr(>GM, X)$	эффект горных работ	краткосрочная опасность
[Lasocki, 2005; 2009]	+		+	+	
[Trifu et al., 2005; Collins et al., 2015]			+		
[Trifu, Shumila, 2005]	+	+			+
[Beck et al., 2007; Levkovitch et al., 2013]		+		+	
[Woodward, 2015]					+
[Mendecki, 2016; 2017]	+		+	+	+
[Malovichko, 2017; 2019]		+	+	+	
[Wesseloo, 2018]	+	+	+		

Примечание: $Pr(>M)$ обозначает распределение размеров очагов; $Pr(>M, X)$ – пространственное распределение вероятности сейсмических событий; $Pr(>GM, X)$ – пространственное распределение сильных сотрясений массива, вызванных сейсмическими событиями.

Сейсмическая опасность может оцениваться для различных по длительности интервалов времени в будущем. Данная работа использует следующее разделение видов опасности по длительности, предложенное в [Mendecki, 2016]:

– краткосрочная опасность – покрывает период менее одного месяца и включает оценки интервальных вероятностей после эпизодов быстрого нагружения массива горных пород крупными сейсмическими событиями или массовыми взрывами;

– среднесрочная опасность – покрывает интервал до одного года;

– долгосрочная опасность – нацелена на периоды от одного года и до окончания разработки рудника.

«Вероятностный анализ сейсмической опасности» (Probabilistic Seismic Hazard Analysis – PSHA) является стандартным инструментом оценки ожидаемого сейсмического воздействия от землетрясений на интересующий объект (конкретное местоположение) [McGuire, 2004]. Вариант PSHA, адаптированный для случая сейсмичности, индуцированной горными работами, предложен в работах [Lasocki, 2005; Lasocki, 2009]. Расчёты в данном методе имеют следующие специфические особенности: распределение расстояний до очагов сейсмических событий основано на запланированных в будущем горных работах; закон повторяемости сейсмических событий устанавливается с использованием зарегистрированных данных, являющихся представительными для будущих горных работ; зависимость затухания амплитуд сейсмических волн («Прогнозное уравнение сильных сотрясений» – Ground Motion Prediction Equation) калибруется на основе сейсмических записей, полученных для района оценки сейсмической опасности. Предлагаемый вариант PSHA применим к случаям, когда интересующий в плане сейсмического воздействия объект расположен за пределами будущих сейсмоактивных областей (районов будущего ведения горных работ). В работе [Lasocki, 2009] показано применение метода для оценки сейсмического воздействия горных работ на медном руднике «Rudna» (Польша) на близрасположенное крупное хвостохранилище «Zelazny Most».

Другой пример адаптации PSHA для условий горных работ представлен в работе [Trifu et al., 2005]. Предложена функциональная форма «прогнозного уравнения сильных движений» для «пиковых скоростей смещений» (Peak Particle Velocity – PPV) и «пиковых ускорений» (Peak Particle Acceleration – PPA), и продемон-

стрирована их калибровка для рудника. Важно отметить, что предлагаемые уравнения дают бесконечно большие значения PPV и PPA вблизи очага события, что не является физически обоснованным. В статье приведён пример расчёта сейсмической опасности для рудника на основе зарегистрированных в прошлом данных. Учёт будущих горных работ не обсуждается. Свежий пример применения вычислительных процедур, описанных в работе [Trifu et al., 2005], представлен в публикации [Collins et al., 2015].

Метод, описанный в [Trifu, Shumila, 2005], предлагает вариант модели «Афтершоковой последовательности эпидемического типа» (Epidemic Type Aftershock Sequence – ETAS), которая широко используется в глобальной сейсмологии для описания изменения частоты тектонических землетрясений во времени и пространстве. Представленный вариант модели ETAS использует информацию о горных работах – уровень сейсмической активности является более высоким во время проведения взрывных работ. Предлагаемый метод более приемлем для краткосрочной оценки сейсмической опасности, поскольку он учитывает увеличение сейсмичности после крупных событий или взрывов. Это подтверждается примерами, приведёнными в [Trifu, Shumila, 2005], где используется шесть выборок данных для сравнительно коротких промежутков времени (от одного до семи месяцев). Данный метод не будет пригодным для оценки средне- и долгосрочной опасности (месяцы и годы), так как он не принимает во внимание особенности планируемых в будущем горных работ.

Метод оценки пространственного распределения сейсмической опасности, учитывающий планируемые горные работы, предложен в [Beck et al., 2007; Levkovitch et al., 2013]. Данный метод имеет сходство с предложенным ранее методом «Cell Evaluation» [Beck, Brady, 2002], однако уравнения, описывающие вероятности сейсмических событий, в данных работах отличаются. Метод базируется на неупругой геомеханической модели как для завершённых, так и для планируемых в будущем горных работ. На основе геомеханической модели для горных работ, имевших место в прошлом, устанавливается зависимость между модельным параметром (например, «использованной пластической энергии» – Dissipated Plastic Energy, или «скоростью высвобождения энергии» – Rate of Energy Release) и вероятностью возникновения сейсмического события определённой магнитуды. При этом используется каталог зарегистрированных сейсмических

событий, соответствующих моделируемым горным работам (калибровочный каталог). Установленная зависимость применяется к результатам геомеханических расчётов для горных работ, планируемых в будущем, что позволяет оценить сейсмическую опасность в пространстве. Метод не использует какой-либо модели распределения размеров очагов сейсмических событий (закона повторяемости), и, в связи с этим, зависимость между параметрами геомеханической модели и вероятностями сейсмических событий является неопределённой в случае крупных событий. Более того, метод присваивает нулевую вероятность любому сейсмическому событию, превышающему наиболее крупное событие в калибровочном каталоге. Рисунок 6 работы [Beck et al., 2007] иллюстрирует, что предлагаемый метод более приспособлен для прогноза вероятности слабых событий, которые присутствуют в большом числе в калибровочном каталоге. Данный рисунок показывает хорошее соответствие между частотами наблюдаемых и вероятностями модельных сейсмических событий небольшой магнитуды ($m < 0.5$) и, в то же время, значительное (более чем пятикратное) преувеличение вероятности крупных событий ($m \geq 1.0$) по данным моделирования. Данный аспект вызывает настороженность, так как сейсмическая опасность обычно определяется именно крупными сейсмическими событиями.

Оценка сейсмической опасности в течение коротких временных интервалов возрастания сейсмической активности обсуждается в диссертации [Woodward, 2015]. Масштаб данных интервалов обычно составляет несколько часов, и описываемая опасность называется краткосрочной. В диссертации предложен алгоритм детектирования и пространственно-временного выделения кластеров сейсмических событий. Временное изменение сейсмической активности в пределах кластеров описывается изменённым законом Омори. Сейсмическая опасность выражается в виде годовой вероятности происхождения как минимум одного события с магнитудой более 2.0. Предлагаемый метод позволяет отслеживать изменение данной вероятности с течением времени.

Оценка сейсмической опасности в рудниках подробно разбирается в монографии [Mendecki, 2016]. Последующая публикация [Mendecki, 2017] дополняет монографию описанием метода оценки опасности сильных сотрясений массива. Наиболее важными аспектами данных работ, отличающимися от описанных выше методов, являются следующие:

– поскольку сейсмичность на рудниках, как правило, вызвана горными работами, то оценку сейсмической опасности целесообразно производить не во временной области, а в области объёмов извлечённой горной породы. К примеру, вместо годовой вероятности происхождения потенциально разрушительного события предлагается использовать вероятность происхождения данного события при извлечении 1000 *t* горной породы;

– оценку сейсмической опасности рекомендуется производить на основе не магнитуд, а физических очаговых параметров (сейсмического момента *M*, геометрического момента *P* или сейсмической энергии *E*);

– в сейсмологии используется определение максимального вероятного землетрясения как наибольшего землетрясения, возможного в пределах рассматриваемой сейсмогенерирующей зоны. Данное определение имеет ограниченную применимость при оценке сейсмической опасности в рудниках, так как размер максимального индуцированного землетрясения будет определяться окончательной конфигурацией и размерами рудника, которые плохо известны заранее. В отношении сейсмичности, вызванной горными работами, предлагается использовать понятие «следующего рекордного сейсмического события», которое более полезно для управления сейсмической опасностью в рудниках. В монографии предлагается метод оценки ожидаемого значения и верхнего предела для следующего рекордного сейсмического события. Данный верхний предел используется в модели усечённого сверху степенного закона повторяемости сейсмических событий;

– растянутая экспоненциальная (stretched exponential) функция предлагается в качестве альтернативы закону Омори при моделировании изменения сейсмической активности после крупных событий или взрывов. Данная функция может использоваться при оценке краткосрочной сейсмической опасности;

– «прогнозные уравнения сильных сотрясений» должны иметь член, ограничивающий уровень сотрясений вблизи очагов сейсмических событий. Непосредственные измерения близочаговых колебаний массива обычно немногочисленны или искажены (например, ввиду зашкаливания сейсмоприёмников), и, следовательно, они плохо определяют данный член уравнений. Необходимо привлекать альтернативные данные (к примеру, оценки сброса напряжения в очаге) для ограничения возможных значений сотрясений вблизи очага.

Для калибровки «прогнозных уравнений сильных сотрясений» лучше использовать небольшое количество измерений для крупных событий или событий с сильными сотрясениями, чем многочисленные измерения, в которых преобладают небольшие события и слабые сотрясения. В монографии предлагается использовать новый параметр сотрясений – «кумулятивное абсолютное смещение» (Cumulative Absolute Displacement – CAD), – которое может быть лучшим индикатором разрушения по сравнению с традиционно используемой «пиковой скоростью сотрясений» (Peak Ground Velocity – PGV).

В работе [Malovichko, 2017] предлагается оценивать средне- и долгосрочную сейсмическую опасность на основе сочетания: а) сейсмичности, зарегистрированной в прошлом для последовательности горных работ, схожей с планируемой в будущем последовательностью; б) сейсмичности, моделируемой для планируемых горных работ. В отличие от подходов, описанных выше, пространственное распределение опасности контролируется не суммарным числом событий, а суммарным геометрическим моментом. Калибровка и тестирование средне- и долгосрочных прогнозов сейсмической опасности обсуждаются в [Malovichko, 2019].

Вариант PSHA для условий горных работ предложен в [Wesseloo, 2018]. Он имеет следующие отличия от [Malovichko, 2017; Mendecki, 2017]: а) расчёты базируются на магнитудах сейсмических событий, б) наклон графика повторяемости сейсмических событий (параметр b) может изменяться в пространстве, в) «прогнозное уравнение сильных сотрясений» для PGV имеет дополнительный член, зависящий от статического сброса напряжения. Другое важное отличие предлагаемого в [Wesseloo, 2018] метода заключается в том, что он «не является попыткой прогноза будущей опасности для заданного будущего интервала времени, а представляет метод оценки (и отслеживания изменений) текущей опасности». С практической точки зрения подобное ограничение конечного результата метода уменьшает его пользу. Ведение и планирование горных работ нуждается в оценке вероятностей потенциально разрушительных событий и сотрясений массива для будущих интервалов времени. Вычисление данных вероятностей должно учитывать особенности планируемых в будущем работ (например, путём явного моделирования сейсмичности для планируемой последовательности горных работ или посредством нормализации результатов на планируемый объём извлечения горных пород). Другой выгодой использования традиционного определения сейсмической опасности (как

относящейся к будущему состоянию, а не текущему) является то, что оценка опасности может быть протестирована, используя данные, зарегистрированные в течение прогнозного интервала. Подобное тестирование может способствовать корректировке прогноза на следующий интервал времени в будущем.

Оценка средне- и долгосрочной сейсмической опасности на основе моделирования ожидаемой сейсмичности

Метод моделирования сейсмичности, вызванной горными работами, был предложен в новаторской работе [Salamon, 1993]. Метод получил развитие и совершенствование в работах [Линьков, 2005; Linkov, 2013]. Вычислительные процедуры, предложенные А.М. Линьковым, позволяют моделировать не только сейсмические, но и асейсмические события, а также воспроизвести криповые эффекты в вызванной и инициированной сейсмичности. Основной идеей методов М. Саламона и А.М. Линькова является детектирование и параметризация сдвиговых и отрывных дефектов в линейно-упругой модели массива горных пород с выработками. Параметры дефектов транслируются в сейсмологические термины (местоположение очага, сейсмический момент, сейсмическая энергия). Как указано в [Linkov, 2013], метод может использовать произвольный вычислительный код, решающий задачу статической теории упругости (т.е. код может быть основан либо на методе граничных элементов, либо на методе конечных элементов, на методе конечных разностей или другой разновидности). Оригинальный метод М. Саламона был «пассивным» в том смысле, что рассчитанное полное поле напряжений (включающее естественное и вызванное горными выработками напряжения) используется для проверки реализации критериев разрушения на заранее «посеянных» в модели дефектах. В варианте метода, предложенного А.М. Линьковым, каждый дефект играет активную роль в перераспределении напряжений, что делает модель в целом неупругой.

В работе [Malovichko, Basson, 2014] был предложен вариант подхода А.М. Линькова, названный методом Саламона-Линькова. Он имеет следующие особенности:

– метод не использует предварительного «посева» дефектов в модели, что устраняет необходимость в задании распределений их размеров, ориентировок и местоположений. В методе Саламона-Линькова осуществляется тестирование различных местоположений и ориентировок

дефектов. Возможность подвижки по ним оценивается согласно заданным критериям разрушения. Таким образом, пространственная неоднородность и анизотропия прочностных характеристик массива горных пород учитывается путём варьирования критериев разрушения. Например, путём использования пониженных параметров прочности для определённых местоположений или ориентировок можно описывать эффект слабого разлома или системы трещин;

– большие дефекты описываются набором дефектов меньшего размера. Это позволяет учитывать сложную форму дефектов и обеспечивать более точное моделирование их влияния на поле напряжений;

– исходный подход А.М. Линькова дополнительно использует как сдвиговые, так и отрывные дефекты. Последние интерпретируются как сейсмические события с взрывными (расширяющимися) механизмами. В рудниках отрывные трещины могут возникать вблизи горных выработок, однако при этом излучение сейсмических волн определяются не только поведением самой трещины, но и сопутствующей деформацией выработки. В связи с этим большое число естественных сейсмических событий в рудниках имеет не взрывные, а импловивные (схлопывающиеся) механизмы. Ввиду данного отличия между теоретической моделью и наблюдениями, в методе Саламона-Линькова рассматриваются только сдвиговые дефекты, и соответствующие сейсмические события имеют очаговые механизмы в виде двойной пары (double-couple).

Обсуждение различий между методами можно также найти в работе [Linkov et al., 2016].

В качестве исходной информации метод Саламона-Линькова использует параметры естественного поля напряжений и критерии разрушения. Последние могут быть неоднородными и анизотропными (например, определённые трёхмерные поверхности или ориентировки могут иметь критерии разрушения, отличный от критерия для ненарушенного массива пород). Моделирование ожидаемой сейсмичности для будущих горных работ возможно с использованием исходной информации, предлагаемой рудником. Однако на практике предпочтительным вариантом является тестирование и, при необходимости, корректировка предлагаемой исходной информации путём моделирования сейсмичности для прошлых этапов горных работ и сопоставление результатов с реальной сейсмичностью, зарегистрированной в течение соответствующего периода времени. Временной интервал шагов горных работ при подобной калибровке целесообразно выбрать равным интервалу шагов для планируемой в будущем отработки.

Сопоставление модельной и наблюдаемой сейсмичности желательно выполнять в отношении локации, размеров и механизмов очагов. Как правило, локация и механизмы очагов являются чувствительным к параметрам поля напряжений и критериям разрушения. Размеры очагов (геометрический момент) наиболее чувствительны к критериям разрушения.

При калибровке целесообразно начать с наиболее простой модели и затем пытаться нивелировать различия между модельной и наблюдаемой сейсмичностью либо путём корректировки внешнего поля напряжений, либо путём добавления геологических объектов (разломов, систем трещин) в модель.

После выполнения описанной калибровки производится моделирование сейсмичности для планируемых в будущем горных работ. Далее модельная сейсмичность и зарегистрированная в прошлом сейсмичность трансформируются в сейсмическую опасность и опасность сильных сотрясений. Подробности этой процедуры описаны в работе [Malovichko, 2017]. В данной статье они будут проиллюстрированы на примере рудника «Ренисон» (Австралия).

Рудник «Ренисон» обрабатывает рудное тело малой мощности, простирающееся с севера на юг и круто падающее на восток. Максимальное сжимающее напряжение σ_1 естественного поля напряжений является субгоризонтальным и ориентировано примерно вдоль простираения рудного тела.

Рудник оснащён системой сейсмомониторинга, насчитывающей в настоящий момент 14 трёхкомпонентных сейсмоприёмников. Сейсмоприёмники установлены и зацементированы в скважинах за пределами отработанных блоков и связанных с ними зон разрушения. Качество регистрируемых данных высокое, что позволяет в плановом порядке производить не только оценку стандартных параметров очагов событий (местоположение, время, геометрический момент и сейсмическая энергия), но также и их механизмов. Каталог сейсмических событий использовался для калибровки геомеханической модели. Было предложено небольшое изменение параметров естественного поля напряжений. Также было установлено, что одна из закартированных систем трещин имеет низкие прочностные свойства и целесообразно включить её в модель, чтобы объяснить ряд особенностей зарегистрированной сейсмичности [Malovichko, 2017].

В III квартале 2017 г. рудник имел конфигурацию, показанную на рис. 2. На ближайшие кварталы планировалась отработка блоков на двух участках, выделенных цветом на рис. 2.

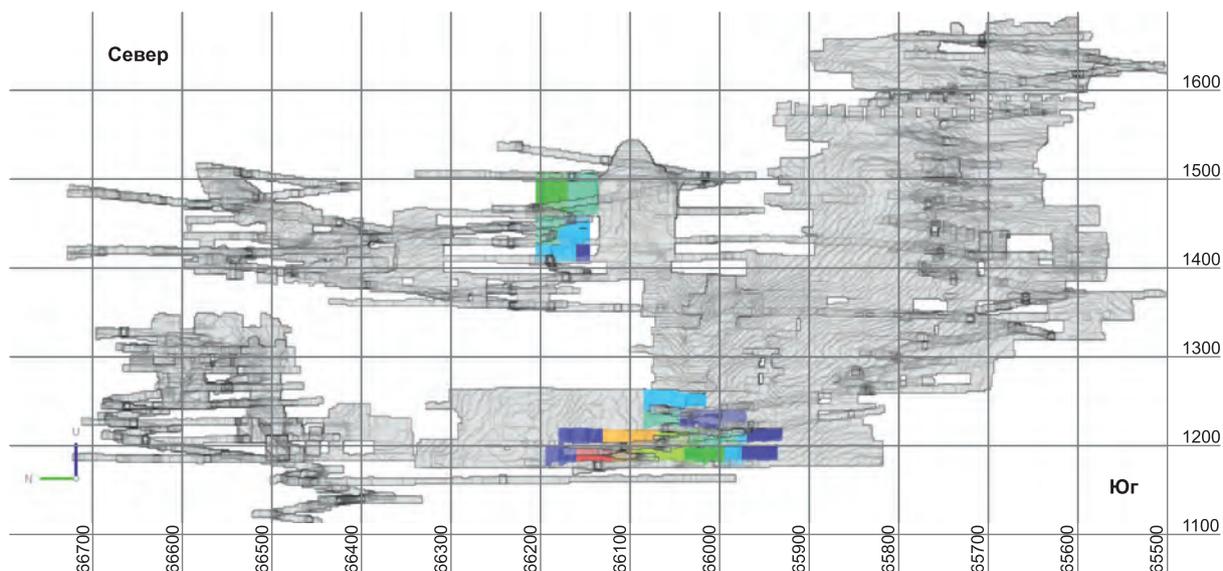


Рис. 2. Планы горных работ на руднике «Ренисон» в III квартале 2017 г.

Серым цветом показаны отработанные блоки и подготовительные выработки. Цветовой палитрой показаны планируемые к отработке блоки: тёмно-синим – в IV квартале 2017 г., красным – во II квартале 2019 г., остальными цветами – промежуточные квартальные этапы отработки

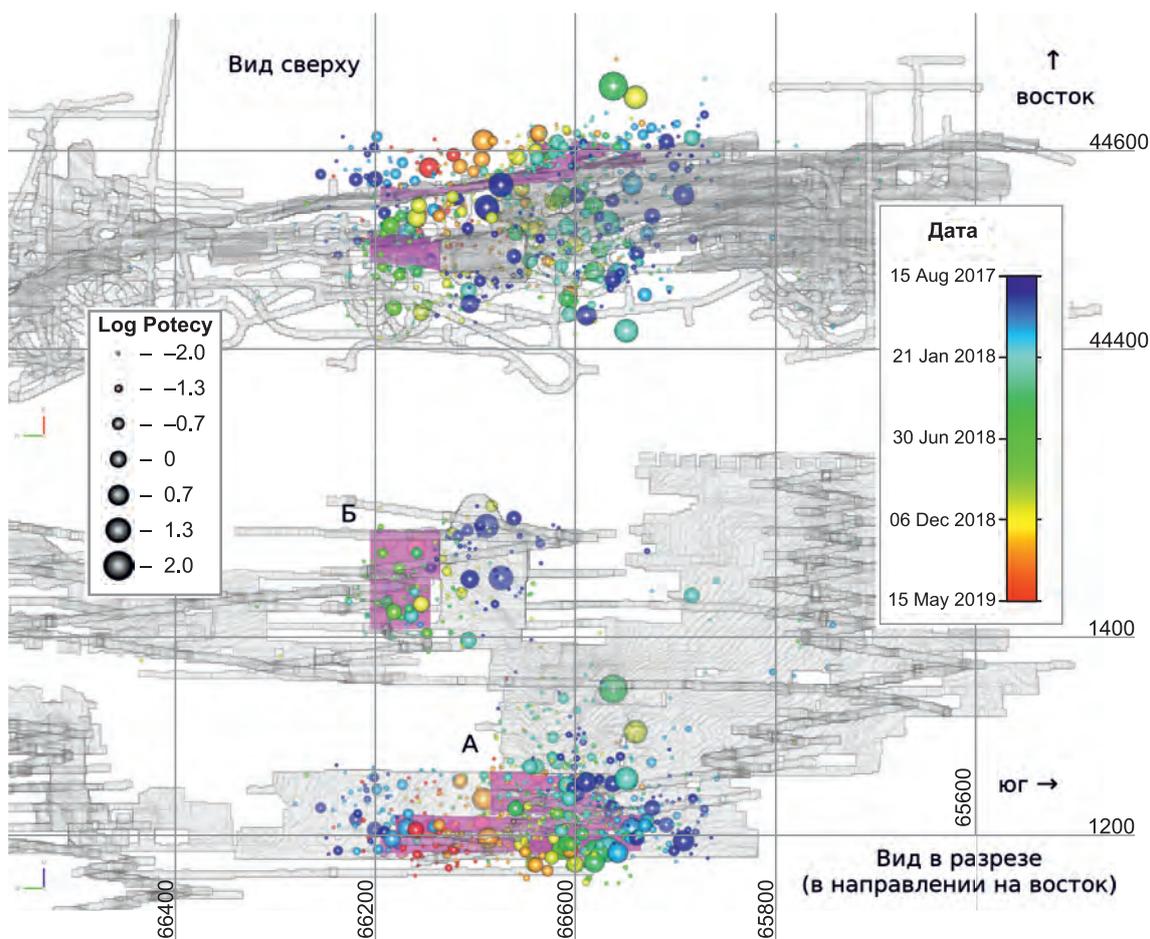


Рис. 3. Ожидаемая сейсмичность для планируемых горных работ.

Существующие и планируемые к отработке блоки показаны серым и розовым цветами соответственно. Очаги моделированных событий показаны сферами. Цвет сфер характеризует время события (время отработки блоков), а размер пропорционален геометрическому моменту очага (seismic potency)

Ожидаемая сейсмичность для данной последовательности отработки была получена при помощи метода Саламона-Линькова и с использованием откалиброванных параметров геомеханической модели. Модельные сейсмические события, приуроченные к серединам кварталов (15 ноября 2017 г., 15 февраля 2018 г. и т. д.), показаны на рис. 3. Ввиду того, что максимальное сжимающее напряжение ориентировано вдоль простирания рудного тела (с севера на юг), большинство сейсмических событий связано с развитием зоны разрушения в висячем (восточном) и лежачем (западном) боках отработанных участков рудного тела. События в висячем боку особой опасности не представляют ввиду отсутствия там выработок. Напротив, сейсмичность в лежачем боку требует пристального внимания, так как там расположены основные транспортные выработки рудника.

Более сильный сейсмический отклик ожидается в нижней части рудника (участок А на рис. 3) по сравнению с менее глубокой частью (участок Б на рис. 3). Это можно объяснить двумя факторами: 1) ростом напряжений с глубиной ввиду вертикального градиента естественного поля напряжений в используемой геомеханической модели, 2) большей сопряжённой площадью отработки для участка А. Отработка блоков на участке А фактически объединяет ранее отработанные области к северу и югу, что ожидается приводит к значительному расширению зоны разрушения в боках рудного тела. Участок Б, наоборот, ограничен неотработанным массивом сверху и с севера, что ограничивает развитие зоны разрушения.

Расчёт сейсмической опасности, предлагаемый в работе [Malovichko, 2017], основан на совокупности описанной выше модели сейсмичности, а также сейсмичности, зарегистрированной в прошлом и являющейся актуальной для ожидаемого в будущем отклика. Результатом расчётов являются карты вероятности происхождения потенциально разрушительного сейсмического события (с геометрическим моментом или моментной магнитудой, превышающими заданный порог) в единице объёма массива горных пород в различные интервалы времени в будущем.

Сейсмическая опасность может быть далее трансформирована в опасность сильных сотрясений. Для этого требуется «прогнозное уравнение сильных сотрясений», желательное, откалиброванное для рудника. Упрощённая функциональная форма прогнозных уравнений, приемлемая для рудников, предложена в работе [Mendecki, 2019].

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты расчётов опасности сильных сотрясений для рудника «Ренисон» для планируемых горных работ, показанных на рис. 2. Интенсивность сотрясений в данном случае выражена в виде «пиковой скорости смещений» (Peak Ground Velocity – PGV), хотя могут использоваться и другие параметры (например, «кумулятивное абсолютное смещение» – Cumulative Absolute Displacement).

Карты «пиковой скорости смещений» могут быть построены для произвольных вероятностей. На практике целесообразно использовать вероятности, соответствующие категориям матрицы оценки рисков, принятой на горнодобывающем предприятии. Как правило, данные матрицы содержат несколько категорий годовой повторяемости опасных явлений, например: «весьма вероятно» – при повторяемости чаще, чем раз в год; «возможно» – менее раза в год, но чаще, чем раз в десять лет; «маловероятно» – реже, чем раз в десять лет. В отношении опасности разрушительных сейсмических событий приемлемая категория повторяемости может быть выбрана, исходя из планируемых сроков службы горных выработок. К примеру, руководством рудника «Ренисон» были запрошены оценки интенсивности сильных сотрясений для категории «маловероятно». Их пространственное распределение представлено на рис. 4. Для других категорий повторяемости карты будут отличаться.

Карты на рис. 4 показывают увеличение ожидаемой амплитуды сильных сотрясений в глубоких частях рудника. На менее глубоких горизонтах опасность сильных сотрясений остаётся неизменной или уменьшается со временем. Подобные карты позволяют планировать крепление выработок для управления разрушениями, обусловленными сейсмическими сотрясениями (seismic shakedown damage).

Тестирование прогнозов средне- и долгосрочной сейсмической опасности

Использование матрицы оценки рисков не является единственной пользой количественной оценки сейсмической опасности. Другая выгода заключается в возможности тестирования прогнозов опасности. Тестирование производится путём сопоставления распределения вероятности крупных сейсмических событий или связанных с ними сотрясений с результатами наблюдений, которые будут получены за прогнозный интервал. Данное тестирование также позволяет сравнивать несколько прогнозов (например полученных,

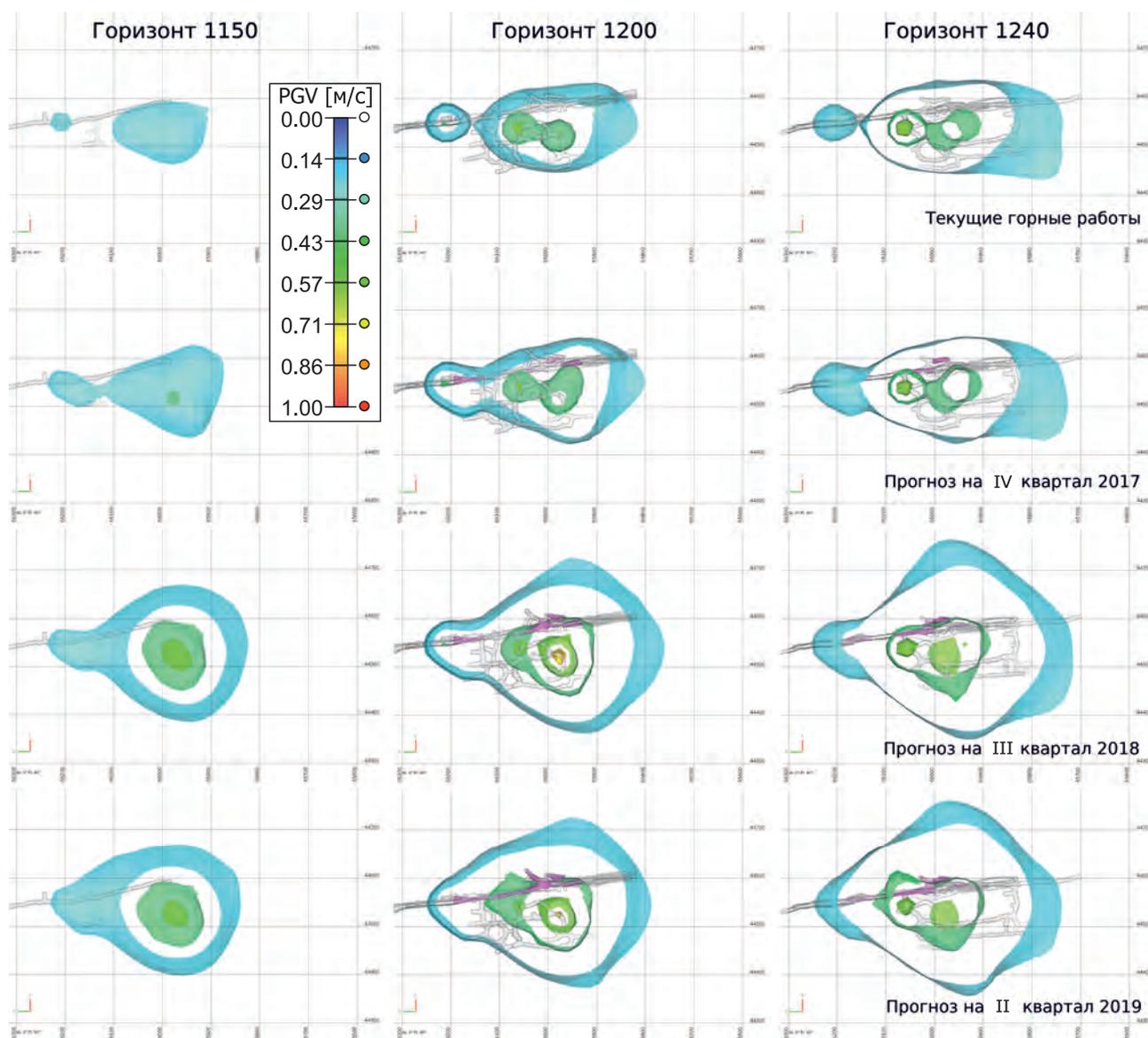


Рис. 4. Ожидаемая эволюция опасности сильных сотрясений для планируемых этапов горных работ на трёх глубоких горизонтах.

Показаны изоповерхности PGV (в m/c), для которых вероятность превышения за квартал (92 дня) составляет 0.025, что соответствует категории «маловероятно» матрицы оценки рисков, используемой на руднике «Ренисон». Серым и розовым цветами показаны, соответственно, существующие выработки и запланированные к отработке блоки

при использовании различных параметров геомеханических моделей) или отслеживать качество конкретного метода прогноза во времени.

Тестирование прогнозов сейсмической опасности получило широкое распространение в последние десять лет в отношении тектонических землетрясений. К примеру, в рамках проекта «Модели вероятностей региональных землетрясений» (Regional Earthquake Likelihood Models – RELM) были предложены процедуры тестирования вероятностных прогнозов землетрясений [Schorlemmer et al., 2007]. Данные процедуры были

применены к прогнозам, выданным различными группами исследователей на пятилетний период для территории Калифорнии [Field, 2007; Schorlemmer et al., 2010]. Впоследствии принципы и методы тестирования вероятностных прогнозов были воплощены в режиме реального времени в виде проекта «Партнёрство для изучения предсказуемости землетрясений» (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability – CSEP) [Zecher et al., 2010]. В настоящий момент в рамках данного проекта осуществляется тестирование прогнозов для нескольких регионов мира.

В проекте CSEP используется несколько статистических тестовых методов, позволяющих оценить успешность конкретного прогноза. Один из тестов CSEP (Area Skill Score) описан в работах [Zechar, Jordan, 2008; Zechar, 2010]. Рис. 5 иллюстрирует принцип работы данного теста на примере горно-геологической конфигурации и сейсмичности, показанных на рис. 1. Тест применяется в сравнительном режиме, когда один прогноз сопоставляется с опорным прогнозом. При этом в качестве опорного прогноза не рекомендуется использовать неквалифицированный прогноз, предполагающий равномерное распределение вероятности землетрясений в пространстве. Более целесообразно сравнивать прогнозы, основанные на различных вариантах моделирования ожидаемой сейсмичности. Это полезно на этапе калибровки геомеханической модели. В качестве опорного можно также использовать прогноз, основанный на осреднении сейсмичности, наблюдаемой в прошлом (в предположении, что «завтра будет таким же, как вчера»). Сравнение с данным прогнозом позволяет отслеживать эффективность прогнозов, основанных на модельной сейсмичности.

При оценке эффективности прогнозов в качестве контрольных событий логично использовать наиболее крупные (потенциально разрушительные) из них. На рис. 5 звёздами показаны четыре подобных события. Предположим, что эти события произошли в одной горизонтальной плоскости и что для данной плоскости есть два прогноза сейсмической опасности (А и Б), выданных на период времени, покрыва-

ющий контрольные события. Данные прогнозы изображены в виде изолиний равной вероятности возникновения потенциально разрушительных событий. Метрика Area Skill Score используется следующим образом:

- рассчитывается распределение увеличения вероятности – отношение вероятностей в прогнозе Б к вероятностям в прогнозе А (правый верхний угол на рис. 5);

- выбирается уровень увеличения вероятности. Определяется область пространства, имеющая более высокие значения увеличения вероятности (область тревоги), и выполняется подсчёт количества контрольных событий, произошедших внутри неё. Размер области тревоги выражается в виде доли от общего объёма, на который выдаются прогнозы (т.е. данная доля изменяется от 0 до 1). Количество контрольных событий внутри области тревоги выражается в виде доли пропусков цели или доли попаданий (также изменяется от 0 до 1);

- вычисления повторяются от наиболее высокого уровня увеличения вероятности к наиболее низкому уровню. Это даёт траекторию на так называемой диаграмме Молчана, вертикальная ось которой описывает долю пропусков цели (или попаданий), а горизонтальная ось соответствует доле пространства, занятой тревогой. Диаграмма показана в правом нижнем углу рис. 5. Если траектория проходит вблизи начала координат (символ улыбки), тогда прогноз Б даёт значительный статистический выигрыш по сравнению с прогнозом А. Если траектория проходит вблизи диагональной ступенча

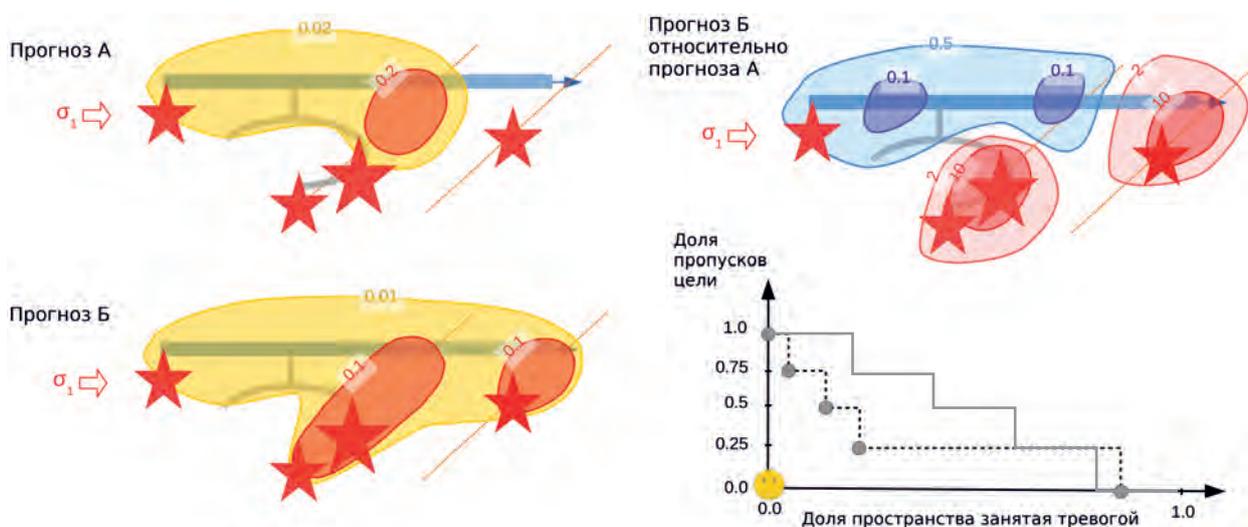


Рис. 5. Схематическая диаграмма, поясняющая сравнение эффективности двух прогнозов сейсмической опасности при помощи метрики Area Skill Score, предложенной в работе [Zechar, Jordan, 2008]

той линии (изображённой на диаграмме серым цветом), то прогноз Б не является статистически выигрышным;

– площадь над построенной траекторией представляет собой метрику Area Skill Score. Она изменяется от 0 (низкая эффективность прогноза А по сравнению с прогнозом Б) до 1 (высокая эффективность прогноза А по сравнению с прогнозом Б).

В иллюстративном примере, приведённом на рис. 5, три из четырёх контрольных событий расположены в областях, где вероятности, согласно прогнозу Б, выше вероятностей прогноза А. Два из этих событий произошли в локальных областях значительного превышения вероятностей согласно Б по сравнению с А. На качественном уровне видно, что прогноз Б лучше. Метрика Area Skill Score позволяет выразить это в количественном виде. В данном случае она примет значение около 0.6–0.7.

Применение Area Skill Score к ретроспективному прогнозу сейсмической опасности на руднике «Ренисон» на II и III кварталы 2017 г. продемонстрировано на рис. 6. Выработки, существовавшие до апреля 2017 г., изображены серым цветом. Блоки, отработанные во II и III кварталах 2017 г., выделены красным цветом. Изоповёрхности характеризуют вероятности происхождения как минимум одного события с $\lg P > -1.0$ в объёме 80000 м^3 : тёмно-синим цветом показана вероятность 0.0003, светло-синим – 0.001, красным – 0.05. В верхней части рисунка показан прогноз, основанный на сейсмичности, зарегистрированной до апреля 2017 года. В средней части рисунка – прогноз, основанный на комбинации зарегистрированной до апреля 2017 г. сейсмичности и сейсмичности, смоделированной для отработанных блоков, показанных красным цветом.

В качестве контрольных использовались 17 событий с $\lg P > -1.0$ (моментная магнитуда выше 0.3). Их местоположение показано на рис. 6 розовыми сферами. Диаграмма Молчана для контрольных событий показана в нижней части рисунка. Диагональная пунктирная линия характеризует сопоставимую успешность двух прогнозов, показанных выше. Серые сплошные линии описывают 90, 95 и 99%-ные доверительные интервалы.

Рис. 6 показывает, что большинство контрольных событий произошло вблизи блоков, отработанных во II и III кварталах 2017 года. В данных областях кластеризуются модельные сейсмические события, что повышает вероятность происхождения событий согласно комби-

нированному прогнозу сейсмической опасности (прогноз Б). Диаграмма Молчана иллюстрирует данный аспект: 10 из 17 контрольных событий произошли в пределах локальных объёмов повышенной вероятности согласно прогнозу Б, которые занимают приблизительно 11–12% от общего объёма. Метрика Area Skill Score принимает значение 0.648, что указывает, что комбинированный прогноз Б обеспечивает статистический выигрыш по сравнению с прогнозом А (основанном только на наблюдаемой в прошлом сейсмичности).

Выводы

Приведённый в статье краткий обзор литературы показывает, что в настоящий момент не существует единого универсального метода оценки сейсмической опасности (или опасности сильных сотрясений) на удароопасных рудниках. Разработанные методы, как правило, акцентируются на конкретных задачах. Например, оценка краткосрочной опасности используется для принятия решений о возобновлении горных работ после крупных сейсмических событий или взрывов. Порядок эвакуации людей из подземных выработок после крупного сейсмического события также должен учитывать результаты оценки краткосрочной опасности (пространственное распределение вероятности афтершоков). Методы расчёта средне- и долгосрочной опасности для различных сценариев горных работ позволяют выбирать более оптимальный сценарий с точки зрения минимизации вероятности разрушения выработок в динамической форме. В отношении шламохранилища или другого ответственного объекта, расположенного на удалении от места ведения горных работ, целесообразно использовать классический «Вероятностный анализ сейсмической опасности», использующий «Прогнозное уравнение сильных сотрясений». В случае динамических разрушений, происходящих на контуре горных выработок вследствие действия локальных напряжений (self-initiated strainbursts), прогноз опасности, выраженный в виде интенсивности сильных сотрясений, интереса не представляет. Более целесообразным становится прогноз вероятностей внезапного неупругого деформирования приконтурного массива.

В литературе можно встретить обсуждение оценок сейсмической опасности на рудниках, представленных не в количественном, а в качественном виде. Например, есть работы, предлагающие выражать опасность в относительных

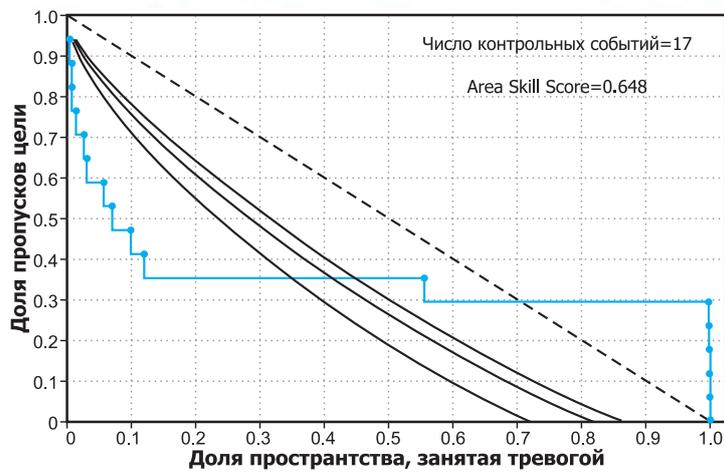
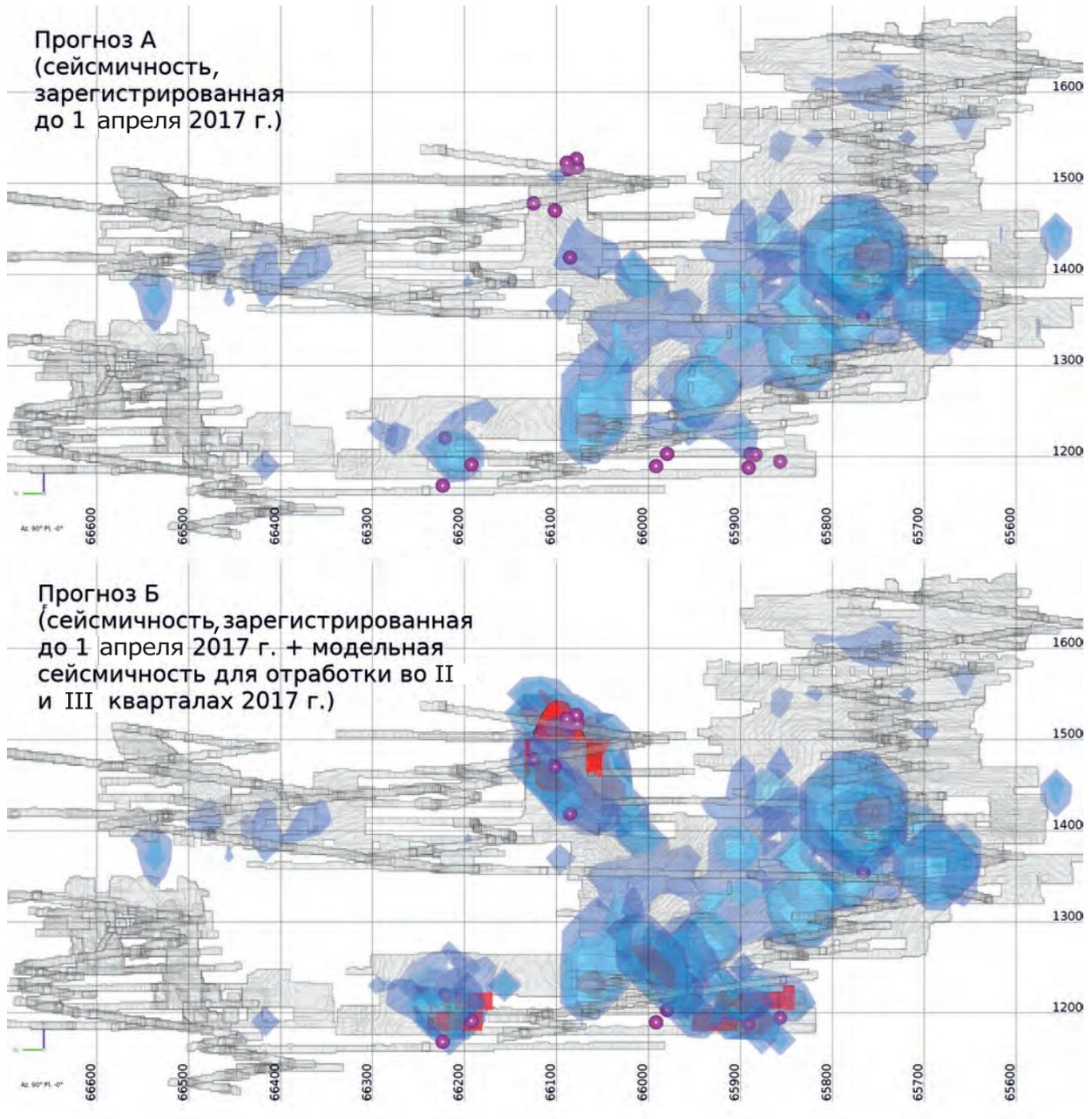


Рис. 6. Тестирование ретроспективного прогноза сейсмической опасности на руднике «Ренисон» на II и III кварталы 2017 г.

единицах («рейтинг опасности»). Или результаты оценки могут быть представлены в виде карт, показывающих области «высокой» и «низкой» опасности без указания конкретных значений вероятности возникновения потенциально разрушительного события или сотрясения. Есть две причины, согласно которым прогнозы сейсмической опасности целесообразно выдавать в количественном виде. Во-первых, количественное выражение сейсмической опасности может быть транслировано в термины матрицы оценки рисков, принятой на горнодобывающем предприятии, что поможет инженеру-геомеханику выбрать адекватный способ реагирования. Во-вторых, количественная оценка сейсмической опасности может быть протестирована после того, как период прогноза истёк, и реальная сейсмичность зарегистрирована. Математический аппарат тестирования прогнозов сейсмической опасности может быть заимствован из глобальной сейсмологии, где он был разработан и получил широкое распространение в последние десятилетия.

Средне- или долгосрочный прогнозы сейсмической опасности целесообразно использовать в сравнительном режиме, сопоставляя различные сценарии будущих горных работ. Практическая польза от абсолютного (единственного) средне- и долгосрочного прогноза является ограниченной ввиду целого ряда факторов. Во-первых, довольно часто реализация горных работ не следует плану. Во-вторых, в процессе ведения горных работ часто появляется новая информация, не учтённая в исходной геомеханической модели (к примеру, поправки к геологической модели, новые данные о поле напряжений и т.п.). Всё это обуславливает необходимость корректировки прогноза. Таким образом, для управления сейсмической опасностью целесообразно воплотить непрерывный цикл: оценка сейсмической опасности на интервал А → тестирование прогноза после истечения интервала А → корректировка геомеханической модели → оценка сейсмической опасности на интервал Б → тестирование прогноза после истечения интервала Б → ... Длительность интервалов (А, Б, ...) имеет смысл увязать с установленной на руднике периодичностью обсуждения/защиты планов горных работ (раз в квартал или раз в год).

Видится, что в перспективе реализация прогноза сейсмической опасности в рудниках будет напоминать прогнозирование погоды, воплощённое в современных метеорологических центрах. Оценка метеорологических параметров (температура, влажность и т.п.) выполняется не

на долгосрочный период (месяц и год), а лишь на несколько дней. При этом прогноз оперативно (несколько раз в день) обновляется, используя комплексирование синоптических наблюдений с цифровой моделью метеорологических параметров [Inness, Dorling, 2013].

Благодарности

Обзор методов оценки сейсмической опасности в рудниках является частью проекта «Review of the current practice of mining induced seismic hazard quantification at Cadia East and Telfer mines (incl. recommendation for a single standard)» для компании Newcrest Mining (Австралия). Использованный в статье метод оценки сейсмической опасности и опасности сильных сотрясений был разработан в рамках исследовательского проекта IMS “Modelling and Assimilation of Seismicity using Boundary Element Method (A-MAS)”, поддержанного рудником “El Teniente” (Чили), компаниями LKAB (Швеция) и Newcrest Mining (Австралия).

Рудник «Ренисон» любезно разрешил опубликовать результаты. Автор благодарен главному инженеру-геомеханику рудника Кевину Стейси за предоставленную информацию и обсуждение результатов.

Ряд полезных предложений касательно оценки сейсмической опасности предоставлен Александром Мендецки. Эрнест Лоттер и Хейс Бассон оказали помощь в вычислениях и визуализации результатов.

Литература

- Линьков А.М. Численное моделирование сейсмических и асейсмических событий в геомеханике // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 1. – С. 19–33.
- Beck D.A., Brady B.H.G. Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39, N 5. – P. 633–642.
- Beck D., Reusch F., Arndt S. Estimating the probability of mining-induced seismic events using mine-scale, inelastic numerical models // Proceedings of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining. – Crawley: Australian Centre for Geomechanics, 2007. – P. 31–41.
- Cai M., Kaiser P.K. Rockburst support reference book. Volume I: Rockburst phenomenon and support characteristics. – Sudbury: Laurentian University, 2018.
- Collins D.S. et al. Microseismic real time and advanced analysis in mines // Proceedings of the 13th ISRM

- International Congress of Rock Mechanics. – Montreal: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015.
- Field E.H.* Overview of the working group for the development of regional earthquake likelihood models (RELM) // *Seismological Research Letters*. – 2007. – V. 78, N 1. – P. 7–16.
- Inness P.M., Dorling S.* Operational weather forecasting. – New York: John Wiley & Sons, 2012.
- Lasocki S.* Probabilistic analysis of seismic hazard posed by mining induced events // *Proceedings of the Sixth Int. Symp. on Rockburst and Seismicity in Mines «Controlling Seismic Risk»*. – Nedlands: Australian Centre for Geomechanics, 2005. – P. 9–11.
- Lasocki S.* Probabilistic seismic hazard analysis for mining-induced seismicity // *Proceedings of the 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*. – Paramus: Rinton Press, 2009. – P. 59–72.
- Levkovitch V., Beck D., Reusch F.* Numerical simulation of the released energy in strain-softening rock materials and its application in estimating seismic hazards in mines // *Proceedings of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines / Eds. A. Malovichko, D. Malovichko*. – Obninsk: Geophysical Survey of Russian Acad. of Sciences; Perm: Mining inst. of Ural Branch of Russian Acad. of Sciences, 2013. – P. 259–266.
- Linkov A.M.* Keynote lecture: Numerical modelling of seismicity: Theory and applications // *Proceedings of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines / Eds. A. Malovichko, D. Malovichko*. – Obninsk: Geophysical Survey of Russian Acad. of Sciences; Perm: Mining inst. of Ural Branch of Russian Acad. of Sciences, 2013. – P. 197–218.
- Linkov A.M., Rybarska-Rusinek L., Zoubkov V.V.* Reasonable sets of input parameters and output distributions for simulation of seismicity // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2016. – V. 84. – P. 87–94.
- Malovichko D., Basson G.* Simulation of mining-induced seismicity using the Salamon–Linkov method // *Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Australian Centre for Geomechanics, 2014. – P. 667–680.
- Malovichko D.A.* Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences // *Proceedings of the 8th international conference on deep and high stress mining*. – Obninsk: Geophysical Survey of Russian Acad. of Sciences; Perm: Mining inst. of Ural branch of Russian Acad. of Sciences 2013. – P. 28–30.
- Malovichko D., Cuello D., Rojas E.* Analysis of damaging seismic event on 24 December 2011 in the Pilar Norte sector of El Teniente mine // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. – Crawley: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 637–650.
- Malovichko D.A.* Calibrating and testing of the forecasts of seismic hazard for planned mining sequences // *Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk*. – Crawley: Australian Centre for Geomechanics, 2019. – P. 245–258.
- McGuire R.K.* Seismic hazard and risk analysis. – Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2004.
- Mendecki A.* Seismic monitoring in mines. – London: Chapman and Hall, 1997. – 262 p.
- Mendecki A.J.* Mine seismology reference book: seismic hazard – Institute of Mine Seismology, 2016. – 88 p.
- Mendecki A.* Keynote lecture: Mapping seismic ground motion hazard in mines // *Proceedings of the 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines*. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – P. 2–14.
- Mendecki A.J.* Simple GMPE for underground mines // *Acta Geophysica*. – 2019. – V. 67, N 3. – P. 837–847.
- Salamon M.D.G.* Keynote address: Some applications of geomechanical modelling in rockburst and related research // *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. – Rotterdam: AA Balkema, 1993. – P. 297–309.
- Schorlemmer D. et al.* Earthquake likelihood model testing // *Seismological Research Letters*. – 2007. – V. 78, N 1. – P. 17–29.
- Schorlemmer D., Zechar J.D., Werner M.J., Jackson D.D., Field E.H., Jordan T.H., & the RELM Working Group.* First results of the regional earthquake likelihood models experiment // *Seismogenesis and Earthquake Forecasting: The Frank Evison Volume II*. – Basel: Springer, 2010. – P. 5–22.
- Trifu C. I., Shumila V.* Seismic hazard assessment in mines using a marked spatio-temporal point process model // *Controlling Seismic Risk*. – 2005. – P. 461–467.
- Trifu C.I., Shumila V., Chen D.* Analysis of peak particle velocity and acceleration distributions at Darlot gold mine, Australia. // *Proceedings of the 6th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2005 – P. 175–179.
- Wesseloo J.* The spatial assessment of the current seismic hazard state for hard rock underground mines // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – V. 51, N 6. – P. 1839–1862.
- Woodward K.* Identification and delineation of mining induced seismic responses. Ph.D. thesis. – University of Western Australia, 2015.
- Zechar J.D., Jordan T.H.* Testing alarm-based earthquake predictions // *Geophysical Journal International*. – 2008. – V. 172, N 2. – P. 715–724.
- Zechar J.D.* Evaluating earthquake predictions and earthquake forecasts: A guide for students and new researchers // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. – 2010. – P. 1–26.

Zechar J.D., Schorlemmer D., Liukis M., Yu J., Euchner F., Maechling P.J., Jordan T.H. The collaboratory for the study of earthquake predictability perspective

on computational earthquake science // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. – 2010. – V. 22, N 12. – P. 1836–1847.

Сведения об авторе

Маловичко Дмитрий Алексеевич, канд. техн. наук, Директор и руководитель отдела прикладной сейсмологии, Institute of Mine Seismology, Тасмания, Австралия. E-mail: natagold-86@inbox.ru

Assessment of seismic hazard in mines

© 2020 D.A. Malovichko

Institute of Mine Seismology, Tasmania, Australia

Abstract The assessment of seismic hazard in mines has several peculiarities compared to the similar assessment for tectonic earthquakes: (a) in mines seismicity is typically induced by the extraction of rocks, what makes the assessment of hazard depends on the planned mining sequence, (b) many seismic events in mines have source mechanisms different from the mechanisms of tectonic earthquakes, (c) the likelihoods of both strong ground motion from distant seismic events and localized sudden inelastic deformation on the contour of excavations are of interest, (d) the spatial distribution of seismic hazard may experience significant change over relatively short periods of time (several years), which makes it possible to implement rigorous testing of the hazard forecasts, selection of optimal forecast method and its calibration. This paper provides a brief review of recent publications on the assessment of seismic hazard in mines. The method of intermediate- and long-term hazard forecast based on the combination of observed seismicity and seismicity modeled for the planned mining sequence is discussed in detail. The application of this method at the acting underground mine in Australia is presented.

Keywords forecast of seismic hazard, planned mining sequence, numerical stress modelling, testing of forecasts.

For citation Malovichko, D.A. (2020). [Assessment of seismic hazard in mines]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(2), 21-38. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>

References

Beck, D., Reusch, F., & Arndt, S. (2007, November). Estimating the Probability of Mining-Induced Seismic Events using Mine-Scale, Inelastic Numerical Models. In *Proceedings of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining* (pp. 31-41). Australian Centre for Geomechanics.

Beck, D.A., & Brady, B.H.G. (2002). Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(5), 633-642.

Cai, M., & Kaiser, P.K. (2018). Rockburst support reference book. Volume I: Rockburst phenomenon and support characteristics. Laurentian University, Sudbury, 284 p.

Collins, D.S., Shumila, V., Butler, T., Hosseini, Z., & Trifu, C.I. (2015). Microseismic real time and advanced analysis in mines. In *13th ISRM International Congress*

of Rock Mechanics. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Field, E.H. (2007). Overview of the working group for the development of regional earthquake likelihood models (RELM). *Seismological Research Letters*, 78(1), 7-16.

Inness, P.M., & Dorling, S. (2012). *Operational weather forecasting*. John Wiley & Sons.

Lasocki, S. (2005). Probabilistic analysis of seismic hazard posed by mining induced events. In *Proceedings of the Sixth Int. Symp. on Rockburst and Seismicity in Mines "Controlling Seismic Risk"* (pp. 9-11).

Lasocki, S. (2009). Probabilistic seismic hazard analysis for mining-induced seismicity. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines* (pp. 59-72). Rinton Press.

Levkovitch, V., Beck, D., & Reusch, F. (2013). Numerical simulation of the released energy in strain-softening

- rock materials and its application in estimating seismic hazards in mines. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines* (pp. 259-266).
- Linkov, A.M. (2005). [Numerical modeling of seismic and aseismic events in geomechanics]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining], 1, 19-33. (In Russ.).
- Linkov, A.M. (2013). Keynote lecture: Numerical modelling of seismicity: Theory and applications. In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines* (pp. 197-218).
- Linkov, A.M., Rybarska-Rusinek, L., & Zoubkov, V.V. (2016). Reasonable sets of input parameters and output distributions for simulation of seismicity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, 87-94.
- Malovichko, D., & Basson, G. (2014). Simulation of mining-induced seismicity using the Salamon-Linkov method. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining* (pp. 667-680). Australian Centre for Geomechanics.
- Malovichko, D., Cuello, D., & Rojas, E. (2018). Analysis of damaging seismic event on 24 December 2011 in the Pilar Norte sector of El Teniente mine. In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving* (pp. 637-650). Australian Centre for Geomechanics.
- Malovichko, D.A. (2017). Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining* (pp. 28-30). Australian Centre for Geomechanics.
- Malovichko, D.A. (2019). Calibrating and testing of the forecasts of seismic hazard for planned mining sequences. In *Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk* (pp. 245-258). Australian Centre for Geomechanics.
- McGuire, R.K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Mendecki, A. (1997). *Seismic monitoring in mines*. London, UK: Chapman and Hall, 262 p.
- Mendecki, A. (2017). Keynote lecture: Mapping seismic ground motion hazard in mines. In *Proceedings of the 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines* (pp. 2-14).
- Mendecki, A.J. (2016). *Mine seismology reference book: seismic hazard*. Institute of Mine Seismology, 88 p.
- Mendecki, A.J. (2019). Simple GMPE for underground mines. *Acta Geophysica*, 67(3), 837-847.
- Salamon, M.D.G. (1993). Keynote address: Some applications of geomechanical modelling in rockburst and related research. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines* (pp. 297-309). Rotterdam, Netherlands: AA Balkema.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M.C., Wiemer, S., Jackson, D.D., & Rhoades, D.A. (2007). Earthquake likelihood model testing. *Seismological Research Letters*, 78(1), 17-29.
- Schorlemmer, D., Zechar, J.D., Werner, M.J., Field, E.H., Jackson, D.D., Jordan, T.H., & RELM Working Group. (2010). First results of the regional earthquake likelihood models experiment. In *Seismogenesis and Earthquake Forecasting: The Frank Evison Volume II* (pp. 5-22). Basel, Switzerland: Springer.
- Trifu, C.I., & Shumila, V. (2005). Seismic hazard assessment in mines using a marked spatio-temporal point process model. *Controlling Seismic Risk*, 461-467.
- Trifu, C.I., Shumila, V. & Chen, D. (2005). Analysis of peak particle velocity and acceleration distributions at Darlot gold mine, Australia. In *Proceedings of the 6th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines* (pp. 175-179). Perth, Australia: Australian Centre for Geomechanics.
- Wesseloo, J. (2018). The spatial assessment of the current seismic hazard state for hard rock underground mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(6), 1839-1862.
- Woodward, K. (2015). *Identification and delineation of mining induced seismic responses* (Ph.D. thesis). University of Western Australia.
- Zechar, J.D. (2010). Evaluating earthquake predictions and earthquake forecasts: A guide for students and new researchers. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 126.
- Zechar, J.D., & Jordan, T.H. (2008). Testing alarm-based earthquake predictions. *Geophysical Journal International*, 172(2), 715-724.
- Zechar, J.D., Schorlemmer, D., Liukis, M., Yu, J., Euchner, F., Maechling, P.J., & Jordan, T.H. (2010). The Collaboratory for the study of earthquake predictability perspective on computational earthquake science. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 22(12), 1836-1847.

Information about author

Malovichko Dmitry Alekseevich, PhD, Director and Head of Applied Seismology, Institute of Mine Seismology, Tasmania, Australia. E-mail: natagold-86@inbox