

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 622.831:624.131

### ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ – ОПАСНЫЙ АНТРОПОГЕННЫЙ ФАКТОР ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

© 2015 г. Н. Н. Мельников, А. А. Козырев, В.И. Панин

*Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (ГоИ КНЦ РАН),  
Ферсмана, 24, г. Апатиты Мурманской обл., 184209 Россия. E-mail: trout@goi.kolasc.net.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2014 г.

Приведены модели сейсмогенеза, некоторые общесистемные законы и закономерности, представлено их значение в понимании прогноза и профилактики техногенной сейсмичности. Показаны пути снижения геодинамических рисков в геологической среде природно-техногенных и горно-технических систем.

**Ключевые слова:** модель сейсмогенеза, общесистемные законы и закономерности, техногенная сейсмичность, геодинамический риск, горнотехническая система.

#### ВВЕДЕНИЕ

При ведении горных работ в высоконапряженных массивах (разработка удароопасных месторождений, гидротехническое и подземное строительство) может проявляться техногенная сейсмичность – горные удары и техногенные землетрясения. Преодоление этой острейшей проблемы актуально как для многих регионов России, так и для ряда горнорудных провинций Австралии, ЮАР, Канады, США, Южной Америки и др.

Необходимо отметить, что техногенная или “наведенная” сейсмичность есть наиболее яркое отражение взаимодействия геофизических полей различной природы, раскрытие механизма которого – одна из ключевых проблем современной геофизики [13].

Техногенная сейсмичность теснейшим образом связана с сейсмичностью природной (тектонической). Отметим, что в последние годы идет активная дискуссия о перспективах средне- и краткосрочного прогноза землетрясений [22].

“Постепенно во всем мире работы по прогнозу землетрясений свертываются, прекращается финансирование как теоретических исследований, так и наблюдений на геодинамических полигонах, а высвобождающиеся научные силы переключаются на более надежные работы по оценке сейсмического риска и сейсмического районирования, что ставит своей конечной целью определение, с

каким запасом прочности надо строить сооружения в сейсмоактивных районах” [6]. Однако это не отменяет необходимость поиска предвестников сейсмической опасности, и исследования в этом направлении активно продолжаются [7, 25].

Аналогичная ситуация складывается и в решении проблемы техногенной сейсмичности, которая определяет геодинамические опасности при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. Подходы к оценке геодинамической опасности при ведении горных работ и подземном строительстве разрабатываются в Горном институте Кольского научного центра РАН. На основе моделей эволюции сложных нелинейных систем предлагается сосредоточить основное внимание не на пространственно-временном прогнозе отдельного динамического события, а на оценке пороговых значений параметров эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды в природно-техногенной системе (ПТС), определяющих адаптационные возможности среды и уровень геодинамической опасности.

#### РАБОЧИЕ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Как тектоническая сейсмичность является отражением эволюционных процессов в “живой” Земле [2, 3], так и техногенная сейсмичность есть реакция геологической среды в природно-техно-

генных и горнотехнических системах на крупномасштабные горные работы, поскольку "...все более обоснованными становятся взгляды на природный комплекс в целом как на единый громадный живой организм, обладающий способностью к реагированию на ответные неблагоприятные для него реакции" [1].

С позиций универсального эволюционизма академика Н.Н. Моисеева [12], эволюцию напряженно-деформированного состояния геологической среды в очаге динамического события можно представить в виде триады: адаптация–изменчивость–отбор (рис. 1). В точке бифуркации разрядка напряжений может произойти либо в виде медленных деформаций, либо быстрым сбросом в виде динамического явления – землетрясения, энергия которого определяется размерами вовлекаемых в процесс блоков.

Эта модель иллюстрирует механизмы самоорганизации геологической среды в процессе ее эволюции: чередование стадий концентрации и релаксации напряжений в точке бифуркации, что приводит к образованию новых (диссипативных)

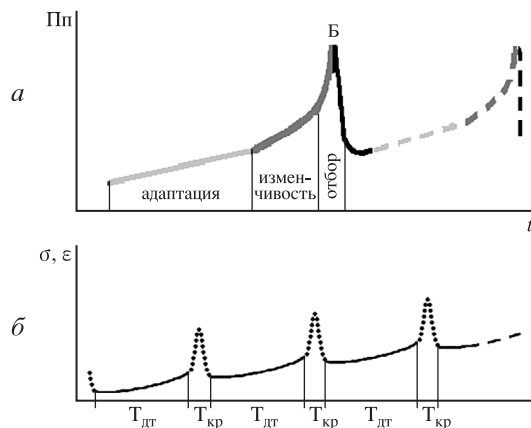


Рис. 1. Графические модели развития сейсмического процесса: а – в отдельном очаге; б – в природно-техногенной системе.

структур. Энергетическая подпитка осуществляется в случае тектонической сейсмичности за счет процессов в ядре и мантии Земли, в случае техногенной – наложением техногенной нагрузки.

Таблица 1. Классификация геодинамических явлений в рудниках

Наименование геодинамического явления	Этап развития опасной ситуации	Сущность процесса	Уровень геодинамического риска
Шелушение стреляние, динамическое заколообразование	Угроза	Постепенное разрушение породы на поверхности выработки на отдельные пластинки, из-за отслоения которых места шелушения всегда выглядят “свежими”; отскакивание с обнажений выработки пластин пород различных размеров со звуком, напоминающим выстрел; стреляние с постепенным прорастанием трещин в течение длительного времени, образующиеся пластины повторяют по форме контур выработки	Низкий
Микроудар	Инцидент	Мгновенное хрупкое разрушение целика или части массива горных пород с выбросом породы в горные выработки без нарушения технологического процесса и травмирования людей	Низкий
Горный удар	Авария	Мгновенное хрупкое разрушение целика или части массива пород с выбросом породы в горные выработки с нарушением крепи, повреждением машин и механизмов и нарушением технологического процесса	Средний
Горно-тектонический удар (техногенное землетрясение)	Катастрофа	Мгновенная подвижка крупного блока пород по тектоническому нарушению или прорастание значительной трещины в массиве с образованием оперяющих трещин, сопровождаемых серией горных ударов и микроударов, разрушением выработок и крепи на больших площадях, нарушением или остановкой технологического процесса, образованием пылевого облака и воздушной волны, резким звуком или гулом	Высокий

На эволюцию геологической среды в ПТС оказывают влияние множество случайных и детерминированных факторов [20]. Однако в процессе эволюции любой сложной системы выделяют несколько главных параметров, называемых параметрами порядка, или управляющими параметрами. В качестве внутренних параметров порядка геологической среды в ПТС, определяющих ее геомеханическую эволюцию, следует принимать показатели ее напряженно-деформированного состояния, т.е. напряжения и деформации, в качестве внешних – объемы и параметры горных работ.

Самая благоприятная стадия для работающего предприятия – стадия адаптации, в которой необходимо поддерживать систему как можно дольше. Но изменения в геологической среде при работе предприятия неизбежны, и иногда они могут иметь катастрофический характер. Самая опасная – стадия отбора, когда вследствие бифуркационных механизмов возможны кризисные состояния, опасные в том числе и по динамическим проявлениям горных ударов и техногенных землетрясений как в пределах рабочей зоны рудников, так и в границах их геомеханических пространств. Для определения пространственно-временных параметров этой стадии и для управления геомеханическими процессами в ней разработаны соответствующие системы геодинамического мониторинга, экспертные системы оценки и прогноза удароопасной ситуации и способы снижения геодинамического риска.

Величина геодинамического риска может варьировать в широких пределах, она определяется в основном мощностью динамического явления. По уровню этого риска и в соответствии со стадиями возникновения и развития опасных ситуаций в табл. 1 приведена классификация динамических явлений на апатитовых рудниках Кольского полуострова, которая может представлять интерес для оценки геодинамической обстановки на любом другом горнодобывающем предприятии или объекте подземного строительства.

В табл. 1 горно-тектонический удар и техногенное землетрясение авторы объединили в одну группу, как принято в инструктивных документах по безопасному ведению горных работ на удароопасных месторождениях России. Действительно, в российской горнотехнической литературе не обозначена четкая граница между этими двумя понятиями: в обоих случаях понимают мощное динамическое событие с катастрофическими последствиями для рудников.

## АКТУАЛЬНЫЕ ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ЗАКОНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Для определения стратегии и тактики прогноза и профилактики техногенной сейсмичности наряду с известными свойствами геофизической среды [13] представляется целесообразным напомнить некоторые общесистемные законы и закономерности применительно к горнотехническим системам [16].

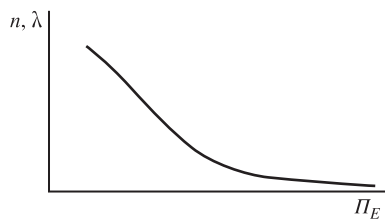
Во-первых, в настоящее время можно считать аксиомой, что техногенная сейсмичность является отражением эволюции НДС геологической среды в ПТС [9].

Во-вторых, для многих систем характерна иерархическая структура, особенно для литосферы Земли. Типичный пример – Хибинский массив, где имеются структуры всех рангов и разной степени активности [18]. Иерархическая структура обуславливает наличие слабых мест в системе, поэтому общеизвестен факт, что большинство сейсмических событий приурочены к различным тектоническим структурам.

В-третьих, для открытых неравновесных систем характерно трехэтапное развитие системы, при этом на этапах изменчивости и отбора большое значение могут иметь различного рода случайные события, выполняющие роль триггер-эффекта, влияние которых будет тем больше, чем в более неравновесном состоянии находится система.

В-четвертых, цикличность геофизических процессов [28] в сочетании с ритмичностью горного производства и подземного строительства – важный фактор нестабильности системы. Известно, что мощные технологические взрывы, особенно отбойка при очистных работах, оказывают значительное влияние (эффект “потряхивания”) на геодинамический режим геологической среды в горнотехнической системе. В зависимости от степени неравновесности системы эти взрывы могут осуществлять подкачку энергии в среду или выполнять роль триггер-эффекта.

Таким образом, в целом геомеханическая эволюция геологической среды в ПТС и горнотехнических системах, как и развитие всех систем, идет по схеме: системность – динамизм – самоорганизация [19]. Системность означает системный подход; динамизм – невозможность существования открытых неравновесных систем вне развития; самоорганизация – присущее всем развивающимся системам свойство.



**Рис. 2.** Характер распределения с тяжелыми хвостами:  $n, \lambda$  – число или вероятность событий с энергией  $E$  или другим значимым параметром  $P_E$ .

Важная особенность статистической модели динамических неравновесных систем, имеющая большое методологическое значение, – ее “негауссовость” [27], или распределение с тяжелыми хвостами [17] (рис. 2). Как справедливо отмечается в [24], эта статистика универсальна и применима ко многим наукам и видам человеческой деятельности.

Из этой модели следуют два важных следствия.

Во-первых, неизбежность различного рода катастроф. Движение и развитие в мире определяются соотношением [21]:  $m \approx 1/\lambda_i$ , где  $m$  – количество факторов или параметров фазового пространства, воздействующих на ход событий;  $\lambda_i$  – вероятность судьбоносного события в течение какого-то характерного времени. Благодаря усложнению системы со временем  $m$  растет, а  $\lambda_i$  становится все меньше. К сожалению, эта закономерность находит свое подтверждение в недавних крупных катастрофах мирового масштаба [26].

Во-вторых, из этой статистики следует “фоновый принцип” или фоновая общесистемная закономерность, которая дает возможность при определенных условиях по изучению фона судить о состоянии всей системы [23]. Как электрокардиограмма свидетельствует о состоянии сердечно-сосудистой системы человека, так и некоторые параметры сейсмического режима геологической

среды природно-техногенной или горнотехнической систем характеризуют геомеханическую ситуацию в них. Однако при этом следует иметь в виду одно очень важное обстоятельство. В соответствии с теорией измерений каждый объект характеризуется внешними измеряемыми величинами и внутренними ненаблюдаемыми параметрами [27]. Первые для краткости названы индикаторами, вторые – латентами, производным от латинского слова *latentis* – скрытый. Для формализации связей между индикаторами и латентами к настоящему времени наработано великое множество формализмов, которые названы метрическими моделями. Соотношение между латентами, индикаторами и метрическими моделями применительно к проблеме техногенной сейсмичности в первом приближении представлены в табл. 2.

Адекватность метрических моделей физической сущности исследуемых процессов определяет надежность оценки изучаемой ситуации и соответствующего прогноза. Поэтому наиболее корректные и надежно определяемые геомеханические параметры – напряжения, измеряемые методами разгрузки [11] и гидроразрыва [30].

Отсутствие до настоящего времени адекватных метрических моделей определяет трудности надежного прогноза землетрясений [22] и других типов прогноза [8, 14]. Все эти прогнозы будут иметь вероятностный характер, и их достоверность будет определяться числом учитываемых управляющих параметров, о чем уже говорилось выше.

Из табл. 2 следует, что самые надежные индикаторы латентных процессов в очаге динамического события – параметры сейсмического режима и деформации в массиве пород, по которым можно судить о степени геодинамической опасности, т.е. о величинах геодинамических рисков.

Таким образом, общесистемные законы и закономерности дают возможность понять природу мощных динамических явлений в геологической

**Таблица 2.** Классификация геомеханических параметров геологической среды природно-техногенных систем

Латенты	Индикаторы	Метрические модели
Напряжения	Деформации (методы разгрузки) Давление гидроразрыва скважины (метод гидроразрыва) Параметры упругих волн и электромагнитного излучения (геофизические методы)	Формулы теории упругости + эмпирические коэффициенты Формулы теории упругости
Техногенная сейсмичность	Параметры сейсмического режима, деформации	Эмпирические статистические связи Эмпирические статистические связи

среде природно-техногенных и горнотехнических систем и более обоснованно подходить к их прогнозу и профилактике. Динамические явления в геологической среде при ведении горных работ в высоконапряженных массивах пород неизбежны, поэтому геодинамический риск не может быть нулевым, о чем свидетельствует обширный опыт как отечественной, так и зарубежной горнотехнической практики. Поэтому на современном уровне науки о безопасности следует понимать безопасность как отсутствие опасности при определенном уровне приемлемого (допустимого) риска, т.е. абсолютной безопасности не существует.

### МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ

Для уменьшения геодинамического риска, т.е. для обеспечения геодинамической безопасности, необходимо:

- на основе инженерно-геологических, геомеханических и технологических моделей осуществлять геодинамический прогноз – предвидеть наиболее опасные участки геологической среды в геомеханических пространствах рудников или других ответственных объектов подземного строительства;

- определять прогностические модели геомеханической эволюции в конкретных горнотехнических системах, для чего необходим геодинамический мониторинг, который должен стать неотъемлемой составной частью технологического процесса; необходимо отметить, что мониторинг – важнейшее условие обеспечения безопасности и снижения материальных потерь от опасных техноприродных явлений [15]. Кроме того, мониторинг имеет большое значение в геофизических, в том числе и сейсмологических исследованиях, его цель – выявление общей структурной организации различных физических процессов в сейсмогенерирующей геологической среде [29];

- выявлять индикаторы критического состояния участков геологической среды на основе адекватных метрических моделей и по ним локализовать наиболее опасные участки;

- разрабатывать профилактические мероприятия по выводу этих участков из критического состояния.

Для оценки геомеханической ситуации в районе ведения горных работ и управления геодинамическими рисками используется разработанная авторами методика диагностики критических состояний участков геологической среды, позволяющая на основе анализа горно-геологической информации, инструментальных измерений в массиве и математического моделирования (методом конечных элементов) дать прогнозную

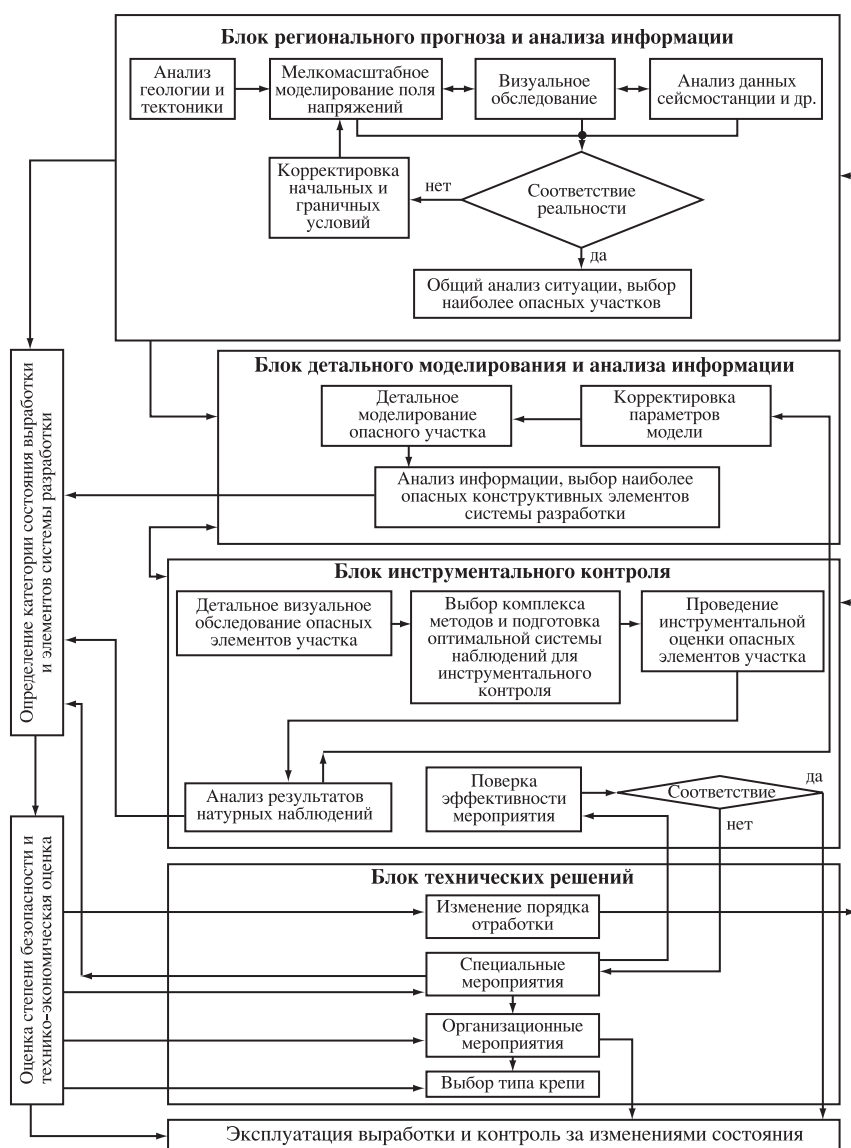


Рис. 3. Блок-схема методики управления геодинамическими рисками.

оценку изменения НДС массива пород и выбрать технические решения по обеспечению безопасности горных работ (рис. 3).

Блок-схема методики включает два информационных блока регионального прогноза и детального моделирования и анализа информации, блок инструментального контроля выявленного в первых двух блоках опасного участка и блок технических решений по снижению геодинамического риска.

Функции первых трех блоков – получение и анализ информации, которая используется для определения категории состояния выработки или элементов системы разработки, а также для принятия последующих технических решений. Одновременно с последовательным вариантом прохождения информации через первые три блока предусматривается возможность выполнять подобные определения на выходе каждого блока, однако уровень достоверности оценок и надежности принимаемых решений в этом случае, естественно, ниже. Содержание и функционирование каждого блока более детально рассмотрено в [4].

Однако, как показывает опыт, по причине неоднородности состава и строения горных пород в массиве, неполной геомеханической и геологической информации, вынужденных (ситуативных) отступлений от проекта горных работ в руднике могут возникать кризисные ситуации, сопровождаемые внезапными разрушениями горных выработок, в том числе и по причине динамических явлений в массиве пород. Следует заметить, что любой кризис есть нарушение прежнего равновесия системы и переход ее в новое устойчивое состояние. Поэтому с позиций общей теории эволюции периодические кризисы сопровождают любую развивающуюся систему. Однако в производственном процессе любой кризис – крайне нежелательное явление, которое подлежит незамедлительному устранению. Поскольку все кризисные ситуации развиваются по универсальной модели, то и ликвидацию этих ситуаций следует осуществлять также по типовому алгоритму [9].

#### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Фундаментальная основа управления геодинамическими рисками – изучение условий и факторов, влияющих на формирование и развитие опасных геодинамических процессов. Для этого необходимо развивать методику и технику геодинамического мониторинга, вести поиск индикаторов опасного и критического состояния участков

геологической среды, совершенствовать систему профилактических противоударных мероприятий.

Главные составные части геодинамического мониторинга и геодинамического прогноза – контроль параметров сейсмичности в широком энергетическом диапазоне и деформирования геологической среды на различных масштабных уровнях.

Для оценки геодинамической ситуации широко используют автоматизированные системы контроля сейсмичности массива, в России наиболее современная система установлена на Хибинских апатитовых рудниках [4].

На настоящее время в условиях Хибинского массива для выделения сейсмоактивных зон предложена методика оценки сейсмического режима по комплексному индикатору [10], рассчитываемому по формуле:

$$X'' = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X'_j,$$

где  $N$  – количество отдельных прогностических критериев,  $X'_j$  – величина каждого прогностического критерия.

На основании проведенных исследований выполнена классификация сейсмоактивных зон по типам их вероятного развития: растущая, пульсирующая, устойчивая и затухающая, при этом первые две наиболее опасны по динамическим проявлениям горного давления, что соответствует физической природе сейсмического процесса. На рис. 4 показан пример определения типа сейсмоактивной зоны на основе анализа динамики комплексного индикатора на контролируемом участке для условий Хибинских апатитовых рудников.

Анализ динамики индикаторов (конфигурации) сейсмоактивных зон позволяет определить периоды перехода участков массива пород в опасное или безопасное состояние, уменьшение значений индикатора, как правило, свидетельствует о начале перехода участков массива горных пород в безопасное состояние.

Перспективными составными частями геодинамического мониторинга и геодинамического прогноза являются контроль параметров деформирования геологической среды на различных масштабных уровнях.

Для оценки возможностей прецизионного деформационного мониторинга в 2010 г. на Кировском руднике ОАО “Апатит” был установлен высокоточный деформационно-наклономерный



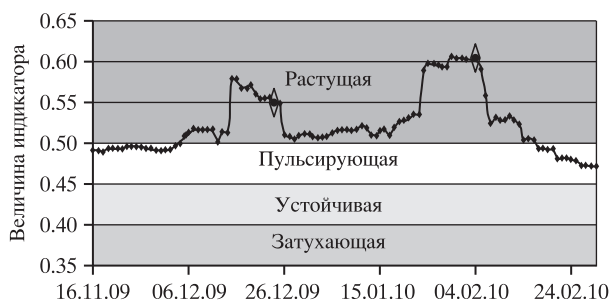


Рис. 4. Пример определения типа сейсмоактивных зон.

комплекс, в состав которого входили кварцевые деформометры ДКК-3 и кварцевые накломеры НК [10]. Сбор и накопление данных обеспечены цифровым регистратором информации и блоком регистрации информации “Регин-3.8”.

На рис. 5 представлены результаты наблюдений деформационно-наклономерным комплексом за период регистрации с начала его эксплуатации до конца 2010 г. Можно выделить несколько этапов:

*1-й этап* (от начала регистрации до 02.10.2010 г.), отличительная особенность которого – непрерывное медленное изменение наклона в плоскости север – юг (НК З-В) при относительно малых изменениях в показаниях остальных приборов; к концу интервала приращение угла наклона достигло весьма значительной величины – порядка 1 угловой минуты.

*2-й этап* (02.10.2010 г. – 21.10.2010 г.) характеризуется резкой скоростью изменения показаний всех приборов, за исключением деформометра ДКК Ю – С, причем, наклон в плоскости север – юг сменил знак приращения, а деформометр в

направлении восток – запад показывал рост отрицательных деформаций (сжатие); окончание интервала совпало с техногенным землетрясением.

3-й этап (21.10.2010 г.–31.10.2010 г.), в течение которого после реализации землетрясения прослеживается уменьшение скоростей наклонов при продолжающемся росте деформаций сжатия в направлении восток–запад.

В соответствии с блок-схемой методики (см. рис. 3) на основе анализа горно-геологической и геомеханической информации разработаны численные модели для расчета напряженно-деформированного состояния массива, содержащего очистные пространства рудников. Все расчеты выполняются методом конечных элементов в объемной постановке с использованием программного комплекса SigmaGT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН. Созданный программный комплекс, обеспечивающий последовательные экспертные оценки состояния массива на разных масштабных уровнях, позволяет не только осуществлять региональный прогноз зон повышенных концентраций напряжений на уровне рудника или шахтного поля, но и с необходимой степенью обоснованности разрабатывать и принимать оптимальные технические решения, обеспечивающие снижение вероятности возникновения динамических форм проявления горного давления [5].

### ВЫВОДЫ

При ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород геодинамические опасности неизбежны, что подтверждается отечественной и зарубежной горнотехнической практикой, несмотря на интенсивные и широкомасштабные исследования по этой проблеме.

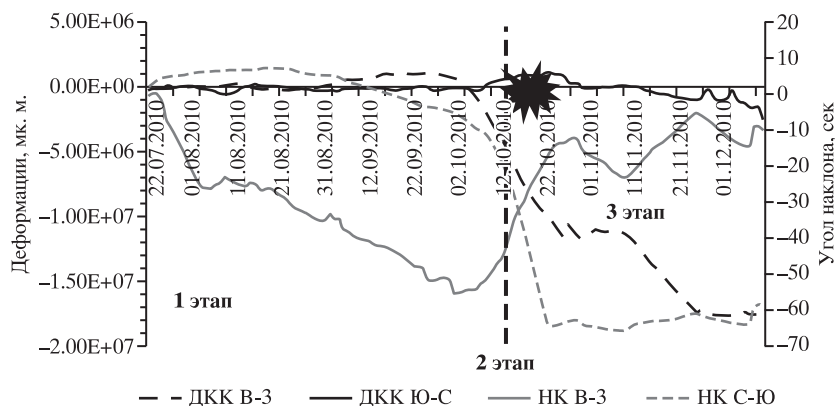


Рис. 5. График усредненных за день данных деформационно-наклономерного комплекса в период подготовки и реализации техногенного землетрясения 21.10.2010 г. Этапы: 1 – период стабильности, 2 – подготовка землетрясения, 3 – афтершоковый период.

Один из основных источников геодинамической опасности – техногенная сейсмичность, степень воздействия которой на персонал и инфраструктуру объекта подземного строительства и горнодобывающего предприятия определяется энергией сейсмического события и расстоянием от его очага до рабочих участков, поэтому все определения и классификации геодинамических опасностей должны соответствовать устоявшейся и общепринятой сейсмологической терминологии.

Прогноз и предупреждение геодинамических опасностей должны базироваться не на локации очагов отдельных сейсмических событий, а на выявлении границ опасных участков геологической среды горнотехнической системы, проведении в ней соответствующих профилактических мероприятий и определении степени эффективности этих мероприятий.

Авторам представляется, что изложенный подход к управлению геодинамическими рисками может быть полезен для большего взаимопонимания специалистов, работающих в этой сложной и актуальной области инженерной геологии и горной науки и практики, что может способствовать более успешному решению этой важной проблемы.

*Исследования выполняются в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами” № 14-17-00751.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов А.С. Натурфилософские основы рационального недропользования // Рациональное освоение недр. 2011. № 2. С. 62–66.
2. Гольдин С.В. Физика “живой Земли” // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. Кн. 1. С. 17–36.
3. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37–54.
4. Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н. и др. Сейсмичность при горных работах. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 325 с.
5. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений // Сб. тр. Всерос. науч. конф. с международным участием “Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ”. Апатиты–СПб.: Реноме, 2009. С. 251–256.
6. Любушин А.А. Геодинамический мониторинг: шумы, сигналы, предвестники // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. Кн. 2. С. 70–94.
7. Любушин А.А. Прогноз землетрясений и глобальное поле низкочастотных микросейсм // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 245–262.
8. Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза // Вестн. РАН. 2001. Т. 71. № 3. С. 210–232.
9. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Панин В.И. Техногенная сейсмичность как отражение эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горнорудной природно-технической системе // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С. 366–377.
10. Мельников Н.Н., Козырев А.А. Принципы и методология мониторинга геологической среды в природно-технических системах при ведении крупномасштабных горных работ // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ. Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 2013. С. 3–5.
11. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса. МГ 41-06-679-86. М.: ВНИИгеоинформсistem, 1987. 116 с.
12. Моисеев Н.Н. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998. 480 с.
13. Николаев А.В. Черты геофизики XXI века // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. Кн.1. С. 7–16.
14. Ойзерман Т.И. Возможно ли предвидение отдаленного будущего? // Вестн. РАН. 2005. Т. 75. № 8. С. 720–726.
15. Осипов В.И. Природные опасности: мониторинг и оповещение // Геоэкология. 2013. № 3. С. 209–215.
16. Панин В.И. Системные законы и закономерности в геомеханике // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов. Апатиты–СПб.: Реноме, 2011. С. 264–271.
17. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2007. Вып. 38. С. 236.
18. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. М.: АГН, 1997. 376 с.
19. Ровинский Р.Е. Самоорганизация как фактор направленного развития // Вопросы философии. 2002. № 5. С. 366–377.
20. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Случайность и неустойчивость в геофизических процессах // Физика Земли. 1989. № 2. С. 3–12.



21. *Силин А.А.* Энтропия, вероятность, информация // Вестн. РАН. 1994. Т. 64. № 6. С. 490–496.
22. *Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
23. *Спивак А.А.* Динамические процессы в земной коре // Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008. С. 164–184.
24. *Стаховский И.Р.* Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. 2007. № 12. С. 35–47.
25. *Страхов В.Н., Савин М.Г.* Уменьшение сейсмической опасности: упущенные возможности // Геофизический журн. 2013. Т. 35. № 1. С. 4–11.
26. *Тихонов М.Н., Рылов М.И.* После Чернобыля и Фукусимы-1: выявление и оценка неопределенностей и маловероятных рисков с катастрофическими последствиями // Проблемы анализа риска. 2014. № 2. С. 24–48.
27. *Хайтун С.Д.* Феномен человека на фоне универсальной эволюции. М.: КомКнига, 2005. 536 с.
28. *Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.
29. *Шуман В.Н.* Сейсмический процесс и современные мониторинговые системы // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 4. С. 50–62.
30. *Haimson B.C.* The hydrofracturing stress measurement method and recent field results // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts. 1978. V. 15. № 4. P. 167–178.

## MINING-INDUCED SEISMICITY AS A HAZARDOUS ANTHROPOGENIC FACTOR AT MINING IN HIGHLY STRESS ROCK MASSES

**N. N. Melnikov, A. A. Kozyrev, V. I. Panin**

*Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences  
ul. Fersmana 24, Apatity, 184209 Russia. E-mail: trout@goi.kolasc.net.ru*

The paper presents some seismogenesis models, system-wide laws and regularities as related to prediction and prevention of mining-induced seismicity. The ways of decreasing geodynamic risks in geological environment of natural-engineering and mining-engineering systems are shown.

**Keywords:** *seismogenesis model, system-wide laws and regularities, mining-induced seismicity, geodynamic risk, mining-engineering system.*