

**Р.А. Дягилев**

R.A. Dyagilev

*Горный институт УрО РАН*

*Organization of Russian academy of sciences Ural branch of RAS (MI UB RAS)*

**ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ И ЕЕ  
ВЛИЯНИЕ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ**  
INDUCED SEISMICITY IN MINING AREAS AND ITS INFLUENCE ON SEISMIC HAZARD

**Аннотация.** В работе сделана попытка оценить техногенную составляющую сейсмической опасности в районе разработки Верхнекамского месторождения калийных солей. Изложены основные моменты, учитываемые при сейсмическом районировании территорий: модель сейсмогенерирующих зон, описывающая параметры возможных техногенных источников, и макросейсмическое уравнение, описывающее ожидаемый сейсмический эффект от них. С использованием виртуального каталога сейсмичности получены уточненные карты сейсмической интенсивности для района Верхней Камы.

**Abstract.** The article describes the first efforts to estimate seismic hazard of induced seismicity in region of the Upper Kama potash deposit. It states main factors, which one have to take into account in seismic hazard assessment. They are model of seismic generating zone, describing parameters of induced seismic sources, and specified macroseismic equation. Using virtual seismic catalogue of induced events a new more precise seismic hazard maps for Upper Kama region were derived.

Авторы карт ОСР-97 отмечают, что сейсмическая опасность во многих районах может расти в связи с хозяйственным освоением сейсмоопасных территорий и активным воздействием человека на литосферу (откачка нефти и газа, добыча полезных ископаемых, строительство крупных гидротехнических сооружений, захоронение промышленных отходов и др.) [1]. Одним из таких районов можно считать Урал, где все отмеченные выше факторы имеют место. Положительным моментом в вопросе уточнения сейсмической опасности в Уральском регионе являются наблюдения за сейсмичностью, выполняемые ГИ УрО РАН совместно с ГС РАН в течение последних 10-15 лет [2].

Целью данной работы является получение уточненных оценок сейсмической опасности, характеризующих район Верхней Камы, подверженный значительной техногенной нагрузке, связанной с разработкой Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Значимость таких исследований в последнее время существенно возросла в связи с появлением новых инструментальных данных о сейсмичности региона, которые свидетельствуют о существенной недооценке (примерно на порядок) доли слабых природных землетрясений. Кроме того, идет наращивание производственных мощностей добычи калийных солей, планируется открытие новых рудников и строительство объектов инфраструктуры горнодобывающих предприятий, что требует корректного учета сейсмичности.

Годы сейсмологических наблюдений в регионе и на рудниках ВКМКС позволили вплотную подойти к проблеме уточнения сейсмической опасности на огромной урбанизированной территории. Для этого имеется представительный (начиная с магнитуды 1.5) каталог природных землетрясений, произошедших на Западном Урале; данные о механизмах сейсмических явлений, происходящих в горных выработках [3]; множество экспериментальных данных о характере распространения сейсмических волн в районе исследований [4]. Для уточнения сейсмической опасности для района Верхней Камы решались три основные задачи: 1) разработка модели сейсмогенерирующих зон, соответствующих возможным техногенным источникам в районе ВКМКС; 2) выбор адекватной модели сейсмического эффекта; 3) получение вероятностной оценки сейсмической опасности в заданные интервалы времени.

## Модель сейсмогенерирующих зон

Модель сейсмогенерирующих зон является одним из ключевых элементов при оценке сейсмической интенсивности. Она определяет пространственные и энергетические особенности возможных сейсмических явлений. Чтобы соответствовать вероятностно-детерминистскому подходу, являющимся общепринятым для оценки сейсмической опасности [1], предлагаемая модель опирается на богатый фактический материал (существующие каталоги сейсмических явлений) и дает вероятностные оценки основных параметров сейсмических явлений.

Влияние техногенной нагрузки, оказываемой горнодобывающими предприятиями, можно описать, представив сейсмогенерирующими зонами все существующие ныне подработанные пространства или участки горного массива, подлежащие подработке, которые несут потенциальную опасность возникновения в них сейсмических событий. Одним из ярких примеров существующей угрозы является техногенного землетрясения с магнитудой  $M_s = 3.8$ , произошедшего 5 января 1995 г. в г.Соликамск. Причиной события стало разрушение подземных целиков на площади диаметром около 600 м, которому сопутствовало одновременное опускание вышележащей толщи пород мощностью около 300 м и образование на земной поверхности мульды оседания глубиной до 4.5 м. Сейсмический эффект от такого явления ощущался в радиусе до 20 км, а в его эпицентре интенсивность составляла 5-6 баллов [5].

Исследования механизмов очагов в пределах калийных рудников [3] свидетельствуют о преимущественно обвальном характере большинства сейсмических явлений. Соликамское землетрясение, судя по разрушениям в руднике и на поверхности, также относится к гравитационным явлениям. Таким образом, обвальный тип будем считать основным типом событий, возникающих в пределах сейсмогенерирующих зон. Пространственные характеристики зон (размеры, положение) хорошо известны, в том числе и для планируемых к отработке рудников (рис. 1), что позволяет использовать их для моделирования местоположения гипоцентров сейсмических очагов.

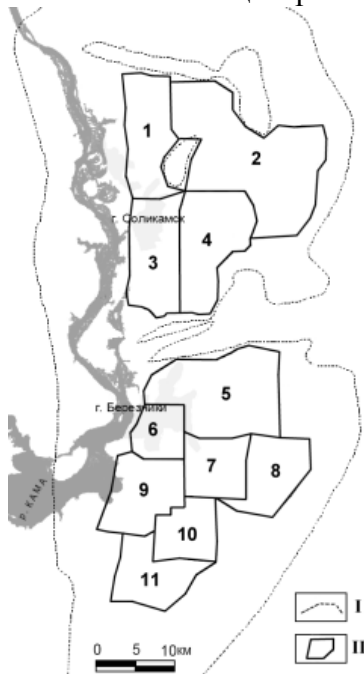


Рис. 1. Шахтные поля в пределах ВКМКС, определяющие границы сейсмогенерирующих зон

- I – контур месторождения;  
II – границы шахтных полей:  
1 – Боровской,  
2 – Половодовский,  
3 – Соликамский,  
4 – Ново-Соликамский,  
5 – Быгельско-Троицкий,  
6 – Березниковский,  
7 – Дурыманский,  
8 – Талицкий,  
9 – Усть-Яйвинский,  
10 – Балахонцевский,  
11 – Палашерский.

Многолетние наблюдения в рудниках показывают, что эпицентры регистрируемых сейсмических событий ( $M < 1$ ) практически не выходят за пределы шахтных полей. Глубина очагов также ограничена горными выработками. Отдельные шахтные поля имеют, как правило, изометричную форму, поэтому без потери общности ситуации будет допустимым принять нормальное распределение очагов относительно центра шахтного поля со стандартным отклонением, равным его среднему полуразмеру.

Сейсмический режим не является одинаковым для всего месторождения. На него влияет множество факторов (время, прошедшее с отработки, количество подработанных пластов, наличие закладки, прочностные свойства пород и др.) [6]. Так или иначе среднюю скорость разрушения подработанного массива, можно связать с параметрами закона повторяемости сейсмических явлений, которые известны для всех действующих рудников. Для рудников, которые пока не построены, но будут введены в эксплуатацию в ближайшие годы, данные параметры в первом приближении можно принять равными средним показателям.

Максимальные магнитуды событий, которые возможно ожидать, очевидно, будут определяться максимальными размерами подработанных пространств. На разных рудниках эти величины также могут отличаться, но нигде они не достигают размеров самих шахтных полей. Принимая во внимание известные соотношения площади очаговых зон с их магнитудой [7], можно прийти к выводу, что максимальная возможная магнитуда техногенного очага не будет превышать максимальной магнитуды природных очагов (5.5) в данном районе.

Не смотря на то, что параметры повторяемости известны, повторяемость сильных событий достоверно оценить сложно. Во-первых, сказывается ограниченный диапазон магнитуд инструментально зафиксированных событий (до 1.5). Во-вторых, в рудниках проводятся все необходимые мероприятия по их предотвращению и устранению условий их возникновения, поскольку реализация одного землетрясения с максимальной магнитудой в калийном руднике может означать прекращение его существования. Однако устранение самого главного условия существования повышенной сейсмической опасности – наличия подработанных пространств – может происходить и более естественным путем в ходе постепенного схлопывания пластичного соляного массива, которое по длительности сопоставимо со сроками эксплуатации рудника (50-100 лет). Уникальность ситуации заключается в возможности лишь единственной реализации события с максимальной магнитудой (и максимальными размерами очага) в пределах одного рудника, после чего условия, определяющие их принципиальную возможность возникновения в будущем, исчезают совсем.

Таким образом, принимается, что каждая сейсмогенерирующая зона может создавать условия для возникновения не более одного события с максимальной магнитудой за период, равный времени существования горных выработок.

#### **Модель сейсмического эффекта**

Модель сейсмического эффекта для исследуемой территории в первом приближении дает макросейсмическое уравнение  $I(M, r)$  Н.В. Шебалина [8], имеющее для территории Урала и Западной Сибири вид

$$I = 1.5M_{LH} - 3.5\lg(r) + 3, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние до гипоцентра в км,  $M_{LH}$  – магнитуда.

Большие размеры территории, характеризующейся данной зависимостью, обусловлены, главным образом, ограниченностью исходных данных, лежащих в ее основе. Определенную роль играет и тот факт, что все техногенные источники приповерхностные, поэтому есть все основания полагать, что в рассматриваемом районе уравнение (1) может давать существенные погрешности. Вся необходимая информация для уточнения (1) имеется в макросейсмических данных, собранных после Соликамского землетрясения в 1995 г. В свете современных представлений об этом событии, его очаг располагался на глубине горных выработок (0.3 км), а не на 8 км, как было рассчитано ранее с использованием уравнения (1) и представлено в первом упоминании о нем [5]. Пересмотр волновых форм, позволил установить и другие параметры очага, в частности  $M_{LH} = 3.5$ . Таким образом, самую адекватную модель сейсмического эффекта в районе ВКМКС дает уточненное уравнение

$$I = 1.5M_{LH} - 2.1\lg(r) + 0.5, \quad (2),$$

которое по имеющимся данным позволяет оценивать сейсмическую интенсивность с ошибкой  $\pm 0.5$  балла.

## Моделирование сейсмического процесса

При расчете сейсмической интенсивности, в качестве исходных данных используется сейсмический каталог с достаточным количеством данных для надежной оценки интенсивности в изучаемом районе. Критерий достаточности определяется периодом повторяемости, для которого строится карта сейсмической опасности и ошибкой определения интенсивности для единичного события. Полноценный каталог может охватывать временной интервал в несколько десятков тысяч лет, что практически недостижимо, поэтому в расчетах используют виртуальные каталоги, в которых представлены случайные реализации ожидаемых сейсмических событий с параметрами, вероятностные характеристики которых известны из текущих наблюдений. В случае с техногенной сейсмичностью не стоит ожидать, что она будет продолжаться тысячи лет в тех рамках, как мы это себе представляем сейчас. Если исходить из сегодняшних реалий, то в качестве интервалов, определяющих длительность сейсмического каталога, правильнее будет принять примерный срок эксплуатации месторождения в обозримом будущем, то есть 150 лет.

Созданный каталог виртуальной сейсмичности района дает возможность оценить интенсивность на исследуемой площади по заданной сетке (5×5 км). Для этого в каждом узле по совокупности всех событий с использованием зависимости (2) определяются параметры повторяемости сотрясений в виде  $I(T)$ . Далее по периоду повторяемости  $T$ , соответствующему картам  $A$ ,  $B$  и  $C$ , узлу карты присваиваются значения максимальной интенсивности. В результате таких построений для района Верхней Камы получены три уточненные карты (рис. 2), которые отражают сейсмическую интенсивность, обусловленную как природными событиями, так и техногенной сейсмичностью, показывая максимальное из двух типов воздействий.

### Обсуждение результатов и выводы

Сравнивая полученные карты с картами природной сейсмической опасности ОСР-97, можно отметить, что отличия наблюдаются только на картах  $A$  и  $B$ , где четко прослеживается зона влияния подработанных пространств в районе городов Соликамск и Березники. Здесь отмечается повышение уровня сейсмической опасности примерно на 1 балл относительно природного фона. Сравнение техногенных зон на картах  $A$  и  $B$  показывает, что тип карт почти не оказывает влияния на их пространственные границы, значения интенсивности в их пределах также не меняются. Уточненная карта  $C$  полностью соответствует исходной карте ОСР-97-С. Здесь влияние техногенной сейсмичности не видно, так как скрыто за природной составляющей, имеющей за больший интервал времени преобладающие значения интенсивности.

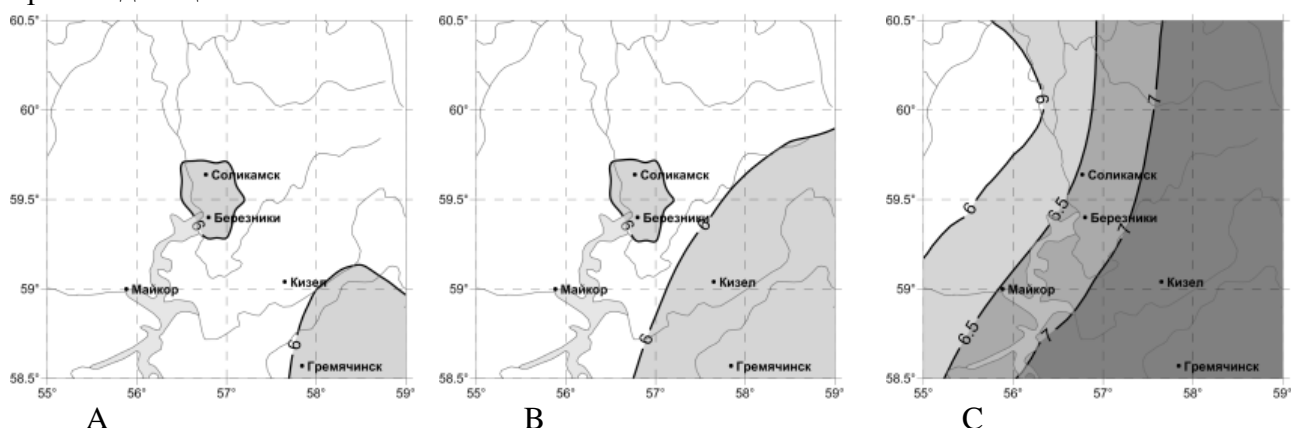


Рис. 2. Уточненные карты сейсмической опасности для района Верхней Камы

Полученные результаты показывают, что влияние техногенной сейсмичности, обусловленной наличием под землей выработанных пространств, в данном районе является значимым. Разработанная модель техногенных сейсмогенерирующих зон, хоть и имеет локальное применение, позволила количественно оценить ожидаемые изменения

сейсмической интенсивности. Существенный вклад при параметрическом наполнении данной модели дали текущие сейсмологические наблюдения на рудниках ВКМКС и событие, инициировавшее их, – Соликамское землетрясение. На уточненных картах видно, что территория, считающаяся асейсмичной (интенсивность 5 баллов) по картам ОСР-97-А и ОСР-97-В, получает дополнительный балл, что приближает ее по уровню опасности к соседним природным зонам Среднего Урала. Для некоторых ответственных промышленных объектов, сосредоточенных в данном районе или планируемых к постройке, данный факт может иметь большое значение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. – М.: ВНИИГПИ Госстроя России, 1999. – 56 с.
2. Дягилев Р.А. Сейсмичность Западного Урала и по результатам инструментальных наблюдений // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2009. – С. 150-152.
3. Маловичко Д.А. Анализ механизмов очагов «низкочастотных» сейсмических событий в рудниках ВКМКС // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2006. – С.233-235.
4. Маловичко Д.А., Иванова Ю.В. Калибровка шкалы локальных магнитуд  $M_L$  для Западно-Уральского региона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – 2006. С.103-107.
5. Маловичко А.А., Блинова Т.С., Лебедев А.Ю., Некрасова Л.В. Соликамское землетрясение 5 января 1995 г. // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. – 1997. – С. 307-315.
6. Дягилев Р.А. Маловичко Д.А., Шулаков Д.Ю., Баранов Ю.В., Бутырин П.Г., Некрасова Л.В. Прогнозирование сейсмичности на шахтах и рудниках Западного Урала // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Научно-практические итоги конкурсов РФФИ-Урал в Пермском крае 2004-2006 годов. – 2007. – С.248-250.
7. New manual of seismological observatory practice. Vol.1. – Potsdam: GFZ, 2002. – 714 p.
8. Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. – 476 с.