

ДЕФОРМИРОВАНИЕ БЛОЧНОЙ СРЕДЫ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

В. В. Гарнов, А. А. Спивак

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, spivak@idg4.chph.ras.ru

В результате уникальных экспериментов, выполненных в штольнях и на поверхности горного массива Семипалатинского испытательного полигона, определены основные закономерности движения структурных блоков разного масштаба при подземных ядерных взрывах. Пространственно-временные движения блоковых структур характеризуются знакопеременным характером. Амплитуды дифференциальных блоковых движений значительно превышают смещения во взрывной сейсмической волне. Определены линейные размеры и дифференциальные смещения блоков разного масштаба, вызванные взрывным воздействием.

Ключевые слова: подземный ядерный взрыв, движение структурных блоков среды.

ВВЕДЕНИЕ

Относительные (дифференциальные) смещения блоков геологической среды играют важную роль в поведении среды при внешних воздействиях взрывного типа [1]. Возможность возникновения дифференциальных движений связана, в первую очередь, со сложной структурной неоднородностью реальной геологической среды. Неоднородность, проявляющаяся в виде естественных структурных нарушений и зон ослабления прочности среды (тектонические разломы и трещины разного масштаба, зоны дробления, слоистость среды и т. д.), а в ряде случаев — в виде искусственно созданных подземных сооружений, определяет деформационные, прочностные и фильтрационные свойства массивов горных пород, которые играют важную роль в формировании отклика среды на внешние воздействия [2, 3].

М. А. Садовский, придавая исключительное значение влиянию блочной структуры на эволюционное развитие геофизической среды, неоднократно подчеркивал необходимость исследования закономерностей движения блоков и их ансамблей, особенно при крупномасштабных воздействиях, когда эти движения проявляются особенно ярко. Предложенная М. А. Садовским дискретно-иерархическая блоковая модель геофизической среды позволила качественно и количественно описать многие казавшиеся аномальными проявления подземного ядерного взрыва: сильную пространственную неоднородность деформирования среды [4, 5], дальное действие подземного ядерного взрыва (наличие локальных сильно выраженных раз-

рушений среды на расстояниях, значительно превышающих размер зоны разрушения [6]) и т. п. Здесь уместно отметить также, что М. А. Садовский был первым, кто предлагал использовать подземный ядерный взрыв в качестве удобного инструмента исследования геофизической среды, получать новые фундаментальные знания, выполняя чисто практические задачи геодинамического обеспечения подземных ядерных испытаний.

В настоящей работе приведены основные экспериментальные результаты изучения блоковых движений при подземных ядерных взрывах, выполненных на Семипалатинском испытательном полигоне. Измерения, проведенные при внешних воздействиях взрывного типа, которые интенсифицируют процессы блоковых движений, позволили определить не только характер, но и основные количественные закономерности деформирования блочно-иерархических структур.

МЕТОДЫ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С точки зрения решения практических задач, измерительные методы ориентированы на определение линейных размеров активно деформирующихся блоков, амплитуд межблоковых перемещений и на определение вероятных мест их возникновения. При этом вызываемые взрывным воздействием перемещения и деформации делятся на остаточные смещения внутри блоков и на границы между ними, перемещения блоков как целостных структур и дифференциальные межблоковые смещения — перемещения соседних блоков относительно друг

друга. Ожидалось, что с большей вероятностью аномальные по всем характеристикам механические проявления будут наблюдаться на нарушениях сплошности массива горных пород. Исходя из этого в экспериментах применялись следующие методики

Измерение смещений в волне сжатия. Использовались датчики скорости смещения среды нескольких типов, работающие в разных частотных диапазонах. Датчики устанавливались на минимально возможных расстояниях друг от друга на разных берегах разломов и крупных трещин в окрестности взрыва и на расстояниях до нескольких десятков километров при измерении сейсмического воздействия. По результатам измерения массовых скоростей определялись не только величина и интенсивность взрывной нагрузки, но и разность перемещений блоков, разделенных структурными нарушениями, путем интегрирования эпюр скорости смещения в волне.

Измерение деформаций горных пород в блоках. Измерения выполнялись с помощью «точечных» датчиков деформации ДДП и позволяли оценивать изменения напряженно-деформированного состояния внутри целых (ненарушенных) блоков (диапазон измерений $10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.).

Измерение относительных остаточных перемещений в массиве горных пород проводилось в штольнях с помощью деформометров струнного и ленточного типа с разной базой (деформометры с базой 1 ÷ 15 м устанавливались как на структурных нарушениях разного масштаба, так и в пределах блоков).

Регистрация абсолютных и относительных перемещений геодезических реперов, установленных в подземных выработках (нивелирование вдоль стенок штолен) и на поверхности массива горных пород. Наиболее детально изучались движения блоков с помощью наблюдений на поверхности массива горных пород. В этом случае регистрировались линейные и угловые движения структурных блоков выходящего на поверхность скального массива и относительные смещения блоков с помощью систем глубинных геодезических реперов, установленных в виде групп на площадках. На рис. 1 приведен пример расположения глубинных реперов на одной из площадок, включающих глубинный Калба-Чингизский тектонический разлом.

На рис. 2 представлена фотография глу-

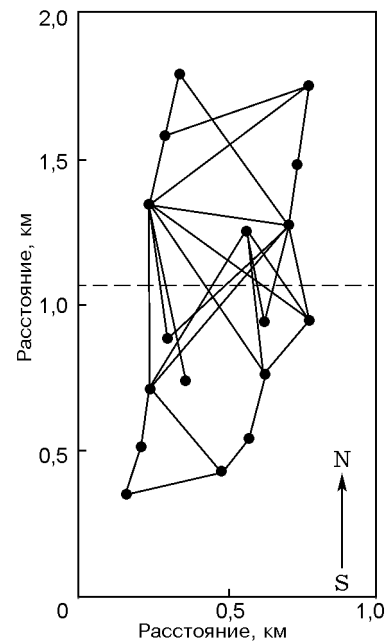


Рис. 1. Расположение глубинных геодезических реперов на реперном поле № 3 в окрестности глубинной тектонической структуры (точки) и схема проведения светодальномерных измерений (отрезки прямых); штриховая линия — Калба-Чингизский глубинный разлом

бинного геодезического репера, оборудованного специальными оптическими приборами, предназначенными для регистрации угловых (вертикальных и горизонтальных) и линейных относительных смещений. Геодезические реперы выполнялись в виде металлических труб, заделанных в массив горных пород на глубину 7 ÷ 8 м. К трубам прикреплялись опорные площадки для размещения регистрирующей аппаратуры, светового репера, светового отражателя, угловых квадрантов и других приспособлений, используемых в геодезических измерениях.

Расстояния между реперами и их изменение в результате сейсмозрывного воздействия регистрировались традиционными геодезическими методами (линейные измерения), а также с использованием кварцевых светодальномеров СКД-2 и СКД-8 (дальность регистрации — до 2 км, точность определения расстояния до отражателя на удалении 1 км составляла 4 мм).

Для регистрации наклонов и азимутальных разворотов реперов использовались длиннофокусная высокоскоростная фоторегистрирующая аппаратура типа фоторегистраторов



Рис. 2. Оборудование глубинного геодезического репера:

1 — обсадная труба оголовка скважины под репер;
2 — металлическая труба; 3 — фоторегистраторы ФРД; 4 — площадки для геодезических измерений;
5 — отражатель кварцевого светодальномера

ФРД (фокусное расстояние 3,6 м, угловое разрешение $\approx 1''$) и скоростные кинокамеры РФК-5 (фокусное расстояние 1 м, угловое разрешение $\approx 3''$, покадровый режим съемки), работающие со световыми реперами.

При определении остаточных линейных и угловых смещений проводилось сравнение с результатами теодолитных измерений.

Измерение остаточных наклонов блоков выполнялось в подземных выработках на разных расстояниях от взрыва. Регистрация абсолютных наклонов до и после проведения взрыва проводилась с помощью оптических угловых квадрантов КО-10 (точность измерения углов $5''$) и электролитических наклономеров ЭНЖ. Здесь необходимо отметить, что поскольку наиболее существенные особенности деформирования среды блочного строения связаны с возможностью независимых перемещений отдельных структурных элементов, величину угловых деформаций следует рассматривать в качестве наиболее информативного параметра с точки зрения формирования представлений о поведении структурированной сре-

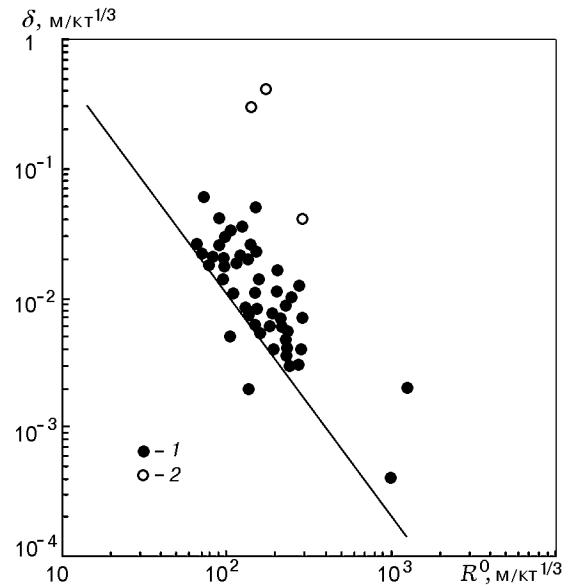


Рис. 3. Относительное смещение (δ) берегов тектонических разломов при подземных ядерных взрывах в штольнях:

1 — непосредственные измерения; 2 — оценки по искривлению рельсовых путей на участках штолен, характеризующихся высокой нарушенностью горных пород

ды в целом.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ НА НАРУШЕНИЯХ СПЛОШНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Относительные линейные подвижки структурных блоков геологической среды хорошо описываются изменением ширины структурных нарушений в результате взрывного воздействия. На рис. 3 приведены данные по относительному смещению берегов тектонических нарушений, зарегистрированных при сейсмозрывных воздействиях в широком диапазоне амплитуд (на рисунке δ — модуль относительного смещения, поскольку взрывное воздействие приводит как к сближению, так и к удалению соседних блоков).

Следует отметить, что линейное дифференциальное смещение на границах блоков весьма значительно и существенно превышает смещение в волне сжатия. Это означает, что смещение среды в волне сжатия немонотонно: малые деформации в пределах блоков чередуются со значительно большими деформациями среды на межблоковых промежутках. Сравнение результатов деформометрических изме-

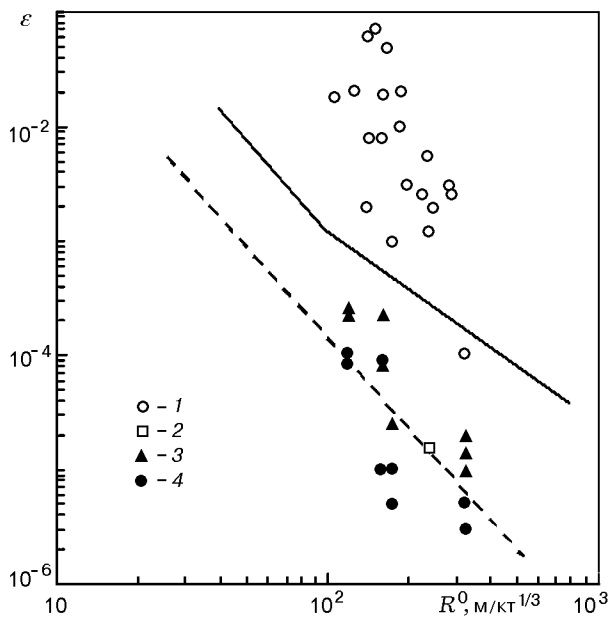


Рис. 4. Результаты измерений относительных деформаций среды при измерениях длиннобазовыми деформографами на тектонических нарушениях (1) и в ненарушенном блоке (2), на базе 1 м (3) и 5 мм (4):

сплошная и штриховая линии — соответственно максимальная и остаточная деформация среды во взрывной волне сжатия

рений, выполненных непосредственно на разрывных нарушениях и на участках среды, характеризующихся слабой нарушенностью горных пород (блоки), свидетельствует (рис. 4), что результаты измерений деформации на малых базах либо с использованием длиннобазового деформографа, расположенного на ненарушенном участке массива горных пород, с хорошей точностью совпадают с оценкой остаточных деформаций по волне сжатия. Деформация массива, установленная с помощью длиннобазовых измерений на нарушенных участках массива либо на участках, включающих тектоническое нарушение, существенно превышает не только остаточные, но и максимальные деформации в волне сжатия. Как это следует из рис. 4, дифференциальные движения блоков значительно выше прогнозируемых смещений, вызываемых волной сжатия взрыва, и могут представлять в отдельных случаях серьезную опасность для целостности подземных сооружений и конструкций.

Более детальные исследования [4] свидетельствуют о том, что локальные разруше-

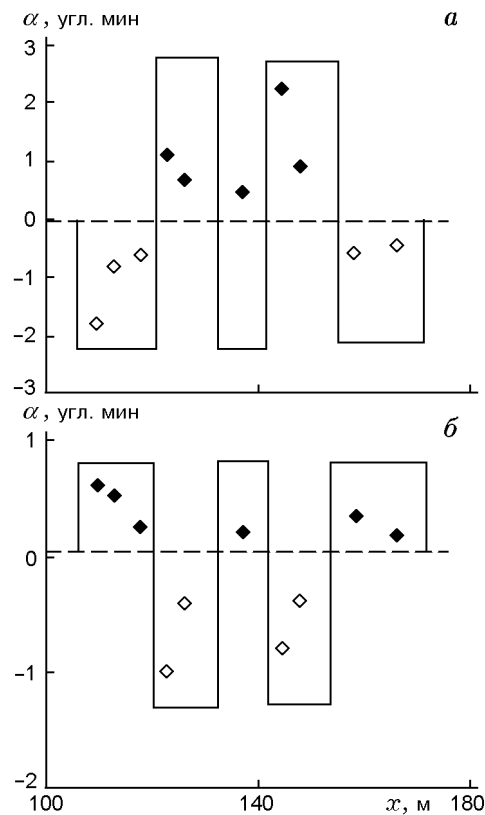


Рис. 5. Остаточный наклон стенки штольни вдоль (а) и перпендикулярно (б) оси выработки при подземном взрыве 18.10.1984:

темные и светлые точки — наклоны разного знака

ния блочного массива горных пород при крупномасштабных взрывах могут происходить на относительных расстояниях $R^0 = R/M^{1/3}$ до 1 000 м/кт^{1/3}.

НЕЗАВИСИМЫЕ УГЛОВЫЕ СМЕЩЕНИЯ БЛОКОВ

Параметры угловых движений блоков в подземных условиях определялись на основе регистрации наклонов стенки выработки. Результаты измерения остаточных наклонов блоковых структур при взрывах разного масштаба свидетельствуют о значительных угловых деформациях структурных блоков в результате взрывного воздействия. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведены остаточные наклоны стенки подземной выработки в одном из экспериментов (взрыв 18.10.1984 [7]) в зависимости от расстояния до взрывного источника.

Из рис. 5 хорошо видно, что взрывное воздействие привело к заметным поворотам

структурных блоков как в плоскости, перпендикулярной оси выработки, так и вдоль штольни. Обращаясь к экспериментальным данным, следует отметить, что характер изменения наклона стенки выработки по мере удаления от центра взрыва немонокотонен: наблюдается чередование областей, характеризующихся противоположными по направлению наклонами стенки выработки. Отмеченную особенность следует интерпретировать как квазинеzависимое движение структурных элементов, слагающих горный массив. Рассматривая совместно данные по угловым наклонам стенки штольни в двух направлениях и полагая, что соседние пункты наблюдений, в которых зарегистрированы остаточные повороты одного знака, принадлежат к одному и тому же структурному блоку, можно в первом приближении оценивать размеры независимо деформирующихся блоков. Результаты таких оценок приведены на рис. 5 в виде сплошной ломаной линии. Более детальный анализ показывает, что угол поворота каждого из блоков изменяется вдоль его грани, что соответствует представлениям о деформировании блоков в стесненных условиях. С использованием представлений моментной теории упругости легко получить [5] пригодную для оценок зависимость величины остаточного поворота блока $\omega(x)$ размером L_i в стесненных условиях от параметров волны сжатия ($v(x)$ — максимальной массовой скорости и τ — длительности положительной фазы волны) в виде

$$|\omega(x_i)| = \frac{4v(x_i)\tau}{\pi L_i^2}(L_i - x), \quad (1)$$

где x — расстояние вдоль штольни, отсчитываемое от координаты x_i , ближайшей к точке взрыва грани блока ($x_i < x < L_i$).

Зависимость (1) позволяет устанавливать величину стесненного поворота грани конкретного блока, если известны его размеры, и, наоборот, по дискретным измерениям угла поворота граней (наклонов) блоков определять линейные размеры и расположение последних (координаты граней).

Результаты обработки экспериментальных данных с помощью модели стесненного поворота (1) представлены для взрыва 18.10.1984 на рис. 6. Сравнение результатов расчетных оценок с данными эксперимента показывает их хорошую сходимость. Из рис. 6 следует, что на одинаковых расстояниях от взрыва наклон

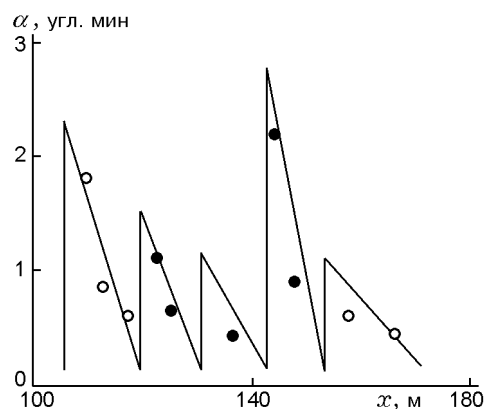


Рис. 6. Модуль остаточных наклонов стенки штольни согласно модели стесненного поворота [4]:

точки — результаты измерений, сплошные линии — модель (1)

блоков меньшего линейного размера больше. Это объясняет существенную немонокотонность максимальных углов поворота стенки выработки по мере увеличения расстояния от взрыва (напомним, что амплитуды практически всех параметров взрывного воздействия убывают с расстоянием монотонно). Угловые деформации, определяемые не только амплитудой взрывного воздействия, но также размером блока и характеристиками межблоковых промежутков, могут вести себя немонокотонно. Это приводит к тому, что на значительных расстояниях от взрыва могут наблюдаться большие по амплитуде наклоны (и соответственно дифференциальные смещения блоков). Такие anomalно большие стесненные повороты и определяют, в конечном счете, размер зоны локальных необратимых проявлений подземного ядерного взрыва [4], который, как уже указывалось, составляет $1000 \text{ м/кт}^{1/3}$.

Результаты обработки экспериментальных данных позволяют оценить положение межблоковых границ (точки, в которых наклоны стремятся к нулевому значению) и, таким образом, установить размеры независимо движущихся структурных элементов. Особо следует отметить, что полученные с помощью расчетной модели данные вполне удовлетворительно согласуются с результатами подробно инженерно-геологического обследования выработок.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ

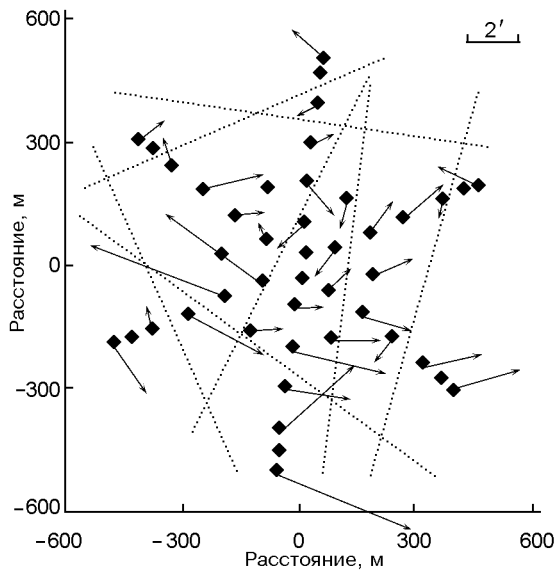


Рис. 7. Векторная диаграмма наклонов геодезических реперов на площадке № 1 при взрыве 12.10.1980 (точки — положение реперов)

Используя результаты инструментальных наблюдений, выполненных на нескольких реперных полях, удастся определить характер движения блоков, составляющих массив скальных пород, при взрывных воздействиях разной амплитуды. Блочное строение массива проявляется разным направлением наклонов глубинных геодезических реперов, а также величиной горизонтальных и вертикальных относительных смещений. Отметим, что получаемые данные имеют сложный для анализа характер (в качестве примера на рис. 7 приведена векторная диаграмма наклонов геодезических реперов на одном из участков). Совместное же рассмотрение всех перечисленных характеристик движения реперов (с учетом градиентов и знаков угловых и линейных движений) позволяет определить с достаточной для практических целей точностью положение межблоковых границ, размеры активных блоков и амплитуду дифференциальных подвижек в блоковых ансамблях в зависимости от амплитуды внешнего воздействия (результаты такого анализа приведены на рис. 7 пунктирными линиями, соответствующими наиболее вероятным межблоковым границам).

Одним из важных вопросов при рассмотрении движения конкретных блоковых структур в условиях внешних динамических воздействий является определение линейных разме-

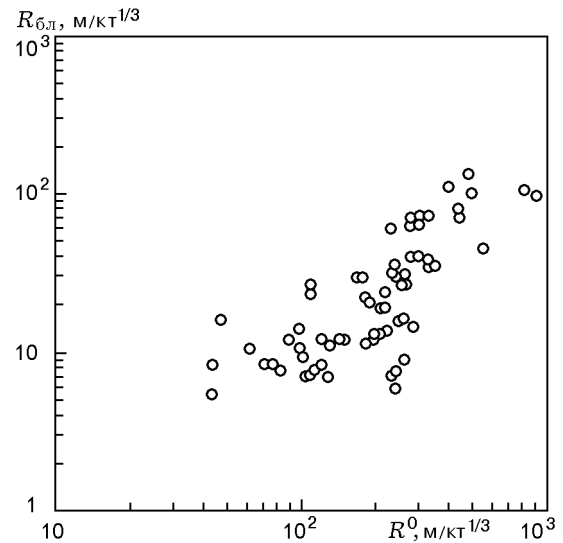


Рис. 8. Относительный размер блоков, активизированных подземным ядерным взрывом

ров активных блоков. Анализ экспериментального материала, полученного при взрывах в штольнях и скважинах Семипалатинского полигона, а также выполненные Г. Г. Кочаряном теоретические расчеты показывают [4], что по мере снижения амплитуды взрывного воздействия (с увеличением расстояния от взрыва) размер активно проявляющихся блоков увеличивается. На рис. 8 приведены относительные размеры блоков, сдвигаемых взрывной волной сжатия в зависимости от относительного расстояния до места взрыва (совместные данные по ядерным взрывам СССР и США).

Для более точных оценок дифференциальных линейных смещений блоков были организованы специальные наблюдения на реперном поле, расположенном в зоне влияния глубинного Калба-Чингизского тектонического разлома (в этом случае структурные блоки обладают большей подвижностью). Положение указанного реперного поля относительно тектонического разлома показано на рис. 1.

Измерения характеристик движения блоковых структур выполнялись по всей сети реперов за двое суток до сейсмозрывного воздействия. Повторные измерения проводились на следующие сутки после взрывного воздействия, а контрольные — спустя 1 ÷ 2 мес после сейсмозрывного воздействия. При этом наиболее удаленные от разлома реперы использовались в качестве базовых при оценке достовер-

ности методики. Все расстояния между каждой парой реперов измерялись дважды (менялось расположение активного излучателя и отражателя). Результаты контрольных измерений с хорошей точностью совпали с измерениями, выполненными непосредственно после сейсмозрывного воздействия, что указывает на существенно необратимый характер подвижки блочной структуры в результате единичного возмущения.

Анализ данных, полученных на реперной площадке, свидетельствует о сложной картине изменения расстояний между реперами. При этом отмечается значительное рассогласование между взаимными перемещениями удаленных друг от друга реперов и реперов, размещенных на линии измерений. Это связано с тем, что на реперной площадке трассы дальномерных измерений пересекают, как правило, несколько удаленных друг от друга межблоковых структур, которые определяются по результатам только дальномерных измерений.

Кажущуюся несогласованность между отдельными измерениями можно объяснить только знакопеременным характером дифференциальных движений, когда взаимное перемещение структурных элементов D , удаленных друг от друга, определяется вдоль трассы измерений суперпозицией изменений промежутков между структурными элементами, т. е. справедливо соотношение

$$D = \sum_{i=1}^{i=N} a_i d_i,$$

где N — количество межблоковых промежутков, расположенных между исследуемыми реперами; d_i — изменение ширины межблоковых промежутков, расположенных вдоль трассы дальномерных измерений; параметр $a_i = \pm 1$ определяет знак изменения ширины промежутка.

Детальный анализ показал, что хорошее согласие между результатами измерений, выполненных в разных экспериментах, и фиксированным расположением межблоковых границ достигается при условии $d_i = d = \text{const}$. При этом величина d мало изменяется в зависимости от амплитуды сейсмозрывного воздействия, что вполне согласуется с представлениями о цикличности поведения областей нарушения массивов горных пород при повторных динамических воздействиях.

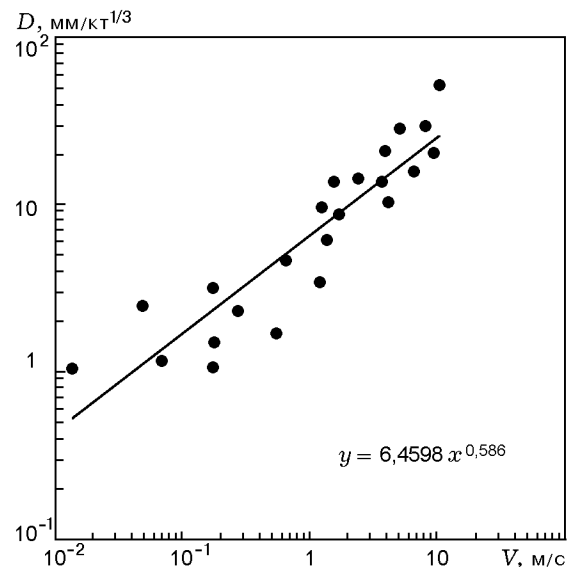


Рис. 9. Относительное дифференциальное смещение блоков при сейсмозрывных воздействиях с разной амплитудой скорости смещения

Сводные данные по всем реперным площадкам, приведенные на рис. 9, свидетельствуют о значительных дифференциальных движениях в геологической среде при крупномасштабных сейсмозрывных воздействиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложное строение реальной геологической среды подтверждается движениями ее блоковых структур при сейсмозрывных воздействиях. Инструментальные наблюдения, проведенные при подземных ядерных взрывах, помогают установить общие закономерности движения и деформирования реальной геологической среды блочной структуры при внешних возмущениях. Подземный ядерный взрыв в этом случае выступает в роли искусственного механического источника воздействий, возмущающего реальный массив горных пород в значительном масштабе. Только крупномасштабное воздействие позволяет изучить движение крупных блочных структур как движение некоторой сложноструктурированной механической системы.

Измерения свидетельствуют о необходимости более детального изучения горных массивов при оценке их механической устойчивости, например, с целью обеспечения долговременной безопасной эксплуатации особо ответ-

ственных подземных и наземных сооружений в условиях естественных и техногенных возмущений.

Полученные конкретные значения линейных и угловых абсолютных и дифференциальных смещений блоковых структур при крупномасштабных воздействиях представляют интерес как реперные точки для определения возможных движений блоков при других внешних воздействиях разной природы и разного масштаба.

Изучение движений в реальной геологической среде, вызванных внешними динамическими воздействиями, свидетельствует об их существенно немономтонном характере, что можно объяснить только блочным строением среды и возникновением в структуризованной среде моментов сил, вызывающих стесненный поворот блоков разного иерархического уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Садовский М. А.** Прикладная сейсмология последних десятилетий века // Физика Земли. 1992. № 2. С. 10–22.
2. **Адушкин В. В., Спивак А. А.** Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993.
3. **Кочарян Г. Г., Спивак А. А.** Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: Академкнига, 2003.
4. **Адушкин В. В., Спивак А. А.** Особенности деформирования блочной среды при взрыве // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 1990. № 2. С. 46–52.
5. **Спивак А. А.** Дифференциальные движения блочных структур при внешних воздействиях // Геоэкология. 1999. № 1. С. 78–91.
6. **Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А.** О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Физика Земли. 1989. № 9. С. 9.
7. **Ядерные испытания СССР.** Т. 1: Цели, общие характеристики, организация ядерных испытаний. Саров: ВНИИЭФ, 1997.

Поступила в редакцию 13/V 2004 г.
