

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОСВАИВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ\*



С. А. КОНСТАНТИНОВА,  
зав. лабораторией,  
проф., д-р техн. наук  
(УНИИПИГалургии)

При анализе обстоятельств и причин аварийного события, которое произошло 5 января 1995 г. на Втором Соликамском руднике, все исследователи, кроме сейсмологов [1, 2], придерживались гипотезы «обрушение — землетрясение», отмечая динамическое разрушение несущих элементов системы разработки на значительной площади, вызванное совокупностью горно-геологических, тектонических и горнотехнических факторов и сопровождающееся выделением сейсмической энергии. В работах [3–5] это событие классифицируют как горно-тектонический удар. Применяв специальный математический аппарат, сейсмологи значительно позже сделали вывод о том, что техногенный вариант механизма Соликамского землетрясения не противоречит имеющимся сейсмологическим данным.

В настоящее время на всех действующих рудниках Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей (ВКМКС) развернута сеть сейсмологического мониторинга. Это самые дорогостоящие исследования в системе геодинамического мониторинга недр и земной поверхности ВКМКС. Однако, как отмечается в работе [6], главным объектом контроля являются сейсмические события, связанные с процессами деформирования и разрушения целиков и прилегающих к выработкам массивов вмещающих пород. Между тем аналогичное негативное событие на Первом Березниковском руднике в конце 2006 г. не имело ни сейсмических, ни каких-либо других предвестников и произошло в результате неблагоприятного сочетания горно-геологических и горнотехнических факторов.

Автором предложен критерий оценки геодинамической опасности недр и земной поверхности при эксплуатации пластового месторождения полезных ископаемых, сложенного упруговязкопластическими рудами и вмещающими породами, который основан на математическом моделировании процессов деформирования и разрушения пород, слагающих несущие элементы системы разработки. Следует отметить, что за период после аварии на рудниках ВКМКС зарегистрировано несколько десятков землетрясений и микроземлетрясений с положительной амплитудой. Однако только событие 1995 г. относится к крупным геодинамическим событиям, имеющим природно-техногенную причину. Поэтому аварийный участок был выбран в качестве примера для разработки критерия.

В качестве геологической модели подработанной породной толщи при геомеханических расчетах принимают вертикальные геологические разрезы, построенные по данным скважин поверхностной и подземной разведки, а также визуальных наблюдений по разведочным выработкам. Они отражают собственно соляную тектонику, строение надсолевой породной толщи и рельеф земной поверхности.

Для оценки напряженно-деформированного состояния соляных пород применена феноменологическая модель их деформирования и разрушения [7], уравнения состояния которой имеют вид нелинейных интегральных уравнений Вольтерра II рода для сдвиговых и объемных деформаций. В качестве ядер ползучести принимают степенные ядра Абеля, зависящие от отношения интенсивности действующих напряжений к интенсивности напряжений на пределе «мгновенной» прочности. Критерием перехода процесса деформирования упруговязкопластических пород в запредельную стадию является достижение действующими напряжениями величины, определяемой уравнением длительной прочности пород. При напряжениях, зависящих от времени, используют критерий перехода процесса деформирования пород в запредельную стадию [7], который записывается с помощью интеграла Бейли. На запредельной стадии процесс деформирования пород моделируется переменными параметрами упругости.

Предложенная модель запредельного деформирования обладает свойством устойчивости решения, что позволяет решать задачи с развитыми зонами запредельного деформирования пород. Значения физико-механических и реологических показателей горных пород, принимаемые в качестве параметрического обеспечения математических моделей в геомеханических расчетах, приведены в работе [8].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ОАО «Сильвинит» и РФФИ (проект 07-01-97613 р — оф).

При оценке естественных напряжений в ненарушенной горными работами породной толще считают, что основной действующей силой является вес вышележащих пород. Методической особенностью решения крупномасштабных задач геомеханики и геодинамики является оценка естественного поля напряжений не в упругой, а в вязкоупругой постановке, с использованием такого геологического периода релаксации естественных напряжений, при котором в соляной толще реализуется реологически равновесное поле напряжений.

Наличие природных тектонических напряженных зон (ТНЗ) и область их влияния выявляют по критериям: максимальных касательных напряжений ( $\tau_{max}$ ); коэффициента запаса прочности по критерию Шлейхера — Мизеса; плотности энергии формоизменения; деформирования пород на запредельной стадии с возможным образованием зон трещиноватости. Если на участке исследования выполняются первые три критерия, то участок является естественной ТНЗ, а если все четыре — ТНЗ с наличием природных трещин.

Геомеханические расчеты, проведенные по нескольким вертикальным разрезам, показали, что в районе аварийного участка в породном массиве еще до ведения горных работ существовала ТНЗ. На границе «трещинной» зоны значения естественных максимальных главного и касательного напряжений претерпевают резкие изменения. При отсутствии зоны повышенной трещиноватости пород с пониженными прочностными и деформационными характеристиками ТНЗ отсутствует.

Для оценки техногенных нагрузок использованы подходы академика Е. И. Шемякина [9], адаптированные для случая пластового месторождения, сложенного релаксирующими породами. В качестве меры техногенного воздействия принята величина техногенного геодинамического потенциала, численно равная энергии формоизменения, вносимой горными работами в породный массив (энергии возмущений). В МКЭ-программе был реализован следующий алгоритм вычисления энергии возмущений: решение задачи для ненарушенного горными работами породного массива; повторный расчет для той же области с геомеханическим пространством [9] с учетом реального времени образования каждой очистной камеры; разница полученных значений дает величину поля возмущений  $\Delta\tau_{max}$ , которая называется дополнительным максимальным касательным напряжением, вносится в исходное поле напряжений при ведении очистных работ и зависит от горно-геологической и горнотехнической ситуации. В каждом конечном эле-

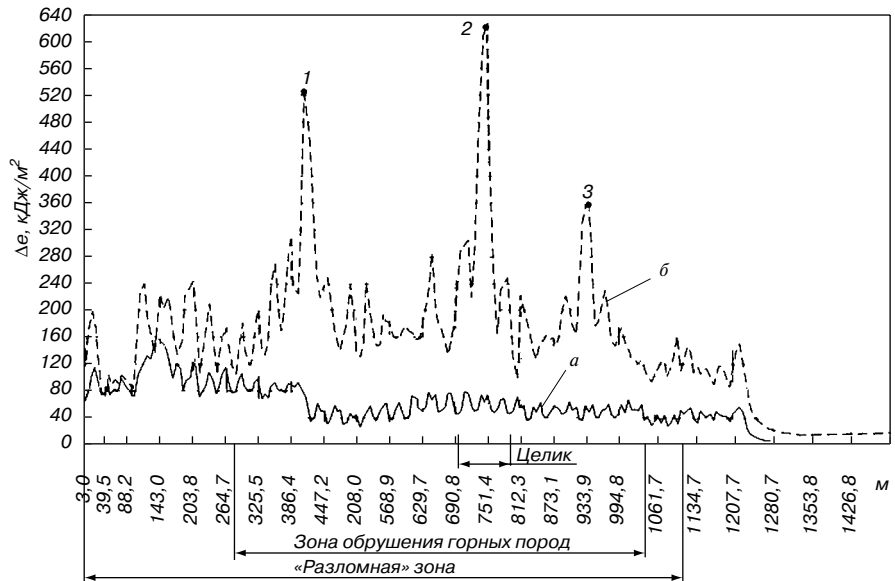


Рис. 1. Распределение плотности техногенной энергии формоизменения  $\Delta\varepsilon$  в подработанном породном массиве с «трещинной» зоной в 1984 (а) и 1995 (б) годах (1, 2, 3 — экстремальные точки)

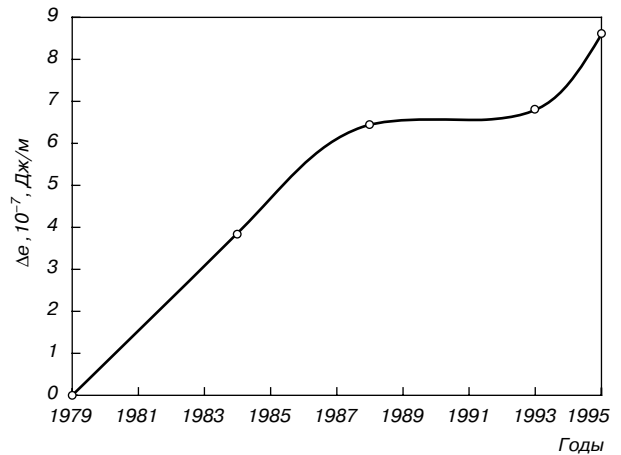


Рис. 2. Изменение плотности энергии возмущений  $\Delta\varepsilon$ , проинтегрированной по вертикальной (от земной поверхности) и одной из горизонтальных координат на участке внезапного разрушения

менте вычисляют плотность энергии возмущений по формуле  $\Delta\varepsilon = (\Delta\tau_{max})^2/2G$ , где  $G$  — модуль сдвига пород. Затем проводят численное интегрирование плотности энергии возмущений в пределах плоской расчетной области с последующим переводом (расчетом) полученного значения в полную (объемную) энергию возмущений на участке исследований.

На аварийном участке в первую очередь отрабатывали нижний сильвинитовый пласт Красный II, т. е. отработку сближенных пластов вели в восходящем, а не в нисходящем порядке. Через два года отработка вышележащего сильвинитового пласта АБ была осложнена обрушением кровли в камерах нижнего пласта. Поэтому в эпицентре аварии не были отработаны две камеры на пласте АБ и образовался целик шири-

ной 65 и длиной 200 м. Численный геомеханический анализ динамики напряженно-деформированного состояния подработанного породного массива, при котором учитывалось реальное время проведения каждой очистной камеры в соляном массиве, показал, что неблагоприятная геомеханическая ситуация создавалась за 6 лет до аварии, после отработки пласта АБ, так как в породах водозащитной толщи над оставленным целиком деформированное состояние стало растягивающим; междукамерные целики (МКЦ) на пласте Красный II, расположенные под широким целиком на пласте АБ, оказались нагружены напряжениями  $\sigma_1$ , сопоставимыми с их нормативной прочностью на сжатие; в технологическом междупластье АБ — Красный II возникли растягивающие напряжения  $\sigma_3$ .

Анализ динамики изменения плотности энергии возмущений  $\Delta e$  на аварийном участке показал (рис. 1), что после завершения в 1988 г. очистных работ энергия возмущений в зоне обрушения пород продолжала возрастать. С 1993 г. максимум плотности энергии приходился на широкий целик, который и оказался в эпицентре мульды внезапных оседаний земной поверхности в январе 1995 г., когда значения  $\Delta e$  в характерных точках 1, 2, 3 возросли в несколько раз. Особенно интенсивно этот процесс происходил в точке 2, т. е. в оставленном широком целике. Именно он не позволял системе «целик — технологическое междупластье» работать в податливом режиме с выделением внесенной в геологическую среду техногенной энергии в квазистатической форме.

Для упруговязкопластических горных пород, склонных к интенсивной ползучести и релаксации (типа соляных), характерна диссипация накопленной энергии. В нашем случае (рис. 2) с 1988 по 1993 г. энергия возмущений оставалась постоянной, что вполне закономерно, так как горные работы на участке не велись. Начиная с 1993 г. энергия возмущений на аварийном участке достаточно интенсивно растет и к 1995 г., по приближенной оценке, достигает  $(3,4-3,6) \cdot 10^{10}$  Дж. Согласно известной эмпирической формуле из механики землетрясений [10],  $\lg E = 1,5M + 4,8$ , где  $E$  — энергия землетрясения (энергия излученных очагом сейсмических волн), Дж;  $M$  — магнитуда события. Магнитуда события 5 января 1995 г. на Втором Соликамском руднике составила 3,8, что соответствует значению  $E = 3,16 \cdot 10^{10}$  Дж.

Таким образом, оценку геодинамической опасности недр и земной поверхности при эксплуатации пластового месторождения, сложенного упруговязкопластическими горными породами, можно проводить по уровню энергии возмущений [9] и ее изменению во времени. Если после проведения очистных работ энергия возмущений в породном массиве на каких-то участках продолжает накапливаться, то такие участки следует отнести к критически энергонасыщенным [11]. Природная ТНЗ может стать геодинамически опасной зоной (ГОЗ) [12]. Профилактика катастрофических проявлений горного давления заключается в управляемом (контролируемом) выводе природно-технической системы (ПТС) из критического состояния, при котором накопленная в массиве «техноген-


ная» энергия (энергия возмущений) выделялась бы в квазистатической, а не в динамической форме.

Блок математического моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов является, по мнению автора, необходимой составляющей системы геодинамического мониторинга недр и земной поверхности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Каждый проект горных работ должен основываться на надежной информации о горно-геологических условиях месторождения; данных о напряженном и деформированном состоянии породного массива, полученных с применением корректных расчетных моделей и с учетом требований соответствующих нормативно-методических документов, что позволит избежать аварийных проявлений горного давления при эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

#### Список литературы

1. Соликамское землетрясение 5 января 1995 г. / А. А. Маловичко, Т. С. Блинова, А. Ю. Лебедев и др. // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Материалы Международного симпозиума. — Екатеринбург: УрО РАН, 1997.
2. Кусонский О. А. Характеристики некоторых сейсмических событий Урала за период 1988–1997 годов // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минералогии подвижных поясов и платформенных областей литосферы. — Екатеринбург: УрО РАН, 1998.
3. Константинова С. А. Ретроспективный анализ причин горно-тектонического удара на Втором Соликамском руднике // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: Сб. науч. тр. — Ч. 1. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004.
4. Константинова С. А. Горно-тектонический удар на Втором Соликамском руднике // Горный журнал. — 2005. — № 3.
5. Козырев А. А. Итоги и задачи решения проблемы горных ударов на рудниках Кольского полуострова // Геодинамическая безопасность при освоении недр и земной поверхности. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003.
6. Мониторинг техногенной сейсмичности на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей / А. А. Маловичко и др. // Материалы X Межотрасл. координ. совещ. по проблемам геодинамической безопасности (г. Екатеринбург, 6–9 октября 1997 г.). — Екатеринбург: УГГГА, 1997.
7. Константинова С. А., Чернопазов С. А. Развитие наследственной модели деформирования и разрушения соляных пород // ФТПРПИ. — 2004. — № 1.
8. Гилев М. В., Константинова С. А., Чернопазов С. А. Некоторые методические подходы, применяемые для оценки геодинамической безопасности недр и земной поверхности при эксплуатации Верхнекамского месторождения калийных солей // Маркшейдерия и недропользование. — 2006. — № 3.
9. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И. К вопросу о классификации горных ударов // ФТПРПИ. — 1986. — № 5.
10. Григорян С. С. О механизме возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей

сейсмологии // ДАН СССР. — 1988. — Т. 229. — № 5.

11. *Козырев А. А., Панин В. К., Мальцев В. А.* Синергетическая концепция прогноза и профилактики мощных динамических явлений в рудниках // Современные концептуальные положения в механике горных пород: Тр. Междунар. науч. конф. — Бишкек, 2001 г. / НАН КР; Ин-т физики и механики горных пород. — Бишкек: Илим, 2002.
12. *Шабаров А. Н.* О формировании геодинамических зон, опасных по горно-тектоническим ударам // ФТПРПИ. — 2001. — № 2. 

E-mail: [konstantinova@gallurgy.perm.ru](mailto:konstantinova@gallurgy.perm.ru)

MATHEMATICAL SIMULATION IN THE SYSTEM OF GEODYNAMICAL MONITORING OF DEVELOPING DEPOSITS OF MINERAL RESOURCES  
**Konstantinova S. A.**

Based on analysis of the accident in the mines of Verkhnekamskoe deposit of potassium salts, the author suggests the criterion for estimation of geodynamical danger of the earth bowels and earth surface has been developed. It is based on mathematical simulation of the processes of rock deformation and destruction, where rocks make bearing components of the system for development of bedded deposits with elastic tough ductile ores and enclosing strata.

**Key words:** geodynamical monitoring, seismology, danger criterion, mathematical simulation, earthquake, mancaused effect, power of fluctuations, stressstrain state.

УДК 622.1:528.952

© А. В. Богайчук, М. А. Осиян, 2008

## МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБЪЕМА ВЫВАЛОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ



**А. В. БОГАЙЧУК,**  
главный специалист



**М. А. ОСИЯН,**  
главный специалист

Центр геодинамической безопасности,  
ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»

Объемы вывалов (обрушений) в горных выработках с использованием дальномера LEM-30 и рулетки ВНИМИ определяют, как правило, по одной из возможных конфигураций вывала (рис. 1), каждая из которых описывается достаточно простой математической формулой. Вместе с тем расчеты объемов вывалов по конфигурациям  $b$  и  $c$  не учитывают их протяженность по длине выработки и поэтому применимы для локальных вывалов с распространением в пределах величины  $R$ . Конфигурация  $a$  позволяет оценить протяженность вывала по длине выработки  $g$ , но такая форма обрушений выработок встречается нечасто.

В связи с этим предложено применять для вычисления объемов всех видов наблюдаемых вывалов горной массы универсальный метод

вертикальных сечений, учитывающий изменения площади и конфигурации сечений по длине обрушений. Навал горной массы разбивают на характерные блоки (рис. 2), определяют сечение и объем каждого блока и суммируют их при оценке всего обрушения.

Большинство протяженных подготовительных выработок (транспортные штреки, квершлагги, уклоны), пройденных на глубинах свыше 700–800 м и за-

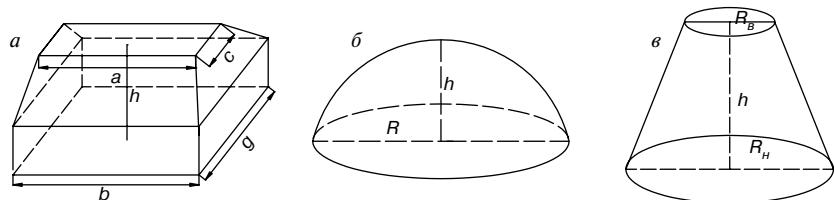


Рис. 1. Наиболее распространенные расчетные конфигурации вывалов горной массы