

УДК 550.834

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

С. Р. ПАЙЛЕВАНЯН

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА
В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Из геофизических методов исследований состояния и свойств горных пород в массиве большое распространение получили сейсмический и сейсмоакустический.

Обладая такими существенными преимуществами как высокая оперативность измерений на участках большой протяженности, малая трудоемкость, возможность исследований без остановки горных работ, эти методы находят все более широкое применение при исследовании состояния и свойств горных пород в сложных условиях подземных выработок.

Существуют два направления применения сейсмоакустики в изучении напряженного состояния массива горных пород [2]:

1. Исследование относительного распределения напряжений в горном массиве.

2. Исследование изменения абсолютных величин напряжений.

Обоснованием применения характеристик упругого поля для определения действующих в массиве напряжений является известная из теории упругости зависимость величин скоростей упругих волн от давления.

Изучение напряженного состояния горных пород в массиве целесообразно начинать с предварительной оценки возможных параметров поля напряжений. В породах кристаллического фундамента и складчатого чехла платформ, как правило, существенно проявляются тектонические силы и горизонтальные сжимающие напряжения, которые могут в несколько раз превосходить вертикальные [3]. В слабометаморфизованных породах тектонические напряжения обычно отсутствуют или проявляются незначительно. Поле напряжений в неметаморфизованных осадочных породах определяется лишь действием гравитационных сил, то есть весом налегающих толщ пород.

В качестве примера комплексного изучения состояния массива рассмотрим результаты визуальных и сейсмоакустических наблюдений на трех объектах исследований, отличающихся друг от друга характером действующих напряжений.

1. *Гарнийская подземная обсерватория.* Подземная геофизическая обсерватория расположена в районе распространения андезитовых туфобрекчий верхнего миоцена (вохчабердская толща). Детальные геологические исследования в этом районе [1] показывают, что андези-

товые туфобрекчии вохчабердской толщи залегают на песчано-глинистых отложениях без каких-либо видимых признаков тектонического несогласия. На рис. 1 приведена блок-диаграмма массива расположения подземной обсерватории по данным инженерно-геофизических исследований. Характерной особенностью массива является наличие пластов полускальных и осадочных пород складчатой структуры с относительно пологими крыльями и сильно сжатыми ядрами.

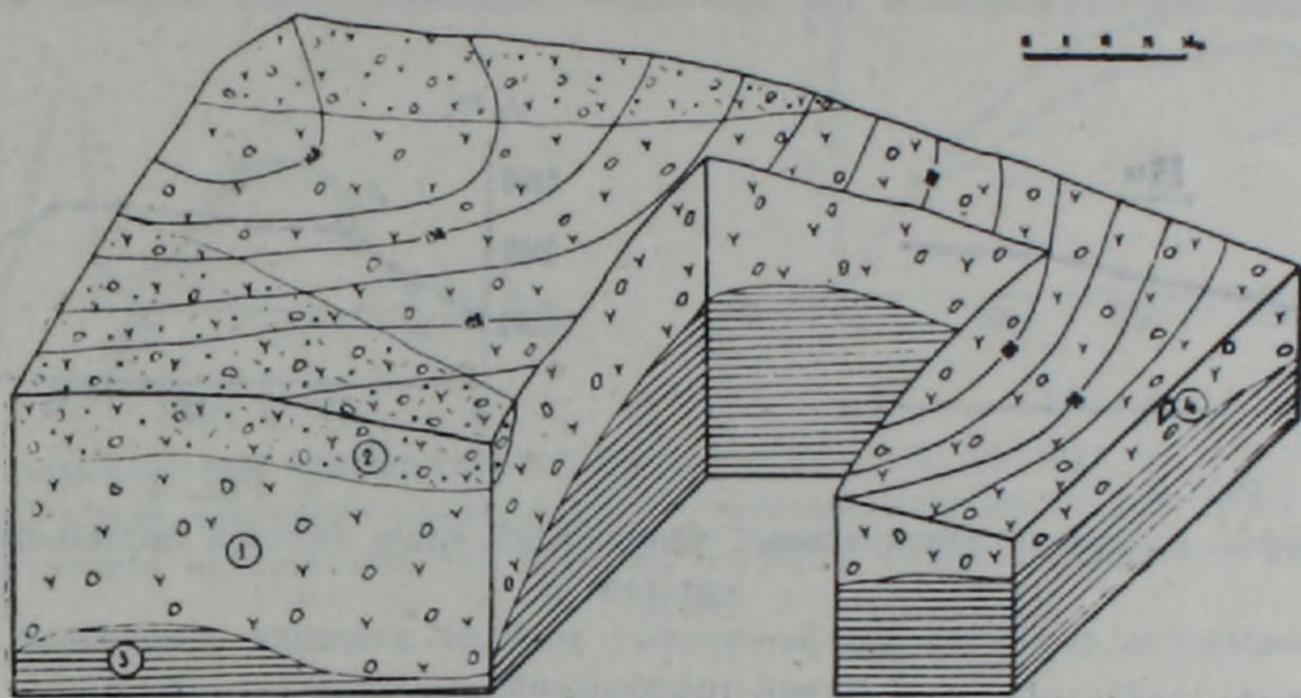


Рис. 1. Блок-диаграмма массива расположения подземной обсерватории. 1—андезитовые туфобрекчии; 2—те же трещиноватые; 3—глины; 4—вход в подземную обсерваторию.

Геоморфологическое строение и рельеф местности позволяют предопределить характер действующих в массиве напряжений. Так как участок расположения подземной обсерватории находится значительно выше местных базисов эрозии, действующие в массиве напряжения будут обусловлены в основном действием гравитационных сил [3]. К аналогичным заключениям приводят также результаты визуальных наблюдений за естественной трещиноватостью вдоль стенок и кровли, различно ориентированных в плане подземных галерей обсерватории.

Предварительная оценка характера действующих напряжений обусловила ход дальнейших изыскательских работ. Было установлено, что в среднем объёмный вес андезитовых туфобрекчий, слагающих массив, составляет около $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Абсолютные вариации величины объёмного веса составляют $\sim 3\%$ от ее среднего. После дальнейшего уточнения линии рельефа по оси трассы подземной галереи были рассчитаны величины вертикальных напряжений через трёхметровый интервал по формуле [2]:

$$\Sigma_H = \gamma \cdot H,$$

где γ —объёмный вес породы, H —глубина от поверхности земли.

График изменения расчетных величин напряжений вдоль основной галереи приведен на рис. 2.

Следующим этапом исследований являются непрерывные сейсмические зондирования по различно ориентированным в плане галереям подземной обсерватории.

Сейсморазведочные исследования проводились методом преломленных волн со встречными и нагоняющими системами наблюдений. На сейсмограммах прослеживались в основном продольные преломленные волны, образующиеся на контакте неизмененных пород. Сейсмо-

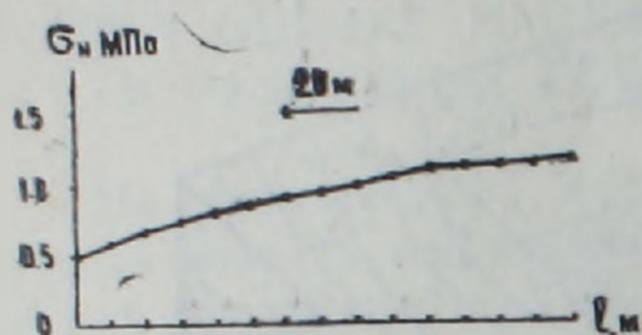


Рис. 2

Рис. 2. График изменений вертикальных напряжений вдоль галерей подземной обсерватории.

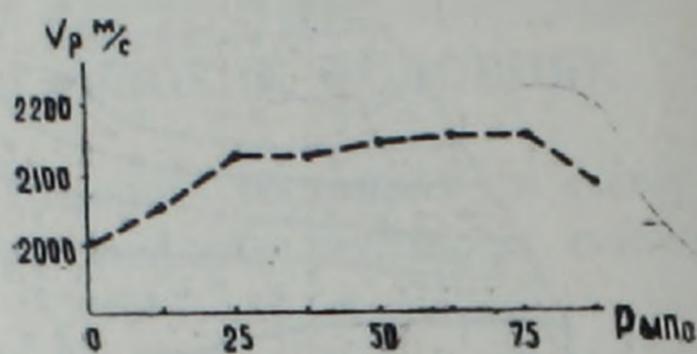


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость скоростей ультразвуковых волн от давления в образцах андезитовых туфобрекчий.

зондирование вдоль различно ориентированных галерей обсерватории позволило получить полярную диаграмму скоростей в плане для изучаемого горизонта.

С целью выявления корреляционной зависимости между величинами скоростей продольных волн и действующих напряжений были проведены лабораторные ультразвуковые исследования на образцах андезитовых туфобрекчий под давлением. Измерения скоростей упругих волн производились под плавно меняющейся нагрузкой, величина которой достигала значений, превосходящих предел прочности андезитовых туфобрекчий. Это позволило помимо определения величины предела прочности на сжатие также контролировать процесс трещинообразования в образце. График изменения скоростей продольных ультразвуковых волн от давления приведен на рис. 3.

Прирост скорости продольных волн в образцах при одноосном их нагружении составляет около 10%. Величина предела прочности андезитовых туфобрекчий была оценена около 90 ($\pm 6\%$) МПа. Значения скоростей упругих волн в двух взаимно перпендикулярных направлениях составляют 2100 ($\pm 2\%$) м/с и 2000 ($\pm 2\%$) м/с. При этом скоростная анизотропия в образцах не превышает 5%. Результаты лабораторных и натуральных определений значений скоростей в андезитовых туфобрекчиях приведены в виде вариационных кривых на рис. 4.

Из приведенных графиков видно, что скорости в массиве превышают скорости в образцах в среднем на 16% в том случае, когда при лабораторных испытаниях максимальный прирост скоростей в образцах при их нагружении вплоть до разрушающих напряжений составил всего лишь 10% от величин скоростей при нормальном давлении. С целью выяснения возможных причин полученных расхождений лабораторные испытания повторялись. Сначала проводились измерения

скоростей продольных волн в разных диапазонах частот (от 25 кГц до 150 кГц) при одноосном сжатии образцов.

Установлено, что существует расхождение значений скоростей в зависимости от частоты, которая составляет около 3%. В связи с этим был сделан вывод, что натурные условия в образцах не соблюдены, и в лабораторных испытаниях имеет место масштабный эффект. Далее

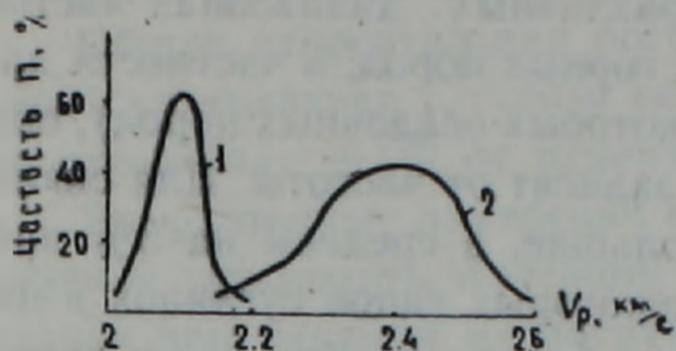


Рис. 4

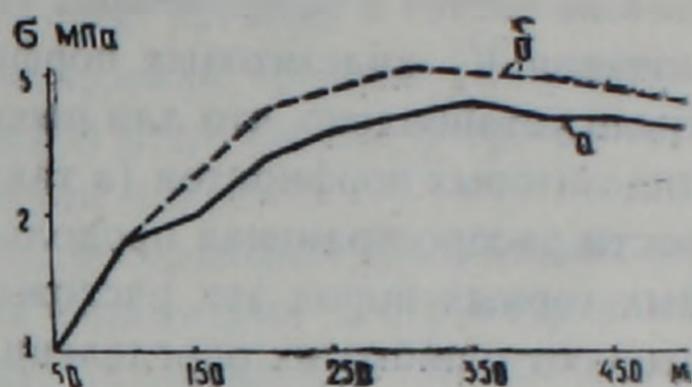


Рис. 5

Рис. 4. Вариационные кривые скоростей упругих волн на образцах (1) и в массиве (2).
Рис. 5. Графики изменения напряжений: а—обусловленное весом вышележащих пород; б—действующие напряжения, рассчитанные с учетом изменений скоростей сейсмических волн.

эти же образцы подверглись всестороннему сжатию. При этом величина предела прочности на всестороннее сжатие на 40% превышала значения предела прочности на одноосное сжатие и составила около $(125 \pm 5\%)$ МПа. Это указывает на то обстоятельство, что при лабораторных испытаниях сказывается отсутствие влияния всестороннего давления, которое, видимо, усиливает эффект прироста скорости с увеличением давления.

Сравнение расчетных величин скоростей, полученных в различно ориентированных выработках обсерватории, указывает на отсутствие скоростной анизотропии на данном горизонте. Этот факт подтверждает наши предположения о гидростатическом распределении напряжений в массиве.

2. *Севанский автодорожный туннель.* Трасса Севанского автодорожного туннеля расположена в районе распространения андезитовых порфиритов и пересекается сериями тектонических трещин, которые в итоге составляют довольно широкую зону тектонического дробления.

Для предварительной оценки величины действующих в массиве напряжений с учетом плотностных свойств андезитовых порфиритов ($\gamma = 2,66$ т/м³) был проведен расчет величины вертикальных напряжений, график которого приведен на рис. 5, а.

С целью изучения состояния массива околывыработочного пространства были проведены подземные сейсмозондирования методом преломленных волн. Преломляющим горизонтом послужила зона неизменных пород, с которой совпадает область концентрации напряжений. Если изменения значений V_p (скоростей продольных волн) в ослабленных породах были связаны с различной степенью их трещиноватости, то в нетронутом массиве их изменения связаны в основном с изменениями действующих напряжений.

Результаты ультразвуковых измерений на образцах андезитовых порфиритов под давлением в пределах напрузок (1÷3) МПа, соответствующих по величине естественным распределениям напряжений (рис. 5), показывают, что значения скоростей продольных ультразвуковых волн отличаются в среднем на 10—15% от V_p , полученной в сейсмическом диапазоне частот в естественных условиях. В этой связи проводились исследования V_p андезитовых порфиритов в различных диапазонах частот. Было установлено, что для неоднородных горных пород, в частности для андезитовых порфиритов (а также для некоторых осадочных пород), скорости распространения продольных волн зависят от частоты. Для скальных горных пород эти расхождения небольшие, в среднем на 3% превышают ошибки их определения, а для некоторых типов суглинков в интервале частот 20÷60 кГц эти расхождения более существенны и достигают 15%. В данном случае разница в величинах скоростей упругих волн лабораторных и натуральных измерений этим не объясняется. Завышенные значения скоростей упругих волн в массиве могут быть обусловлены дополнительными нагрузками, превышающими вес вышележащих пород. Используя результаты лабораторных испытаний образцов под давлением, проводились расчеты действующих напряжений по значениям скоростей прохождения сейсмических волн (рис. 5, б).

Таблица 1

Средние показатели физических свойств пород Ереванского солерудника.

Наименование пород	$\gamma \cdot 10^3$ кг/м ³	$\Sigma_{сж}$ 10 ⁵ Па	Σ_p 10 ⁵ Па	$K_{xp} =$ $= \Sigma_{сж} / \Sigma_p$	E 10 ¹⁰ Па	V_p км/с	V_s км/с	G 10 ¹⁰ Па
Базальт	2,68	1800	130	14	6,41	5,0	2,8	2,38
Глинистый сланец	2,41	350	46	7,61	1,2	1,4	0,9	—
Гипс	2,31	400	—	—	—	2,4	1,4	—
Каменная соль	2,12	260	—	—	2,9	4,0	2,3	1,5

Сравнивая графики *a* и *б* рис. 5, можно качественно оценить величину дополнительных напряжений, обусловленных тектоническими силами. В данном случае величина тектонических напряжений оценена около 300 КПа.

3. Ереванский солерудник. Месторождение каменной соли сверху покрыто различными базальтами плиоцена толщиной 80 м. Ниже базальтов до соленосной свиты чередуются пласты глинистых и горючих сланцев с незначительным содержанием гипса.

Первоочередной задачей при изучении напряженного состояния массива является определение физических свойств пород, слагающих горный массив. В этой связи проводились лабораторные испытания образцов вышеуказанных разновидностей пород, упругие и прочностные свойства которых представлены в таблице 1.

Помимо лабораторных испытаний проводились также натурные исследования. При этом предполагалось, что изучение горного массива с использованием сейсмоакустических методов и тарировочных исследова-

ний по известным методам разгрузки могут привести к упрощенным способам определения упругих и прочностных свойств пород, непосредственно зависящих от состояния горного массива.

Для определения упругих характеристик применялся ультразвуковой импульсный метод в методике прямого прозвучивания. В качестве измерительной аппаратуры использовался помехозащищенный макет прибора УК—11П с цифровым индикатором времени.

Общая относительная погрешность измерения времени распространения ультразвука с учетом систематической и случайной погрешностей не превышала $\pm 1\%$ от измеряемых величин времен.

Высокоточные измерения времени распространения ультразвука позволили установить малейшие изменения уплотнения в структурах образцов при плавном их нагружении. Было установлено, что для образцов из каменной соли существует линейная корреляционная зависимость между скоростью распространения продольных волн и пределом прочности на сжатие, которая описывается уравнением:

$$V_p = (0,26 \Sigma_{сж} + 4050) \text{ м/с.} \quad (1)$$

В уравнении (1) значения $\Sigma_{сж}$ в единицах МПа с пределом применимости

$$4000 \text{ м/с} < V_p < 4500 \text{ м/с.}$$

С целью применения величин скоростей, как показателей прочности, была получена формула, позволяющая по значениям скоростей оценить величину предела прочности на сжатие:

$$\Sigma_{сж} = (35,92 V_p - 145,4) \cdot 10^3 \text{ МПа}; \quad 7,5 \text{ МПа} < \Sigma_{сж} < 1500 \text{ МПа.}$$

Для базальтов, залегающих в верхней части разреза, было получено уравнение зависимости между пределом прочности на сжатие и величиной относительного изменения модуля Юнга:

$$\Sigma_{сж} = f(E/E_0),$$

где E_0 —значения модуля Юнга при давлении 1 атм.

Установлено, что между указанными величинами существует экспоненциальная зависимость, описываемая уравнением в виде:

$$\Sigma_{сж} = (E/E_0)^{7,44} \cdot e^{14,77}. \quad (2)$$

Пределы применимости формулы (2) с коэффициентом корреляции $R(\Sigma; E/E_0) = 0,97$, охватывают напряжения в диапазоне $10 \text{ Па} \div 2 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

Полученные зависимости между упругими (V, E) и прочностными ($\Sigma_{сж}$) характеристиками использовались при оценке напряженного состояния на различных горизонтах солерудника. Установлено, что на горизонте 275 м ниже поверхности земли распределение напряжений геостатическое. Действующие напряжения достигают величины 70,3 КПа. На более глубоких горизонтах значения напряжений превосходят величину геостатического давления. Визуальные наблюдения за состоянием стенок и кровли различно ориентированных выработок показывают, что в

юго-восточном направлении наблюдается преимущественное разрушение стенок. При этом индикатором послужили глинистые прослойки, различная степень нарушения которых указывает направление главных напряжений. Было сделано предположение о наличии, наряду с гравитационными силами, больших по величине тектопических сил, действующих в близгоризонтальном направлении.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики и инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР

Поступила 7. XII. 1982.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Асланян А. Т. Региональная геология Армении. Айпетрат, Ереван, 1958.
2. Савич А. И., Коптев В. И. и др., Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. Недра, М., 1969.
3. Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах. Наука, Л., 1978.