

# О ПРИРОДЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОГЕННЫХ НАРУШЕНИЙ В ГОРНОМ МАССИВЕ (ОТ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ДО ПРОВАЛОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ)

## ON THE NATURE OF TECHNOGENIC DISTURBANCE DEVELOPMENT IN A ROCK MASSIF (FROM ZONAL DESINTEGRATION OF ROCKS AROUND UNDERGROUND OPENINGS TO COLLAPSES OF THE EARTH SURFACE)

**ИЛЬЧЕНКО В.Л.**

Научный сотрудник Геологического института Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской обл., [vadim@geoksc.apatity.ru](mailto:vadim@geoksc.apatity.ru)

**МЕДВЕДЕВА С.Г.**

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, [twelanis@mail.ru](mailto:twelanis@mail.ru)

**ILCHENKO V.L.**

A staff scientist of the Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk Region, Russia, [vadim@geoksc.apatity.ru](mailto:vadim@geoksc.apatity.ru)

**MEDVEDEVA S.G.**

A postgraduate student of the engineering and ecological geology department of the geology faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, [twelanis@mail.ru](mailto:twelanis@mail.ru)

### Ключевые слова:

провалы; зональная дезинтеграция горных пород; контур горной выработки; стоячие волны.

### Key words:

collapses; zonal desintegration of rocks; mining contour; standing waves.

### Аннотация

С точки зрения «волновой геодинамики» рассмотрен сценарий развития системы техногенных нарушений в массиве горных пород от проходки протяженной горной выработки на большой глубине до появления провалов земной поверхности, обусловленных пошаговой зональной дезинтеграцией массива («эффектом квантования») вокруг выработки. Сделан вывод, что дезинтеграция, скорее всего, происходит в результате воздействия на горные породы системы стоячих волн, инициированных колебаниями на контуре выработки.

### Введение

Принято считать, что относительно спокойное существование человека и природы закончилось в конце XVII в. с началом промышленной эпохи и стремительным ростом техногенного воздействия на природную среду. Современный техногенез имеет глобальный масштаб проявлений, а их опасность усугубляется непредсказуемостью. К началу XXI в. наблюдаемые явления техногенеза становятся вполне сопоставимыми с природными процессами горообразования [11]. Активно агрессивный по своему характеру, техногенез способен внезапно изменять эколого-геодинамические свойства земной коры. Техногенные воздействия оказывают большое влияние не только на экзогенные, но и на эндогенные геологические процессы, приводя к катастрофическим последствиям [3].

Ни один вид человеческой деятельности не оказывает такого комплексного давления на окружающую среду, как горное производство. Пространственно-временные нарушения в порядке проявления геологических процессов, изменение напряженно-деформированного состояния литосферных блоков и рост заселенности территорий увеличивают экологический риск. На территориях горной добычи зачастую не только активизируются природные геологические процессы, характерные для соответствующей местности, но и возникают новые, техногенные.

Интенсивность геологических процессов, связанных с добычей полезных ископаемых, зависит не столько от состава минерального сырья, сколько от технологии добычи. Большинство месторождений полезных ископаемых, извлекаемых закрытым способом, приурочено к аномальным геодинамическим зо-

### Abstract

From the standpoint of the «wave geodynamics» the article considers a scenario of the anthropogenic disturbance system development in a rock massif from advancing an extended underground opening at great depth to appearing earth surface collapses caused by step-by-step zonal desintegration of the massif («quantization effect») around the opening. The authors conclude that the desintegration most likely occurs as a result of impact on the rocks of the standing wave system initiated by oscillations on the mining contour.



нам, характеризующимся тектонической подвижностью и раздробленностью пород, что также осложняет горные работы и способствует активизации природных и возникновению новых техногенных геологических процессов [11].

К новым геологическим процессам, спровоцированным техногенезом, относятся: оседание земной поверхности (с разрывом сплошности и без нее), горные удары, образование провалов (а в условиях вечной мерзлоты — провальных озер и наледей), осушение и подтопление горнопромышленных территорий. Например, в Западном Донбассе по мере разработки продуктивной толщи, залегающей на глубинах до 100 м, закрытым способом без закладки выработанного пространства участки с глубиной оседания 5–7 м охватили площадь более 20 км<sup>2</sup>, а оседание на 3–5 м было отмечено на территории 110 км<sup>2</sup> [8]. Примеров такого рода (в т.ч. и с более серьезными последствиями) имеется множество, и число их растет.

Таким образом, техногенные явления «провальной» тектоники на сегодняшний день приобретают статус стихийных бедствий, природа которых нуждается в самом пристальном и всестороннем изучении.

В ходе 1-й Китайско-российской научной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке полезных ископаемых на больших глубинах», помимо прочего, обсуждалось открытие российских ученых в области нелинейной геомеханики — «явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок» (открытие СССР № 400, авт.: Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, В.Н. Опарин, А.П. Тапсиев и др.). Сущность данного явления состоит в том, что массив горных пород вокруг подземных выработок на больших глубинах разрушается зонально, причем сначала образуется зона разрушения непосредственно на контуре выработки, затем возникает вторая зона трещин, отстоящая от первой на определенное расстояние. Здесь трещины также ориентированы по контуру выработки. Затем «квантообразно» образуются другие зоны разрушения массива. Зональная дезинтеграция массива горных пород имеет упорядоченный характер: средние значения радиусов и ширина зон разрушения для протяженной выработки образуют геометрическую прогрессию с основанием  $\sqrt{2}$ . Это явление свидетельствует о наличии своеобразного закона «квантования» геомеханической энергии при образовании нарушенных зон в окрестностях подземных выработок в условиях больших глубин с коэффициентом «подобия» относительно их начального радиуса в виде  $(\sqrt{2})^n$  (где  $n$  — целые числа) [10].

В настоящее время дискуссии по поводу этого эффекта «квантования» продолжаются. Адекватная физическая модель и теория данного явления не созданы, и ни одна из предложенных гипотез о его природе также пока не верифицирована [8].

В настоящем исследовании сделана попытка установления механизма возникновения провалов на земной поверхности вследствие развития зональной дезинтеграции горных пород в окрестностях протяженных выработок на большой глубине с позиций «волновой геодинамики».

## Обсуждение явления зональной дезинтеграции

Обсуждаемое явление обладает упорядоченностью пространственного проявления его признаков, описываемой выражением, включающим степенной коэффициент подобия  $(\sqrt{2})^n$  (явное свойство систем с самоорганизованной критичностью [9]), и закономерным целочисленным («квантованным») распределением геомеханической энергии [10], что является основанием для попытки объяснения его природы с позиций «волновой геодинамики». В 2000–2002 гг. в Геологическом институте Кольского научного центра РАН была проведена экспериментальная работа, цель которой, помимо прочего, заключалась в том, чтобы выяснить, как происходит разрушение объема горной породы, находящегося под воздействием поля стоячих волн [7].

Этот эксперимент проводился следующим образом. К образцам осадочных пород кубической формы, помещаемым между плитами прессы, присоединялся источник ультразвуковых колебаний (с частотой 1,25 МГц и длиной волны 3 мм). Размеры образцов (в направлении озвучивания) строго контролировались таким образом, чтобы бегущие волны в них могли трансформироваться в стоячие: расстояние в направлении озвучивания между гранями кубика горной породы выдерживалось кратным числу длин полуволн. Затем нагнеталось давление до тех пор, пока озвучиваемые образцы не начинали разрушаться. Контрольная группа аналогичных образцов разрушалась без озвучивания.

В результате было установлено, что озвучиваемые стоячими волнами образцы разрушались (расслаивались) по множеству поверхностей конусовидной формы наподобие структуры «вложенных конусов» («cone-in-cone»). Толщина этих обломков (черепков) приблизительно составляла 1,5 мм. Разрушение контрольной группы образцов проходило по «обычному» сценарию, т.е. с заложением системы трещин разных ориентировок — от субвертикальных (близких к направлению прилагаемой нагрузки) до наклонных, с углом к оси нагружения не более 45°. В итоге был сделан вывод о том, что стоячие волны способны контролировать процесс разрушения горной породы и разрушение это происходит по системе поверхностей, образованных множеством узловых точек озвучивающей стоячей волны [7].

Теперь рассмотрим зональную дезинтеграцию горных пород вокруг подземных выработок. Из результатов экспериментальных и теоретических исследований, приведенных в книге Ю.Н. Иванова «Ритмодинамика» [6], известно, что может быть только три вида идеально устойчивых волновых систем с минимальными размерами: (1) два осциллятора и стоячая волна между ними; (2) три осциллятора, образующие равносторонний треугольник с длиной стороны, равной стоячей волне; (3) четыре осциллятора в виде равностороннего тетраэдра с длиной ребра, равной длине стоячей волны. Остальные геометрические фигуры, связанные стоячими волнами, имеют перекрестные нецелочисленные связи в виде тех же волн. Нецелочисленные стоячие волны уменьшают устойчивость системы, т.е. делают ее менее стабильной (рис. 1).



**Рис. 1. Квадратная модель системы осцилляторов. Такая система не будет стабильной из-за присутствия в ней пары диполей с нецелочисленными (диагональными) связями [6]. Цифрами для левого квадрата показаны длины волн в условных единицах (усл. ед.);  $\lambda_{ст}$  — длина стороны квадрата**

Как показано на рис. 1, в квадрате с длиной стороны  $\lambda_{ст} = 1$  усл. ед. длина диагонали будет  $\lambda_d = \sqrt{2} \approx 1,414$  усл. ед. Это значение ( $\sqrt{2}$ ) входит в описание размера диагонали контура идеальной горной выработки (шахты, штольни и др.) квадратного сечения и вытекает из теоремы Пифагора для прямоугольного треугольника ( $a^2 + b^2 = c^2$ , где при длинах катетов  $a = b = 1$  усл. ед. длина гипотенузы  $c = \sqrt{2}$  усл. ед.) [1].

И, как уже было сказано выше, средние значения радиусов и ширина зон разрушения зональной дезинтеграции массива горных пород вокруг контура горной выработки образуют геометрическую прогрессию с основанием  $\sqrt{2}$  [10]. Таким образом, сразу возникает предположение о том, что периодичность распределения нарушенных зон вокруг этого контура может быть обусловлена отсутствием устойчивого равновесия в распределении энергии осцилляторов в «квадратной» конфигурации.

Из работ А.Г. Гликмана [2 и др.] известно, что все геологические объекты (и литосферу в целом) следует рассматривать как колебательные системы, в которых могут возникать и взаимодействовать стоячие волны. Конфигурация колебательной системы и количество стоячих волн в ней зависят от формы колеблющегося объекта. При возбуждении колебаний, например, в цилиндрическом объекте (пьезокерамическом диске) возникает система из двух стоячих волн — одной по его толщине и другой по его диаметру [2].

Колебания в литосфере возбуждаются в результате межпланетного гравитационного взаимодействия. Наиболее заметными среди них являются, по-видимо-

му, лунные приливные волны в земной коре, или бегущие волны деформации [4]. Действие бегущих волн предполагает при наличии благоприятных условий (отражающих поверхностей) возникновение в твердой среде (в результате интерференции) системы стоячих волн с их узлами и зонами пучностей. В узлах вещество неподвижно, в пучностях — колеблется и поэтому несколько более пластично, чем в первых. Повышенная хрупкость вещества в узловых зонах является хорошей предпосылкой к избирательному разрушению породы по этим зонам под воздействием сил литостатического давления на больших глубинах.

Таким образом, если рассматривать массив горных пород как колебательную систему, то контур горной выработки квадратного сечения со стороной  $\lambda_{ст} = 1$  усл. ед., пройденный в таком массиве, может превращаться в осциллятор, излучающий по горизонтали и по вертикали волны длиной  $\lambda_{ст} = 1$  усл. ед., а в диагональных направлениях —  $\lambda_d = \sqrt{2}$  усл. ед. В ближайших окрестностях контура горной выработки эти (разбегающиеся от контура) волны трансформируются в стоячие и захватывают контроль над геодинамическими процессами, протекающими в ближайших окрестностях выработки.

Теперь рассмотрим природу степенного коэффициента подобия  $(\sqrt{2})^n$ . Его значения (при целочисленных  $n = 0; 1; 2$  и т.д.) состоят из попеременного чередования целых и дробных чисел. Контур горной выработки квадратного сечения, превращаясь в осциллятор, излучает две волны (контурную и диагональную) разной длины ( $K$  и  $D$  соответственно), и, таким образом, этот ряд представляет собой не одну, а две последовательности, одна из которых — диагональная, кратная  $\sqrt{2}$ , а другая — контурная, кратная 2 (см. таблицу).

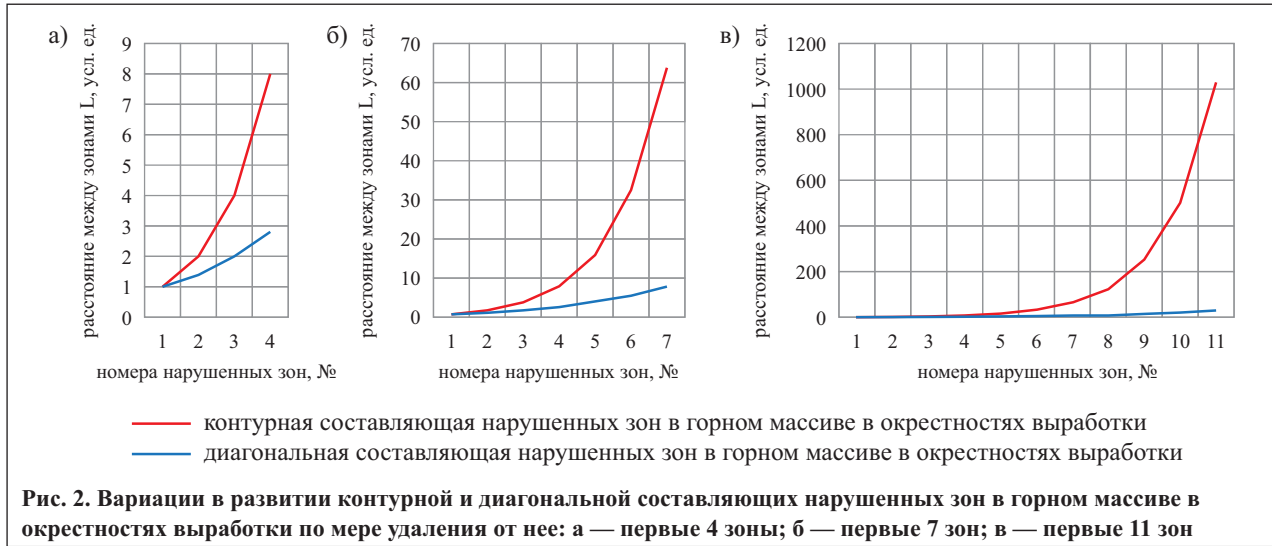
В итоге в окрестности контура горной выработки возникнут две стоячие волны — диагональная и контурная, формирующие зоны разрушения на расстояниях от нее, определяемых последовательностями  $D$  и  $K$  (см. таблицу). При этом каждая следующая зона нарушений (система узлов стоячей волны) отделена от предыдущей в два раза большим расстоянием. Такая избирательность в локализации нарушенных зон с последовательным удвоением расстояний от источника осцилляций по мере удаления от него обуславливается шаговым ритмом [10] протекания процесса. Первый шаг — разрушения на контуре выработки, следующий — появление первой зоны разрушений, после чего начинает осциллировать уже не этот контур, а поверхность первой зоны, которая будет иметь

Таблица

Зоны разрушения в окрестности выработки ( $D$ — диагональ, $K$ — контур)												
Длина волны	№ зоны разрушения											
	0**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	и т.д.
Диагональной, $D$ , усл. ед.*	1	$\sqrt{2}$	2	$2\sqrt{2}$	4	$4\sqrt{2}$	8	$8\sqrt{2}$	16	$16\sqrt{2}$	32	и т.д.
Контурной, $K$ , усл. ед.	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	и т.д.

\* Усл. ед. — условные единицы.

\*\* 0 — контур выработки.




в два раза больший размер, чем он, и, соответственно, излучать волны в два раза большей длины. Это обстоятельство приводит к появлению второй зоны разрушений, удаленной от контура выработки на в два раза большее расстояние. Вторая зона, превращаясь в осциллятор, порождает третью и т.д. Диагональная и контурная волны пошагово «захватывают» пространство с разной «скоростью»: контурная действует более эффективно (рис. 2).

Узлы диагональной волны через раз совпадают с узлами контурной, что никоим образом не мешает их распространению. Эта ситуация через некоторое время приводит к возникновению в породах вокруг контура выработки последовательной серии нарушенных зон, пространственное распределение которых будет на первый взгляд описываться зависимостью с коэффициентом подобия  $(\sqrt{2})^n$  (где  $n$  — целое число и порядковый номер зоны разрушения, возрастающий в направлении от контура горной выработки, для которого  $n = 0$ ).

На рисунке 2 показано развитие зон дезинтеграции пород вокруг горной выработки. Очевидно, что контурная составляющая (как более «агрессивная», способная значительно быстрее достигать земной поверхности и вызывать эффекты «провальной» тектоники) является претендентом на главную роль в списке причин техногенной тектоники.

## Выводы

Установлено, что основной причиной упорядоченного характера зональной дезинтеграции массива горных пород вокруг горной выработки с периодическим образованием зон разрушения (с увеличением их размеров в геометрической прогрессии с основанием  $\sqrt{2}$ ) является контролирующее воздействие поля стоячих волн, возбуждаемых в окрестностях этой выработки колебаниями ее контура, на котором генерируются «контурная» и «диагональная» стоячие волны. При этом контурная составляющая (более «агрессивная»), по-видимому, может рассматриваться как основная причина техногенной тектоники. 

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00082).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1986. 544 с.
2. Гликман А.Г. Спектральная сейсморазведка — истоки и следствия: историко-методологическое повествование / Официальный сайт научно-технической фирмы «Геофизпрогноз». 2009. URL: <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book2/>.
3. Голубов Б.Н., Геворкян С.Г. Зависимость режима собственных колебаний и вращений земли от техногенного разрушения ее недр и поверхности // Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). М.: Научный мир, 2000. С. 254–276.
4. Добролюбов А.И. Бегущие волны деформации. М.: Едиториал УРСС, 2003. 144 с.
5. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок // Википедия. 2013. URL: [wikipedia.org/wiki/Зональная\\_дезинтеграция\\_горных\\_пород\\_вокруг\\_подземных\\_выработок](http://wikipedia.org/wiki/Зональная_дезинтеграция_горных_пород_вокруг_подземных_выработок).
6. Иванов Ю.Н. Ритмодинамика. М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 215 с.
7. Ильченко В.Л. Результаты экспериментального исследования ультразвукового воздействия на упругие свойства осадочных горных пород под нагрузками // Материалы Всероссийской научной конференции «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков» / под ред. Н.П. Лаверова, Ю.Н. Авсюка. Т. 3. М.: Изд-во РООУ ППГ, 2002. С. 133–134.
8. Инженерная геология СССР. Платформенные регионы Европейской части СССР. Кн. 2. М.: Недра, 1991. 357 с.
9. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность и сейсмический процесс // Материалы Всероссийского семинара-совещания «Триггерные эффекты в геосистемах», г. Москва, 22–24 июня 2010 г. / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С. 79–87.
10. Первая китайско-российская научная конференция «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке полезных ископаемых на больших глубинах» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 3. С. 111–115.
11. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г., Барбошкина Т.А., Жигалин А.Д., Харьковина М.А. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Ноосфера, 2006. 720 с.