

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ

Дягилев Р.А.

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, dr@mi-perm.ru

Введение

Большое количество активно разрабатываемых месторождений на Урале делает техногенную сейсмичность отдельных территорий довольно серьезной проблемой для жилых и промышленных зданий и сооружений, а также для населения, не привыкшего к неприятным макросейсмическим эффектам. Поскольку строительство в РФ осуществляется только с учетом природного фактора сейсмичности, в районах распространения техногенных землетрясений сейсмическая опасность может быть недооценена.

Одним из районов, где присутствуют практически все виды техногенных воздействий на среду, которые могут провоцировать рост сейсмической активности и, как следствие, сейсмической опасности, является Урал. Благоприятным фактором для изучения техногенной сейсмичности в регионе является наличие региональной сети сейсмических станций [3], а также множество локальных сетей сейсмологического мониторинга, действующих на основных горнодобывающих объектах [9, 11, 19].

Так как на Урале хорошо развита горнодобывающая промышленность, следствием подземной разработки некоторых месторождений являются техногенные землетрясения, проявляющиеся в виде горных и горно-тектонических ударов (ГУ и ГТУ), обвалов. ГУ и ГТУ в регионе известны с 30-х годов XX века и наиболее широкое распространение получили в районе разработки Кизеловского угольного бассейна. С закрытием угольных шахт техногенная сейсмичность на месторождении прекратилась [5, 10]. В настоящее время наибольший вклад по ГТУ дают шахты Североуральского бокситового месторождения и железорудные шахты в г. Нижний Тагил (Свердловская область) [2], отдельные события зафиксированы и на меднорудном карьере в г. Учалы (Башкортостан) [6]. В данных районах региональная сейсмическая сеть регулярно фиксирует очаги с магнитудой $2 < M_L < 3.5$. Некоторые очаги достигали магнитуды M_L 4.2 [18].

Сейсмичность обвального характера наиболее характерна для Верхнекамского месторождения калийных солей (Пермский край). Обрушения больших масс пород на подработанных территориях также сопровождаются ощутимыми сотрясениями. Самое сильное землетрясение обвального типа имело место в г. Соликамск 5 января 1995 г., оно имело магнитуду M_s 3.8 [12]. Сейчас в связи с затоплением рудников на территории месторождения получили развитие множество провальных явлений, которые также сопровождаются макросейсмическими эффектами [7].

Также региональной сетью фиксируется сейсмическая активность в районах разработки нефтяных месторождений [1, 8]. Пока инструментальных и макросейсмических данных о таких явлениях в регионе мало, однако фактор их близости к населенным пунктам и промышленным объектам также требует повышенного внимания.

Не смотря на присутствие в регионе нескольких водохранилищ, пока нет сведений об их влиянии на местную сейсмичность. Известны лишь слабые морозобойные удары непосредственно в ледовом покрытии таких водоемов, имеющие сезонный характер [18].

С точки зрения возможного вреда от сейсмического воздействия, практически нет разницы в том, каким типом техногенного сейсмического источника он вызван. В число таковых могут входить и технологические и массовые взрывы на карьерах ($1.5 < M_L < 3$), которые в ближайших к ним населенных пунктах ощущаются так же, как и другие землетрясения.

Таким образом, на фоне наращивания производственных мощностей добычи полезных ископаемых, открытия новых рудников и строительства объектов инфраструктуры горнодобывающих предприятий значимость исследований по уточнению сейсмической опасности в последнее время существенно возросла. Для того чтобы получить оценки сейсмической опасности на некоторой территории в связи с необходимостью учета фактора техногенных землетрясений, воспользуемся общепризнанным вероятностно-детерминистским подходом [20, 21, 31] в рамках которого будем решать следующие задачи:

1. разработка модели сейсмогенерирующих зон, соответствующих возможным техногенным источникам (зон возникновения очагов техногенных землетрясений – ВОТЗ);

2. выделение на исследуемой территории зоны ВОТЗ и описание их в соответствие с разработанной моделью, опираясь на данные инструментальных наблюдений;
3. параметризация модели распространения макросейсмического эффекта, согласно региональным или иным особенностям затухания сейсмических волн;
4. создание виртуального сейсмического каталога, статистически адекватно отражающего сейсмический режим на годы вперед и позволяющего рассчитать вероятностные оценки сейсмической опасности на заданные интервалы ожидания.

Годы сейсмологических наблюдений в регионе и на рудниках Урала позволили вплотную подойти к решению данных задач. Для этого имеется представительный каталог местных сейсмических событий, произошедших в период 1990-2014 гг., начиная с магнитуды M_L 2. Большую часть данных событий составляют взрывы (90%). В меньшей степени представлены горно-тектонические удары (6.1%), обвальные землетрясения (1.3%) и подвижки в районах отработки нефтяных залежей (0.4%). Оставшиеся 2.2% – события природного происхождения, представленные тектоническими землетрясениями (2%) и другими еще более редкими явлениями, которые в рамках данной задачи не берутся в расчет. В то же время значение имеют данные о механизмах сейсмических явлений, происходящих в горных выработках [13, 14, 26] и макросейсмические сведения, собранные для всех последних землетрясений в районе исследований [4].

Модель зон возникновения очагов техногенных землетрясений

В случае с техногенной сейсмичностью сейсмогенерирующими зонами будут являться такие области геосреды, которые несут потенциальную угрозу возникновения (или ускорения реализации) в них сейсмических событий, благодаря воздействию на эти области человека. Поскольку большинство техногенных землетрясений связано с разработкой месторождений полезных ископаемых, в качестве первого приближения зоны ВОТЗ следует рассматривать непосредственно шахты, рудники, карьеры, нефтяные залежи и т.п. Если техногенная сейсмичность обусловлена другими факторами воздействия человека на геосреду, например, созданием водохранилищ, то зоны ВОТЗ будут тяготеть к затопляемым территориям. В любом случае, положение и границы таких зон хорошо известны не только для ныне существующих объектов, но и для планируемых, что позволяет использовать их для моделирования местоположения будущих гипоцентров сейсмических очагов.

Модель сейсмогенерирующей зоны должна определять пространственные особенности возникновения очагов и описывать энергетическую структуру сейсмического режима. В отличие от природной сейсмичности, характер проявления которой считается постоянным на протяжении многих тысяч лет, техногенная сейсмичность заставляет принимать во внимание фактор времени, так как от него параметры сейсмического режима зависят существенно.

Для простоты небольшим по размерам зонам ВОТЗ можно придать форму прямоугольной призмы (рис. 1), хотя не будет проблематичным наиболее крупные и сложные по форме зоны представить группой нескольких призм. Большинство сейсмических очагов сосредоточено внутри самих зон, хотя конкретное пространственное распределение событий относительно границ зоны все же будет зависеть от типа источника и, конечно, может варьировать от объекта к объекту.

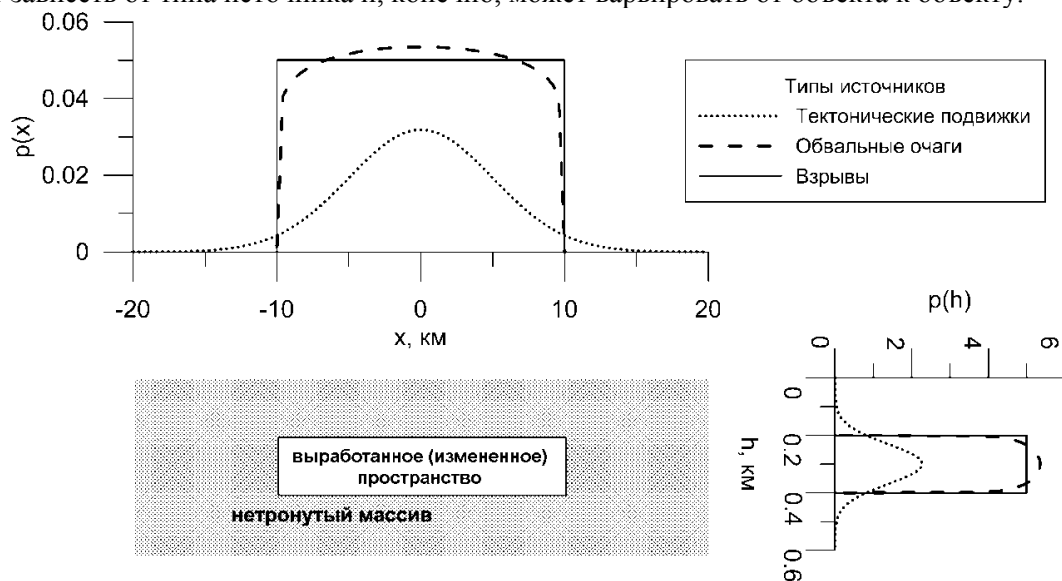


Рис. 1. Плотности вероятности распределения техногенных очагов относительно границ отработанных пространств: $p(x)$ – в плане, $p(h)$ – по глубине

В силу более частой реализации наиболее изученными типами техногенных очагов являются горные и горно-тектонические удары, которые представляют собой хрупкие разрушения предельно напряженной части подработанного породного массива [17]. Не вдаваясь в детали и причины возникновения благоприятных условий для ГУ и ГТУ, отметим, что их механизмы и энергетическая структура (закон повторяемости) связанной с ними сейсмичности практически не отличаются от природных аналогов – тектонических землетрясений. Мало отличий от них имеют и землетрясения, вызванные откачкой нефти или заполнением больших искусственных резервуаров. Они также являются подвижками, а их проявления подчиняется закону повторяемости Гутенберга-Рихтера. Отличия наблюдаются лишь в конкретных значениях параметров закона повторяемости, при этом события с максимальной магнитудой, которые не превышают порог максимальных магнитуд природных очагов того же района, могут реализовываться многократно на одних и тех же участках.

Наблюдения в районах частого проявления ГУ и ГТУ показывают, что максимум функции распределения техногенных подвижек тяготеет к центральной части выработанного пространства (горного отвода) как в плане, так и по глубине. Это место наибольшего сосредоточения дополнительных напряжений, возникших в результате выемки пород. С удалением от границ горного отвода неоднородность действующих напряжений, как и количество связанных с ними событий, снижается, постепенно достигая фоновых значений. Таким образом, вид функции пространственного распределения техногенных тектонических очагов близок к нормальному (рис. 1, сплошная линия). Согласно отмеченному ранее опыту наблюдений в Кизеловском угольном бассейне, устранение фактора внесения изменений в среду (остановка добычи) ведет к прекращению техногенной сейсмичности. Таким образом, временные рамки данного явления будут ограничены продолжительностью эксплуатации месторождения, но, возможно, с небольшим интервалом времени, необходимым для залечивания массива и восстановления в нем естественного поля напряжений.

Очаги обвального типа более жестко привязаны к границам измененного пространства, так как для них в отличие от тектонических событий необходимым условием возникновения является не действие напряжений, а наличие пустот, которых в нетронутом массиве нет. Типичные представители зон ВОТЗ с очагами обвального типа – это горные выработки. Пространственное распределение обвальных очагов относительно горных выработок в плане близко к равномерному в пределах самих выработок. Незначительное снижение плотности вероятности у границ выработанных пространств (рис. 1, пунктирная линия) обусловлено тем, что эпицентры самих очагов (падающих блоков), в силу конечности их размеров, всегда смещены от края. Величина смещения, если принять форму очагов изометричной, равна половине размера падающего блока. Распределение обвальных очагов по глубине в первом приближении можно считать равномерным или даже фиксированным на одной отметке, так как ширина диапазона глубин обвальных очагов незначительна (обычно первые десятки метров), и на расстояниях далее первых сотен метров разница в сейсмическом эффекте от разноглубинных очагов будет практически незаметна.

Период существования зон возможного возникновения обвальных очагов так же, как и для ГТУ, привязан ко времени существования условий для обрушений, то есть самих выработок и в целом достаточно предсказуем.

Для очагов обвального типа также характерно подчинение закону повторяемости Гутенберга-Рихтера, однако в реализации обвальных землетрясений в период эксплуатации месторождения могут иметь место некоторые особенности. Поскольку основными факторами, определяющими проявление обвальных очагов, являются подземные пустоты, максимальная магнитуда событий-обрушений M_{max} не привязана к магнитуде сильнейших природных (тектонических) очагов исследуемого района, а определяется высотой падения и массой падающих блоков [15]. При сравнительно небольшом диапазоне возможных вертикальных размеров выработок (высота падения) основным фактором, влияющим на M_{max} обвальных очагов, будет являться масса обрушаемых пород. Последняя, очевидно, в большей степени будет зависеть от максимальных горизонтальных размеров подработанных и незаложенных пространств. Анализ параметров нескольких аварийных ситуаций, связанных с формированием очагов обвального типа на различных месторождениях мира [22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32] показывает, что магнитуда события-обрушения с логарифмом размера очага связана линейно (рис. 2). Эта зависимость позволяет определять сейсмический потенциал (M_{max}) подработанной территории по размерам созданных в процессе отработки или даже запроектированных пустот.

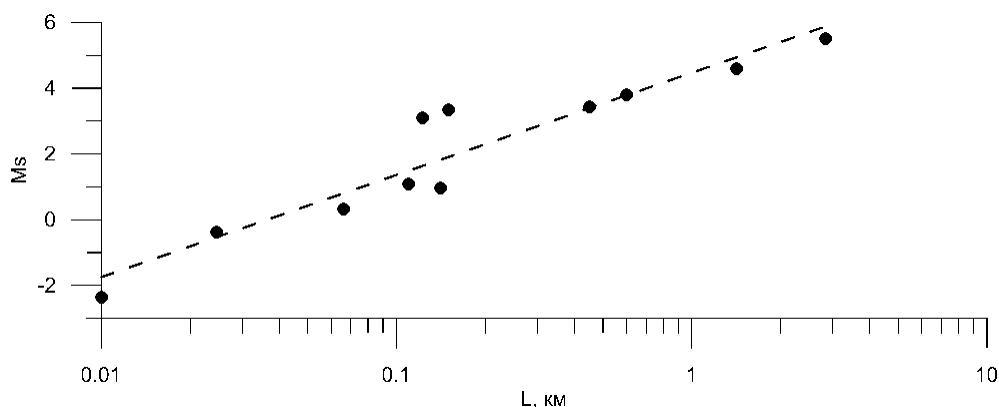


Рис. 2. Связь магнитуды обвальных землетрясений со средним размером блока обрушенной породы

Взрывы как источники техногенных сейсмических воздействий отличаются от прочих событий своей предсказуемостью. Их пространственное положение практически полностью контролируется человеком и не может выходить за границы зоны ВОТЗ. Поэтому для взрывов можно принять равномерное распределение в пределах всего горного отвода и в плане, и по глубине (рис.1, точечная линия). Распределение очагов во времени также можно считать равномерным. Границы равномерного распределения будут определяться временными рамками эксплуатации месторождения.

Другая отличительная особенность взрывов – они подчиняются закону повторяемости, имеющему вид нормального распределения относительно некоторой средней магнитуды M_{cp} , которая постоянна для каждого конкретного объекта. Эта магнитуда пропорциональна определенной массе заряда взрывчатого вещества, наиболее частое использование которого оправдано технологическими особенностями разработки. Собственно частота взрывов определяется текущей потребностью добываемого на объекте сырья.

Модель распространения макросейсмического эффекта вблизи зон ВОТЗ

Для адекватной оценки сейсмической опасности, учитывающей влияние техногенной сейсмичности, является корректный учет модели затухания сейсмического эффекта сильных (ощущаемых) землетрясений в пространстве. Учитывая специфику рассматриваемых очагов, модель затухания сейсмического эффекта (уравнение макросейсмического поля) для них будет иметь существенные отличия от модели, принятой для природных землетрясений. Последние имеют очаги, для которых условия реализации создаются на сравнительно больших глубинах, чем для техногенных источников, которые в подавляющем большинстве являются поверхностными ($h < 1$ км).

Многочисленные данные о характере распространения макросейсмического эффекта от техногенных очагов [4] свидетельствуют, что основная доля энергии от них распространяется в виде поверхностных волн, которые затухают медленнее объемных и, в то же время, при сопоставимых расстояниях создают меньшие по интенсивности сотрясения. Наиболее адекватно распространение макросейсмического эффекта от приповерхностных источников характеризует уравнение

$$I = 1.5M_s - 2.67 \lg R + 1.16. \quad (1)$$

где R – расстояние до гипоцентра в км, M_s – магнитуда очага. Уравнение опирается на данные [4], полученные в диапазоне расстояний $0.5 \leq R \leq 20$ км и диапазоне магнитуд M_s от 0.8 до 4.4.

Уточнение сейсмической опасности вблизи зон ВОТЗ

Представленная выше модель ВОТЗ позволяет достаточно точно описать пространственное распространение техногенных очагов, особенно для обрушений и взрывов, область распространения которых ограничена горными отводами. Учитывая, что практически на каждом горнодобывающем объекте, где имеются сильные динамические проявления горного давления, будь то горные удары или обвалы, ведутся постоянные сейсмологические наблюдения, существует возможность инструментального уточнения функции плотности вероятности пространственного распределения очагов любого типа относительно шахтных полей. С помощью локальных сейсмических наблюдений на шахтах и рудниках не представляет особого труда определить параметры закона повторяемости всех основных типов сейсмических событий. Современные сейсмологические наблюдения в масштабе всего региона также не вносят существенных ограничений на возможность выявления характера распространения сейсмических очагов вблизи нефтяных месторождений и водохранилищ. В какой-то степени этому способствует и имеющийся мировой опыт [16]. Временные рамки

существования зон ВОТЗ, легко установить, опираясь на открытые данные о запасах добываемого сырья и скорости добычи.

В результате рассмотрения множества объектов-кандидатов на зоны ВОТЗ на Урале нами составлена база данных, в которую внесены следующие параметры:

- пространственные границы объекта;
- максимальная глубина очагов, h_{max} ;
- максимальная магнитуда возможных очагов в пределах зоны, M_{max} ;
- коэффициенты закона повторяемости (для подвижек и обрушений: a – сейсмическая активность, b – наклон графика повторяемости; для взрывов: M_{cp} – средняя магнитуда взрывов, σM – стандартное отклонение магнитуд, среднегодовое количество взрывов, N , с магнитудой M_{cp});
- период существования (T_1 – год начала, T_2 – год завершения).

Имея уточненную модель распространения сейсмического эффекта от техногенных очагов можно перейти к расчету сейсмической опасности, связанной с их возникновением, в рамках общепризнанного вероятностно-детерминистского подхода [20, 21, 31]. Знание параметров сейсмичности в каждой зоне позволяет сформировать виртуальный каталог техногенных землетрясений. В отличие от природной сейсмичности техногенные очаги нельзя смоделировать во времени слишком далеко в будущее и тем самым понизить ошибку расчета сейсмической интенсивности в пространстве с 0.5-1 балла (ошибка определения интенсивности единичного землетрясения) до желаемых 0.1 балла.

Каталог виртуальной сейсмичности района, рассчитанный на ближайшие 150 лет, позволил нам оценить интенсивность на исследуемой площади по сетке 5×5 км. Для этого в каждом узле по совокупности всех событий с использованием зависимости (1) определялись параметры повторяемости сотрясений в виде $I(T)$. Далее по периоду повторяемости T , соответствующему стандартным периодам ожидания нормативных карт общего сейсмического районирования (100, 500, 1000, 2500, 5000 и 10000 лет), узлу присваивались значения максимальной интенсивности. В результате таких построений для территории Среднего Урала получены карты сейсмической опасности, учитывающие возможные техногенные проявления сейсмичности (рис. 3). Представленные карты отражают лишь сейсмическую интенсивность, превышающую порог 5 баллов, который принят в качестве минимального фоновый уровня природной сейсмичности на действующих нормативных картах ОСР-97.

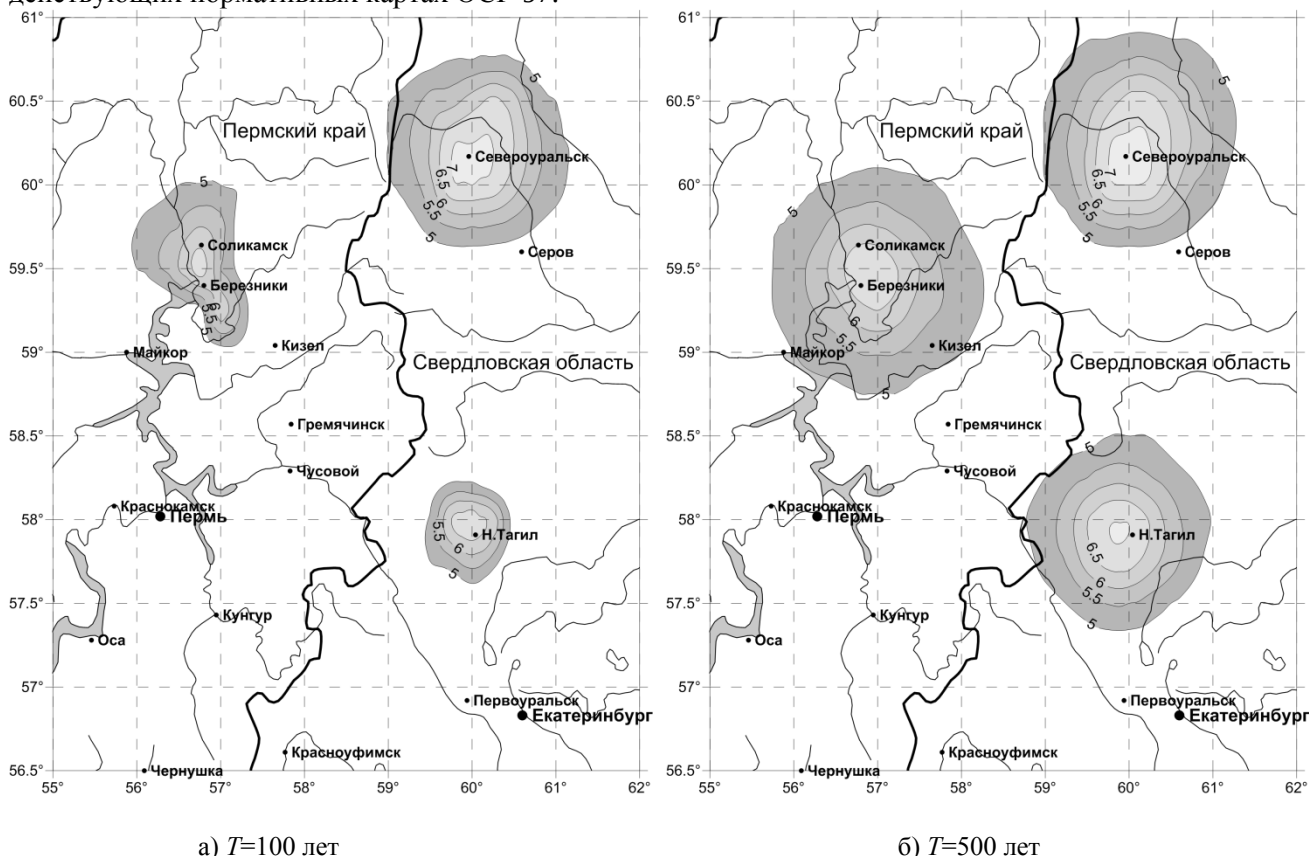


Рис. 3. Карты сейсмической опасности, обусловленной техногенной сейсмичностью Среднего Урала

Обсуждение результатов и выводы

Полученные результаты показывают, что влияние техногенной сейсмичности, обусловленной наличием под землей выработанных пространств, для Среднего Урала является значимым. Отмечаемые уровни сейсмической опасности для периодов повторяемости, сопоставимых со сроками отработки месторождений (100 и 500 лет), превышают фоновый порог на 1.5-2 балла для трех групп зон ВОТЗ, которые сконцентрированы в шахтах Североуральска и Нижнего Тагила в Свердловской области и на рудниках Соликамска и Березников в Пермском крае. В то же время расчет карт для периодов повторяемости $T > 500$ лет, показывает, что уровень сейсмической опасности, связанной с техногенной сейсмичностью, практически не меняется с увеличением T . Именно таким образом проявляет себя ограниченность виртуального каталога сейсмических явлений во времени.

На полученных картах практически никак не проявили себя зоны ВОТЗ, связанные с производством буровзрывных работ на карьерах. Если быть точным, то некоторые такие зоны все же создают участки с аномальными интенсивностями на расстояниях первых десятков км, но максимальные величины интенсивности в их пределах, как правило, не превышают 3.5 баллов и на представленных картах не видны.

Таким образом, разработанная модель зон ВОТЗ позволила количественно оценить ожидаемые изменения сейсмической интенсивности на поверхности в связи с присутствием техногенной сейсмичности. Существенный вклад при параметрическом наполнении данной модели дали многолетние сейсмологические наблюдения на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей, Североуральского бокситового месторождения и в регионе в целом, благодаря наличию локальных сейсмических сетей и сети региональных станций.

Согласно общепринятому при расчете сейсмической опасности вероятностно-детерминистскому подходу некоторые области исследуемой территории, считающиеся условно асейсмичными (сейсмическая опасность, обусловленная природными землетрясениями, не превышает 5 баллов), получили дополнительные 1-2 балла, что для ряда ответственных промышленных объектов, которые сосредоточены в данных районах или планируются к постройке, имеет большое значение.

Список литературы

1. Быков В.Н., Филиппов А.И. Организация системы наблюдений техногенно-природно сейсмических явлений в нефтедобывающих закарстованных районах // Катастрофы и аварии на закарстованных территориях. Пермь, 1990. С.19-20.
2. Верховланцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А. Сейсмичность Уральского региона за период с 2002 по 2013 год по данным инструментальных наблюдений Уральской сейсмической сети // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 94-98.
3. Габсатарова И.П., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю., Надёжка Л.И., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А., Французова В.И. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2012 году. Обнинск: ГС РАН, 2014. С.22-27.
4. Дягилев Р.А. Анализ макросейсмических проявлений современных землетрясений Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 150-154.
5. Дягилев Р.А. Параметры сейсмического режима в условиях Кизеловского угольного бассейна // Проблемы геологии Пермского Урала и Приуралья. Пермь: Пермский ун-т, 1998. С.176-178.
6. Дягилев Р.А., Верховланцева Т.В., Чепуров Е.И. Макросейсмические и инструментальные исследования Учалинского землетрясения 5 сентября 2012 года // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 159-162.
7. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г. Сейсмичность карстово-суффозионных процессов // Геофизика. 2012. №5. С.54-59.
8. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. Техногенная сейсмичность на месторождениях нефти и газа // Геология и геофизика Юга России. 2012. № 1. С.22-45.
9. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Маловичко Д.А., Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верховланцев Ф.Г. Четырехуровневая система сейсмического мониторинга на территории Среднего Урала // Геофизика. 2011. №5. С.8-17.
10. Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. Мониторинг техногенной сейсмичности на рудниках и шахтах Западного Урала // Материалы Международной конференции «Горная геофизика 98». С-Пб: ВНИМИ, 1998. С. 147-151.

11. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2008. № 10. С. 25-29.
12. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Кустов А.К. Соликамское землетрясение 5 Января 1995 года / Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М: ГС РАН, 2001. С.163-169.
13. Маловичко Д.А. Изучение механизма Соликамского землетрясения 5 января 1995 года // Физическая мезомеханика. 2004. Т.7. №1. С. 75-90.
14. Маловичко Д.А. Описание очагов шахтных сейсмических событий // Физика Земли. 2005. №10. С.89-96.
15. Мишин С.В. Модель обвального землетрясения. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Сборник докладов III научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 2011. http://emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/Sekciya_Modelirovanie/Mishin.pdf.22
16. Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. 222 с.
17. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / Под ред. И.М.Петухова, А.М.Ильина, К.Н.Трубецкого. М.: Издательство АГН, 1997. 376 с.
18. Сейсмологический мониторинг территории Западного Урала. Пермь: ГИ УрО РАН. <http://pts.miperm.ru/region/>.
19. Селивоник В.Г., Воинов К.А. Опыт ведения горных работ в удароопасных условиях // Горный журнал. 2004. №3. С.18-24.
20. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 4. С. 60-69.
21. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. М.: ВНИИГТИ Госстроя России, 1999. 56 с.
22. Bennett T.J. and McLaughlin K.L. Seismic Characteristics and Mechanisms of Rockbursts for Use in Seismic Discrimination // Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. A.A. Balkema, 1997. P. 61-66.
23. Boler F.M., Billington S., Zipf R.K. Seismological and energy balance constraints on the mechanism of a catastrophic bump in the Book Cliffs coal mining district, Utah, U.S.A. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Volume 34, Issue 1. P. 27-43.
24. Knoll P., Kuhnt W. Seismological and technical investigations of the mechanics of rock bursts // Rockbursts and seismicity in mines. Rotterdam: A.A Balkema, 1990. P.129-138.
25. Lenhardt W., Pascher C. The mechanism of mine-collapse deduced from seismic observations // Pageoph. 1996. V.147. №2. P.207-216.
26. Malovichko D.A. Study of seismic source mechanisms in mines of the Verkhnekamskoye potash deposit // 7th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines: Controlling Seismic Hazard and Sustainable Development of Deep Mines. New York: Rinton Press, 2009. P. 387-398.
27. Pechmann, J.C., Walter W.R., Arabasz W.J., Pankow K.L., and Burlacu R. Seismological Report on the 6 Aug 2007 Crandall Canyon Mine Collapse in Utah.
28. Pechmann, J.C., Walter W.R., Nava S.J. and Arabasz W.J., Correction to "The February 3, 1995, ML 5.1 Seismic Event in the Trona Mining District of Southwestern Wymong" // Seismological Research Letters. 1995. Vol. 66. No. 4. P. 28.
29. Pechmann, J.C., Walter W.R., Nava S.J. and Arabasz W.J., The February 3, 1995, ML 5.1 Seismic Event in the Trona Mining District of Southwestern Wymong // Seismological Research Letters. 1995. Vol. 66. No. 3. P. 25-34. [minor correction, including revision of the magnitude to ML 5.2, added in 66, no. 4, 28]
30. Swanson P.L., Boler F.M. The magnitude 5.3 seismic event and collapse of the Solvay Trona Mine: Analysis of pillar/floor failure stability. U.S. Bureau of Mines. Open File Report. P.86-95.
31. Ulomov V.I. and the GSHAP Region 7 Working Group: Shumilina L., Trifonov V., et al. Seismic hazard of Northern Eurasia // Annali di Geofizica. 1999. Vol. 42. N. 6. P. 1023-1038.
32. Whyatt, J and Varley, F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines // Proceedings of 27th International Conference on Ground Control in Mining. NIOSH, Spokane Research Laboratory, USA, 2008. 10 p.