

УДК [550.82+550.3]:004

А. В. НЕРОБА, В. П. МАРЫСЮК (ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»)
В. Н. ОПАРИН, А. П. ТАПСИЕВ (ИГД СО РАН)

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОНИТОРИНГОВЫХ СИСТЕМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ*



А. В. НЕРОБА,
первый заместитель
директора по развитию
минерально-сырьевой базы



В. П. МАРЫСЮК,
главный инженер Центра
геодинамической безопасности,
канд. техн. наук



В. Н. ОПАРИН,
зав. отделом
экспериментальной
геомеханики,
член-корр. РАН



А. П. ТАПСИЕВ,
зав. лабораторией
подземной разработки
рудных месторождений,
д-р техн. наук

Динамика развития горнодобывающего комплекса в мире за минувшее столетие обусловила качественно новую ситуацию, когда локальные геомеханические поля, индуцируемые техногенной деятельностью человека, уже не являются пренебрежимо малыми в сравнении с глобальными геодинамическими полями тектонически активной Земли, в том числе и самой верхней ее оболочки [1]. Рассматривая шахты и рудники, широко представленные по поверхности континентов земного шара, как уникальные природные лаборатории, где можно детально исследовать во взаимосвязи геомеханические и геодинамические процессы инструментальными горно-геофизическими и спутниковыми геодезическими методами, естественной представляется идея синхронизации и геообъектной привязки геомеханической информации к глобальной геофизической и геодезической. В России эта идея в значительной мере представлена находящейся под эгидой

Статья посвящена новым открытиям и достижениям в области нелинейной геомеханики и геофизики. Представлены методологические основы создания многослойной геоинформационно-мониторинговой системы «Геомеханико-геодинамическая безопасность России». Дано описание канонической шкалы структурно-иерархических представлений горных пород и их массивов; эффекта знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия; природы возникновения волн маятникового типа в напряженных геосредах, а также явления зональной дезинтеграции горных пород и самоорганизации горных массивов.

Ключевые слова: подземные горные работы, геодинамическая безопасность, нелинейная геомеханика и геофизика, многослойная геоинформационная система, мониторинг, прогнозирование, блочно-иерархическое строение, зональная дезинтеграция, газодинамические проявления, динамические воздействия.

DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.06>

Геофизической службы РАН и МЧС Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений.

Методологической основой создания многослойной геоинформационно-мониторинговой системы (ГИС) геомеханико-геодинамической безопасности России, включающей три базовых геоинформационных слоя — подземный, наземный и надземный, могут служить следующие установленные экспериментально важнейшие положения [1, 2]:

- основными свойствами геосреды являются ее блочно-иерархическое строение и постоянное колебательное движение структурных элементов горного массива;
- подвижность земной коры и ее проницаемость для жидкости и газов обусловлены наличием трещин, соразмерных отделяемым ими геоблокам соответствующего иерархического уровня;
- основными энергетическими источниками движения структурных элементов геосреды и ее геосфер в целом являются тепло недр Земли (тектонические силы), гравитационные приливы от планет Солнечной системы, атмосферное давление и техногенная деятельность человека.

Эти положения являются неременным условием обеспечения взаимосвязи энерго- и массообменных процессов между

* В работе принимал участие заведующий лабораторией горной геофизики ИГД СО РАН, канд. техн. наук В. И. Востриков.

геосферами Земли, а также космическим пространством. Наиболее ярко эта взаимосвязь выражена в тектонически активных зонах (горно-складчатых системах) нашей планеты.

Основопологающими для цикла экспериментально-теоретических исследований [1, 2] по формированию ряда ключевых элементов будущей многослойной ГИС «Геомеханико-геодинамическая безопасность России» являются три крупнейших результата (открытия) из нелинейной геомеханики и геофизики. Эти открытия условно можно отнести к описанию нелинейных динамических процессов в геосредах (*явление знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия*) и нелинейных квазистатических процессов в массивах горных пород (*явление зональной дезинтеграции горных пород*), связанных «самоорганизующимися» системами. Эти геомеханические эффекты связаны с блочно-иерархическим строением геоматериалов и массивов горных пород, поддающихся каноническому описанию [3]. Данное обстоятельство принципиально важно для построения соответствующих геомеханических моделей геосред.

На рубеже XX и XXI вв. произошло важное для естествоиспытателей событие: понимание того, что в основе развития нелинейных геомеханических и геодинамических процессов лежит блочно-иерархическое строение массивов горных пород. На это обстоятельство впервые особое внимание было обращено в работах акад. М. А. Садовского и его учеников из Института физики Земли (ИФЗ) им. О. Ю. Шмидта РАН, а также ученых ИГД СО РАН, существенно развивших базовые представления М. А. Садовского о блочно-иерархическом строении объектов геосреды в широком диапазоне их линейных размеров — от атомарных и до масштабных космических уровней [3].

На основе установленных закономерностей впервые предложены аналитические зависимости для построения классификаций горных пород по размерам естественных отдельностей. Накопленный геологами опыт свидетельствует о том, что каждый генетически одинаково организовавшийся тип породы представлен естественными отдельностями (кристаллы, обломки, зерна, кристаллиты и пр.), размеры которых находятся в определенных пределах — от минимальных до максимальных. Так как часто возникает необходимость построения узкоориентированных (частных) классификаций не только по основным генетическим типам горных пород, но и по их специфическим разновидностям, то для сопоставимости частные классификации можно привести к инвариантной шкале, что позволяет определить место различных горных пород в иерархически организованных процессах кластеризации геовещества, опираясь на достаточно универсальный закон «квантования» структурных отдельностей [4].

$$\Delta_i = \Delta_0(\sqrt{2})^i \text{ либо } \Delta_{i+1}/\Delta_i = \sqrt{2V_v}, \quad (1)$$

где $\Delta_0 \approx 2,5 \cdot 10^6$ м, $i \in \mathbb{N}$ — целые отрицательные или положительные числа (порядок размерностей).

Закономерность (1), проявляющаяся в блочно-иерархическом строении горных пород и массивов, одновременно отражает их прочностные свойства, что стало основанием для введения в канонических шкалах новых классификаций горных пород по преде-

лам прочности при одноосном сжатии и растяжении, контактной и агрегатной прочности. В отличие от обычно используемых в естественных науках логарифмических представлений с основаниями 10, 2 или e , здесь используются безразмерные представления с основанием логарифмов $\sqrt{2}$. Такие классификации получены как для горных пород в целом (т. е. без акцента на их разновидности), так и для основных генотипов пород углевмещающей толщи Кузбасса.

Развиваемый в работе [3] методический подход позволил впервые получить классификации, в существенной мере исключая субъективизм при их построении и отражающие совокупное влияние физико-механических свойств горных пород на процессы их разрушения по сопротивляемости разрушению (близкие аналоги — классификации проф. М. М. Протодьяконова и акад. В. В. Ржевского); водопрочности основных генотипов пород Кузбасса; абразивной способности горных пород; прочности породного массива; сопротивляемости горных пород бурению. Это направление исследований во многом связано с открытием явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [4], которое свидетельствует о наличии своеобразного закона «квантования геомеханической энергии» при образовании подземных выработок (полостей) в условиях больших глубин с коэффициентами «подобия» относительно их начального радиуса r_0 в виде $r_0(\sqrt{2})^n$ (где n — целые числа), а также сопряженного канонического ряда структурных отдельностей (1).

При этом установлена также статистически инвариантная связь между раскрытием (среднее расстояние между «берегами») трещин (δ_i) в горных массивах и диаметрами отделяемых ими геоблоков (Δ_i) различного иерархического уровня i

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \delta_i/\Delta_i = (1/2 + 2) \cdot 10^{-2}, \text{ для любого } i. \quad (2)$$

Характеристика (2) является весьма важной для оценки «меры подвижности» $\nu_{\Delta}(\delta)$ структурных элементов (блоков) в стесненных условиях массивов горных пород и фактически сопряжена с $\mu_{\Delta}(\delta)$, поскольку отделяющие геоблоки трещины всегда частично заполнены газом, жидкостью или более мелким фрагментированным твердым веществом. Для реальных массивов горных пород можно использовать упрощенную связь

$$\nu_{\Delta}(\delta) \sim 10^{-1} \cdot \mu_{\Delta}(\delta). \quad (3)$$

Открытия знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия, а затем и волн маятникового типа в напряженных геосредах [4, 5] явились этапными в создании экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики и геофизики. В середине 1970-х — начале 1980-х годов исследователями ИГД СО РАН на рудниках Норильска и ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН (спецсектор) на ядерном полигоне в Семипалатинске выполнен большой комплекс экспериментальных работ по изучению особенностей механических последствий взрывов разной мощности — от обычных при ведении горных работ до ядерных, что позволило установить неизвестное ранее явление знакопеременной реакции горных пород на динамические

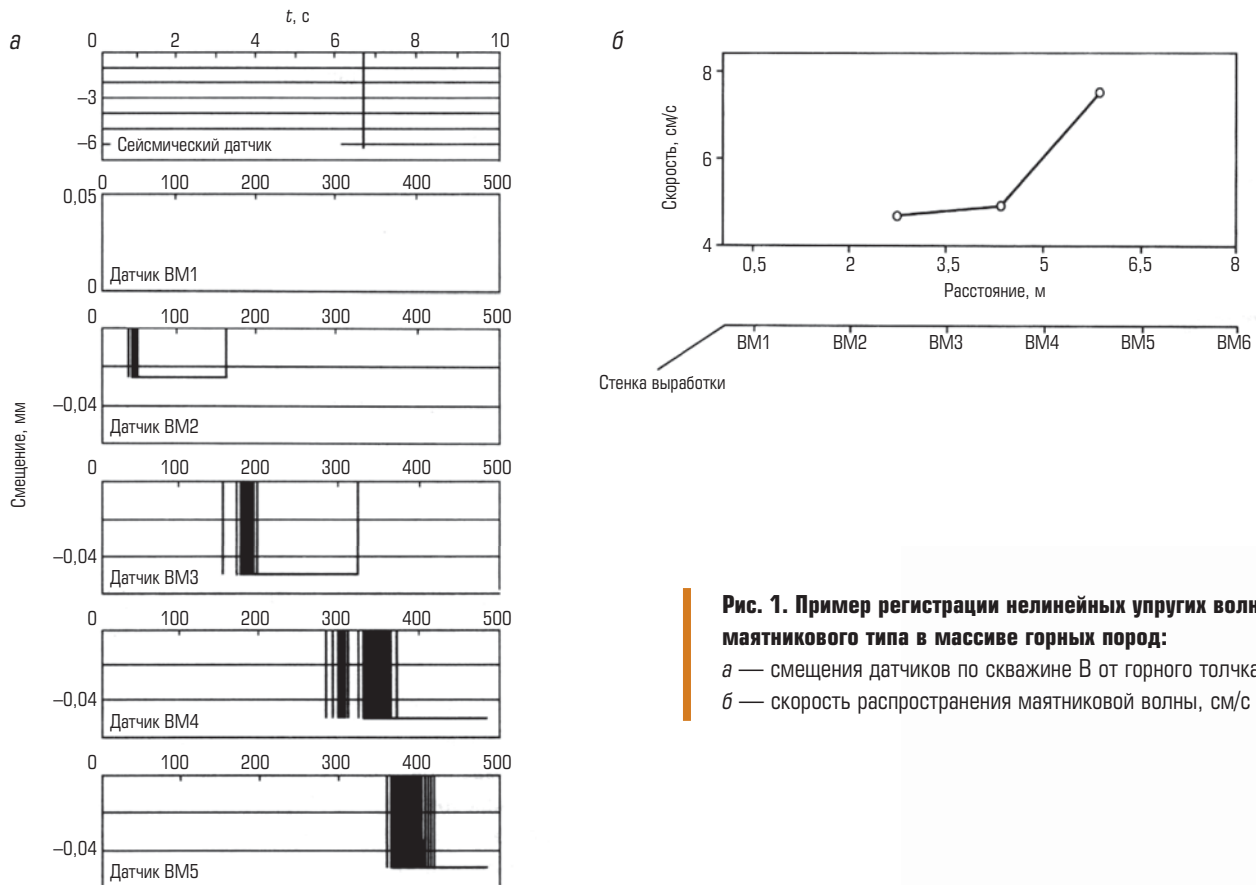


Рис. 1. Пример регистрации нелинейных упругих волн маятникового типа в массиве горных пород:

а — смещения датчиков по скважине В от горного толчка, мм;
б — скорость распространения маятниковой волны, см/с

воздействия [6], суть которого заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород посредством мощных взрывов в их окрестностях происходят смещения разных знаков между геоблоками с колебательным движением относительно друг друга, обусловленные стесненным поворотом и трансляционным движением породных блоков разного иерархического уровня и зависящие от размеров образующихся полостей, горного давления и энергии взрывов.

Эта простая на первый взгляд формулировка результатов привела к постановке принципиально новых задач для последующих теоретических, экспериментальных и прикладных исследований. В частности, была выдвинута гипотеза о возможности существования в массивах горных пород нелинейных упругих волн маятникового типа, носителями которых являются не абстрактные математические «элементарные объемы», а реальные структурные элементы геологического вещества в приближении «абсолютно твердых тел» [5]. Для их регистрации (рис. 1) и теоретического анализа в последнее десятилетие в ряде институтов СО РАН в рамках интеграционных проектов проводят специальные исследования и разработки.

Существенной особенностью знакопеременной реакции горных пород на мощные взрывные воздействия стало их «дальнедействие»: локальные механические проявления необратимого характера, как оказалось, происходят до расстояния $(8-10) \cdot R$, где R — радиус зоны взрывного разрушения породы (по М. А. Садовскому — В. В. Адушкину). Иными словами, по ре-

зультатам многочисленных экспериментов было установлено, что процесс деформирования массива горных пород имеет ярко выраженный неоднородный характер: деформации локализируются на поверхностях и в областях ослабления массива, а структурные блоки сдвигаются в значительной мере независимо. При этом движение блоков имеет знакопеременный характер по трансляционным и вращательным компонентам.

Обнаружение знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия стало экспериментальным доказательством того, что большая доля энергии взрывов расходуется не только на дробление породного массива в очаговой зоне и ее непосредственной окрестности, но и передается в виде кинетической энергии структурным элементам напряженной геосреды [6]. При этом показано, что нелинейные упругие волны маятникового типа обладают чрезвычайно широким скоростным диапазоном своего распространения в массивах горных пород и, в отличие от продольных и поперечных линейно-упругих волн, непосредственно зависят как от НДС массивов, так и от их блочно-иерархического строения. Установлена прямая зависимость скоростных характеристик этого типа волн от мощности источника их возмущения, а также возможность существования так называемых геомеханических волноводов. Эти возможности, безусловно, необходимо использовать в построении новых мониторинговых систем.

В качестве примера отметим, что в ИГД СО РАН создана и введена в эксплуатацию не имеющая аналогов в России многоканальная измерительная система «Карьер» для контроля геомеха-

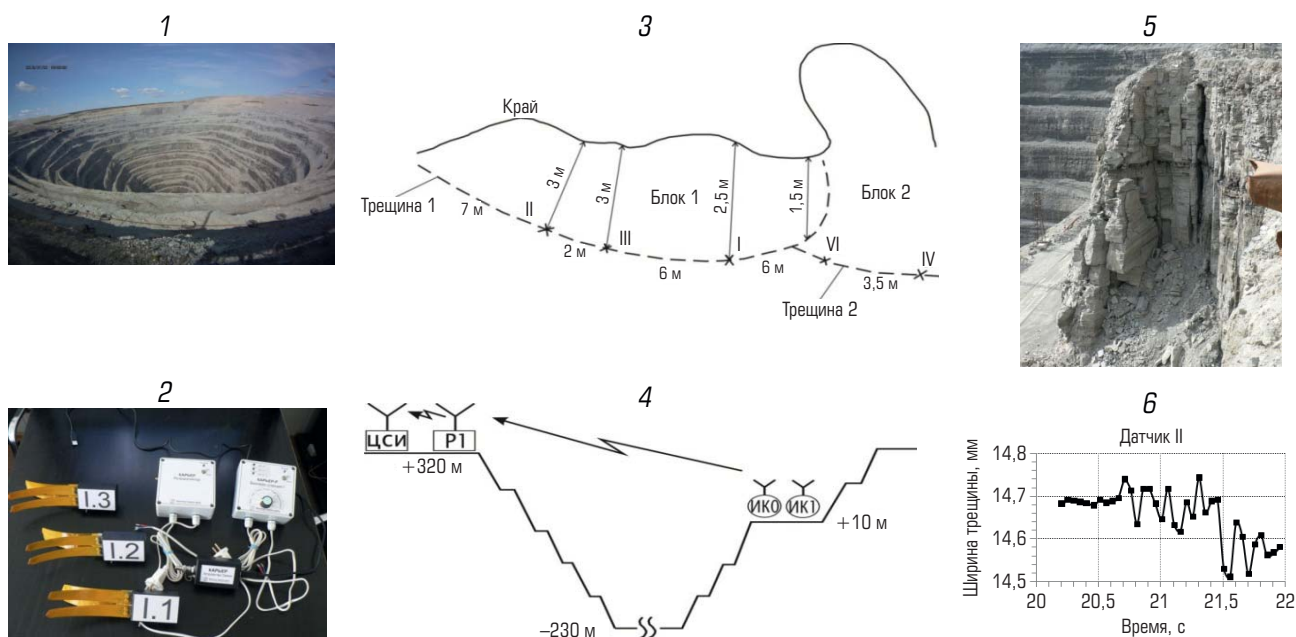


Рис. 2. Многоканальная измерительная система «Карьер» мониторинга геомеханического состояния бортовых откосов в глубоком карьере «Удачный»:

1 — карьер; 2 — датчик деформации; 3 — схема экспериментов измерения динамического воздействия от технологических взрывов на дне карьера; 4 — схема ретрансляционной передачи информации по радиоканалу; 5 — контролируемый уступ карьера; 6 — фрагмент динамической реакции блочной среды по одному из датчиков деформации, находящемуся в контролируемой трещине

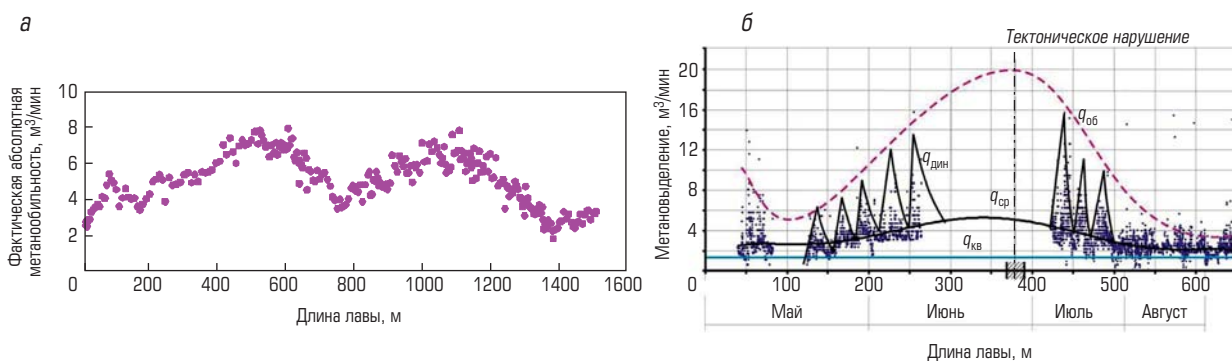


Рис. 3. Связь зональной дезинтеграции разрабатываемого массива горных пород с пространственной локализацией газодинамических проявлений на шахтах Кузбасса (по Г. Я. Полевщизку):

а — изменение метаностабильности выемочного участка по мере продвижения лавы; б — метановыделение в забое штрека, проводимого по верхнему из сближенных пластов IV–V при наличии породного междупластья

нического состояния бортов глубоких карьеров алмазоносных трубок Якутии (рис. 2) [6]. Входящий в состав системы «Карьер» измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) со специально созданными деформационно-волновыми датчиками и с радиоканалом дистанционной передачи информации в Центр ее сбора (ЦСИ) позволяют решать задачи по оценке устойчивости прибортовых зон глубоких карьеров в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера. В настоящее время система в составе двух ИВК проходит опытную эксплуатацию в режиме мониторинга на трубке «Удачная».

В монографии [7] представлены основные достижения в области исследований особенностей деформирования горных пород вокруг подземных выработок при разработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, в первую очередь на примере удароопасных полиметаллических рудников Талнахского и Октябрьского месторождений ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Ключевая роль в понимании этих нелинейных в своей основе процессов принадлежит экспериментально установленному на рудниках Норильска явлению зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [7], заре-

гистрированному в начале 1990-х годов как научное открытие СССР № 400 [8].

Речь идет об открытии своеобразного «*эффекта квантования упругой энергии*» вокруг подземных полостей при их образовании на глубинах, где достигаются условия близости или превышения действующего уровня горного давления относительно предельно-прочностных свойств горных пород. Открытие этого явления дало мощный импульс исследованиям широкого спектра горно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых — рудных, нерудных и угольных [9, 10]. Большим циклом экспериментально-теоретических исследований под руководством профессора Г. Я. Полевщикова на угольных месторождениях Кузбасса была установлена связь между развитием крупномасштабных зонально-дезинтеграционных процессов в продуктивных пластах и вмещающих породных массивах и пространственной локализацией сопутствующих газодинамических событий (рис. 3, а, б) по аналогии с наблюдаемыми на Норильских рудниках (рис. 4, а, б) [10, 11]. Существенно продвинуты разработки теоретических основ описания явления зональной дезинтеграции [7, 12–14], что само по себе имеет принципиальную значимость. В этом аспекте следует особо отметить цикл исследований, выполненных китайскими учеными [15–17]. Ключевая

роль в количественном описании установленной связи принадлежит масштабному фактору явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок по В. Н. Опарину [1] для угольных пластов при их выемке столбами, сопряженными с зоной дезинтеграции массивов. Аналогичная связь отмечена и в соответствующей «периодичности» возникновения зон концентрации повышенного и пониженного давления в стойках механизированных крепей при разработке угольных пластов Кузбасса.

Отмеченные крупномасштабные процессы самоорганизации рудных и угольных массивов горных пород принципиально значимы для интерпретации комплексных геомеханических, геофизических и иных данных в перспективных мониторинговых системах геомеханико-геодинамической безопасности горнопромышленных систем. Возможность их количественного (канонического) описания в рамках развития зонально-дезинтеграционных процессов различного масштабного уровня дает важный конструктив как для ретроспективного анализа имеющейся разноплановой информации, так и для построения прогнозных оценок развития сложных геомеханических процессов. Ключевая роль здесь принадлежит масштабному фактору явления зональной дезинтеграции для массивов горных пород вокруг вырабатываемых пространств.

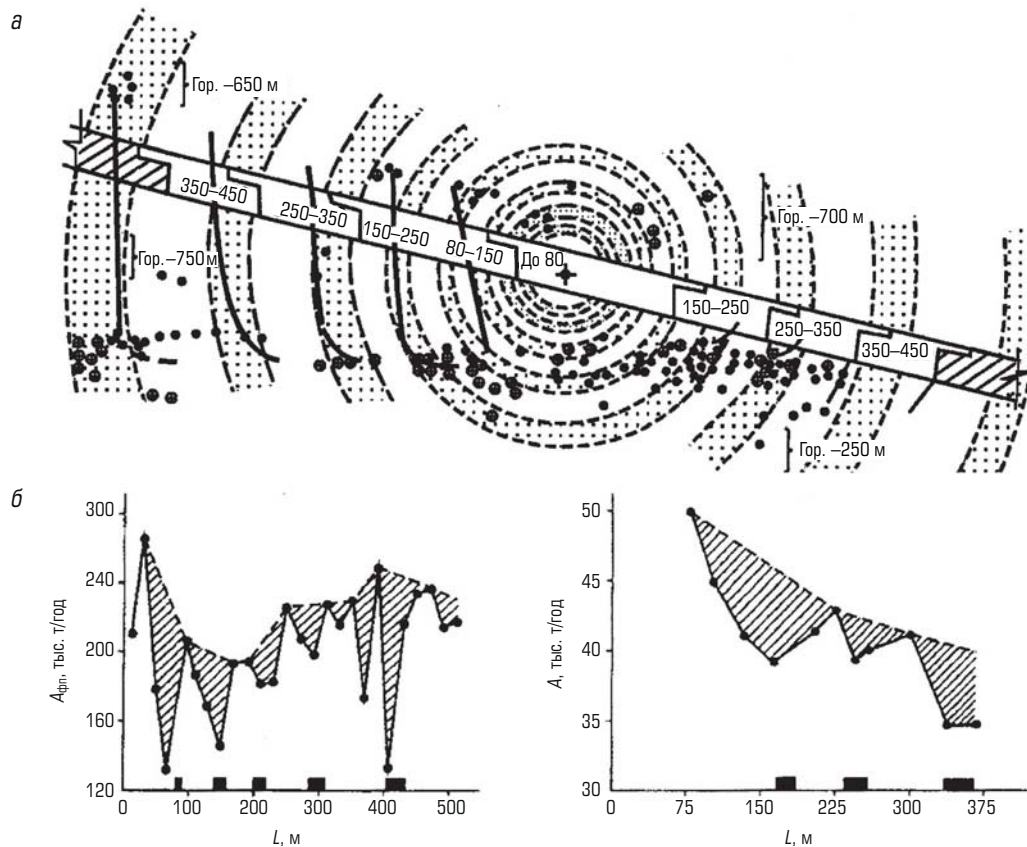


Рис. 4. Проявление эффекта зональной дезинтеграции на рудниках Норильска:

а — локализация мест разрушения капитальной крепи выработок вокруг выработанного пространства по мере увеличения его пролета на шахте № 1 рудника «Октябрьский»; б — изменение производительности фланга панели с развитием пролета отработки на шахте № 1 рудника «Октябрьский» (слева) и рудника на северо-восточном участке рудника «Комсомольский» (справа)

В заключение подчеркнем, что в настоящее время наметилась четкая тенденция сближения и активного взаимодействия специалистов, разрабатывающих измерительные системы мониторинга и приборные комплексы горно-геофизического и геомеханического направлений. Основными факторами такого сближения стали новые открытия в области нелинейной геомеханики и геофизики, связанные с блочно-иерархическим строением массивов горных пород и геоматериалов, выделением групп «медленных» волн деформаций (волны маятникового типа), динамикокинематические характеристики которых несут непосредственно информацию о НДС породных массивов и энергетических параметрах источников их излучения.

Реализованный объем научных исследований и технических разработок, несомненно, является крупным вкладом в развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики и геофизики, создавая соответствующие предпосылки для построения новых (прежде всего, сейсмодинамическо-электромагнитных) систем комплексного мониторинга горных ударов и техногенных землетрясений на рудниках и шахтах России. Обеспечение их геоинформационной сопряженности и совместимости с ныне действующей Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений — залог успешного решения сформулированной проблемы создания многослойной мониторинговой системы «Геомеханико-геодинамическая безопасность России и мира». В этом видится и мощный конструктивный потенциал для укрепления научно-практического взаимодействия между геофизиками, геомеханиками и горняками при обеспечении стратегии освоения месторождений полезных ископаемых в условиях усиливающейся в мире тенденции освоения глубоких горизонтов недр.

Библиографический список

1. Опарин В. Н. и др. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. — 450 с.
2. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 3–27.
3. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск : Наука, 2011. — 259 с.
4. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. 1999. № 3. С. 12–26.
5. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа $\mu\mu$ // ДАН. 1993. Т. 333. № 4. С. 515–521.
6. Опарин В. Н. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.
7. Опарин В. Н. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. — 278 с.
8. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // БИ. 1992. № 1. С. 3
9. Ягунов А. С. Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве. — Кемерово : Кузбассвуиздат, 2010. — 239 с.
10. Полевщиков Г. Я., Назаров Н. Ю. Влияние сдвижений прочных вмещающих пород на динамику метанообильности выемочного участка // ГИАБ. 2001. № 5. С. 121–127.
11. Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н. Газокинетический паттерн разрабатываемого массива горных пород // ГИАБ. 2002. № 11. С. 117–120.
12. Одинцов В. Н. Отрывные разрушение массива скальных пород. — М. : ИПКОН РАН, 1996. — 166 с.
13. Гузев М. А., Парошин А. А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // ПМТФ. 2000. № 3. С. 181–195.
14. Гузев М. А., Макаров В. В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. — Владивосток : Дальнаука, 2007. — 232 с.
15. Ван Ксю-Бин, Пан И-Шан, Чжан Чжи-Хуэй. Численное моделирование механизма пространственной локализации деформации в процессе зональной дезинтеграции // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 21–32.
16. Циопин Чжоу, Циц Цянь, Чжоу Кс. П., Цянь Кв. Х. Неевклидова модель разрушения глубокозалегающего породного массива в условиях несовместной деформации // ФТПРПИ. 2013. № 3. С. 33–41.
17. Циху Цян, Чжу Ксяопин, Кси Еньшин. Влияние горизонтальных напряжений на явление зональной дезинтеграции горных пород в массиве с выработкой круглого сечения // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 88–97. **ГЖ**

Нероба Анатолий Владимирович,
e-mail: egorkinana@nk.nornik.ru
Марысюк Валерий Петрович,
тел.: +7 (3919) 49-15-34
Опарин Виктор Николаевич,
тел.: +7 (383) 217-07-74
Тапсиев Александр Петрович,
тел.: +7 (383) 217-08-21

Author 1	Name & Surname: Neroba A. V.
	Company: Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)
	Work Position: Vice Director for Mineral and Raw Materials Base Development
	Contacts: e-mail: egorkinana@nk.nornik.ru
Author 2	Name & Surname: Marysyuk V. P.
	Company: Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)
	Work Position: Principal Engineer, Center for Geodynamic Safety
	Scientific Degree: Candidate of Engineering Sciences
Author 3	Name & Surname: Oparin V. N.
	Company: Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
	Work Position: Head of Experimental Geomechanics Department
	Scientific Degree: Corresponding member RAS
Author 4	Name & Surname: Tapsiev A. P.
	Company: Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia)
	Work Position: Head of Underground Ore Mining Laboratory
	Scientific Degree: Doctor of Engineering Science
Abstract	The contribution of V. I. Vostrikov, Head of Rock Geophysics Laboratory, Chinakal Institute of Mining, Candidate of Engineering Sciences is highly appreciated. The article focuses on discoveries and achievements in the area of nonlinear geomechanics and geophysics. The authors offer the methodological basis for multi-layer geoinformation-monitoring system “Geomechanical-Geodynamic Safety of Russia”. In the article, the canonical scale for representing structural block hierarchy of rocks and rock masses, the phenomenon of alternating response of rocks; the nature of pendulum-type waves in high-stress geomechanics; the phenomena of zonal disintegration of rocks and self-organization of rock mass are described. The zonal disintegration phenomenon has been related with the spatial localization of gas-dynamic events in terms of mines in Kuzbass and Norilsk Region.
	The theoretical developments and the found relationships have been confirmed by the large-scale natural experiments carried out in Talnakh mines and, later on, by the full-scale studies in the diamond- and coal-bearing regions in Russia and abroad. The theoretical and practical findings and developments are the immense contribution to the advancement of principles of the nonlinear geomechanics and geophysics, which creates background for engineering new systems of integrated monitoring of natural and induced rock bursts and earthquakes in deeper level underground mining in the world.
Keywords	Underground mining, geodynamic safety, nonlinear geomechanics and geophysics, multi-layer geoinformation system, monitoring, forecasting, hierarchical block structure, zonal disintegration, gas-dynamic events, dynamic effects.
References	<ol style="list-style-type: none"> Oparin V. N. et al. <i>Sovremennaya geodinamika massiva gornykh porod verkhney chasti litosfery: istoki, parametry, vozdeystviye na obekty nedropolzovaniya</i> (Modern geodynamics of rock massif of the top part of lithosphere: origins, parameters, influence on subsoil use objects). Novosibirsk : Publishing House of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2008. 450 p. Adushkin V. V., Oparin V. N. Ot yavleniya znakoperemennoy reaktsii gornykh porod na dinamicheskie vozdeystviya – k volnam mayatnikovogo tipa v napryazhennykh geosredakh. Chast I (From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomechanics. Part I). <i>Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science</i>. 2012. No. 2. pp. 3–27. Oparin V. N., Tanayno A. S. <i>Kanonicheskaya shkala ierarkhicheskikh predstavleniy v gornom porodovedenii</i> (Canonical hierarchy scale in mining rock science). Novosibirsk : Nauka, 2011. 259 p. Kurlenya M. V., Oparin V. N. Problemy nelineynoy geomekhaniki. Chast I (Problems of non-linear geomechanics. Part I). <i>Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science</i>. 1999. No. 3. pp. 12–26. Kurlenya M. V., Oparin V. N., Vostrikov V. I. O formirovani uprugikh volnovykh paketov pri impulsnom vzbuzhdenii blochnykh sred. Volny mayatnikovogo tipa u (About formation of elastic wave packets during pulse excitation of block mediums. Pendular-type waves u). <i>Doklady Akademii Nauk = Reports of Academy of Sciences</i>. 1993. Vol. 333, No. 4. pp. 515–521. Oparin V. N. et al. <i>Dstruktsiya zemnoy kory i protsessy samoorganizatsii v oblastiakh silnogo tekhnogenno vozdeystviya</i> (Destruction of the earth's crust and processes of self-organization in the areas of strong anthropogenic influence). Novosibirsk : Publishing House of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2012. 632 p. Oparin V. N. et al. <i>Zonalnaya dezintegratsiya gornykh porod i ustoychivost podzemnykh vyrabotok</i> (Zone disintegration of rocks and stability of underground excavations). Novosibirsk : Publishing House of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2008. 278 p. Shemyakin E. I., Kurlenya M. V., Oparin V. N., Reva V. N., Glushikhin F. P., Rozenbaum M. A. Otkrytie SSSR No. 400. Yavlenie zonalnoy dezintegratsii gornykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok (USSR discovery No. 400. Phenomena of zonal disintegration of rocks around the underground excavations). <i>Byulleten izobreteniy = Bulletin of inventions</i>. 1992. No. 1. p. 3 Yagunov A. S. <i>Dinamika deformatsiy v podrabatyvaemom gornom massive</i> (Dynamics of deformations in underworking rock massif). Kemerovo : Kuzbassvuzdat, 2010. 239 p. Polevshchikov G. Ya., Nazarov N. Yu. Vliyaniye sdvizeniy prochnykh vmeshchayushchikh porod na dinamiku metanoobilnosti vyemochnoy uchastka (Influence of movement of solid deads on dynamics of methane-bearing capacity of working area). <i>Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten = Mining Informational-Analytical Bulletin</i>. 2001. No. 5. pp. 121–127. Polevshchikov G. Ya., Kozyreva E. N. Gazokineticheskiy pattern razrabatyvaemogo massiva gornykh porod (Gas-kinetic pattern of developed rock massif). <i>Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten = Mining Informational-Analytical Bulletin</i>. 2002. No. 11. pp. 117–120. Odintsev V. N. <i>Otryvnoye razrusheniye massiva skalnykh porod</i> (Detachable destruction of hard rock massif). Moscow : Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 1996. 166 p. Guzev M. A., Paroshin A. A. Neevklidova model zonalnoy dezintegratsii gornykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok (Non-Euclidean model of zonal disintegration of rocks around the underground excavations). <i>Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics</i>. 2000. No. 3. pp. 181–195. Guzev M. A., Makarov V. V. <i>Deformirovaniye i razrusheniye silno szhatykh gornykh porod vokrug vyrabotok</i> (Deforming and destruction of strongly compressed rocks around excavations). Vladivostok : Dalnzuka, 2007. 232 p. X. Wang, Y. Pan, Z. Zhang. Chislennoye modelirovaniye mekhanizma prostranstvennoy lokalizatsii deformatsii v protsesse zonalnoy dezintegratsii (A spatial strain localization mechanism of zonal disintegration through numerical simulation). <i>Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science</i>. 2013. No. 3. pp. 21–32. X. Zhou, Q. Qian. Neevklidova model razrusheniya glubokozalegayushchego porodnogo massiva v usloviyakh nesovmestnoy deformatsii (The Non-Euclidean model of failure of the deep rock masses under the deformation incompatibility condition). <i>Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science</i>. 2013. No. 3. pp. 33–41. Q. Qian, X. Zhou, and E. Xia. Vliyaniye gorizontalnykh napryazheniy na yavlenie zonalnoy dezintegratsii gornykh porod v massive s vyrabotkoy kruglogo secheniya (Effects of the axial in situ stresses on the zonal disintegration phenomenon in the surrounding rock masses around a deep circular tunnel). <i>Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science</i>. 2012. No. 2. pp. 88–97.