

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/292144326>

Nature of intracrustal subhorizontal seismic boundaries (an interpretation of results obtained from the Kola superdeep drillhole)

Article in *Doklady Earth Sciences* · September 1987

CITATIONS

0

READS

18

6 authors, including:



M. V. Mints

Geological Institute of the Russian Academy Sciences, M...

161 PUBLICATIONS **693 CITATIONS**

[SEE PROFILE](#)



Vladimir Lyakhovsky

Geological Survey of Israel

154 PUBLICATIONS **3,965 CITATIONS**

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project

Crustal structure of Southeastern Fennoscandian Shield: evidences from new geophysical data over Lake Ladoga conductivity Anomaly area [View project](#)

Project

Crust-mantle boundary, lower and middle crust of Early Precambrian tectonic provinces in basement of the East European, North American and Australian platforms: classification, age and geodynamics of emergence and transformation (RFBR-15-05-01214) [View project](#)

**ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР**

1987

ТОМ 296 № 1

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

Таким образом, расчеты камуфлентных взрывов в сильно проницаемых пористых средах (начальная пористость ~ 40%) при учете утечки продуктов детонации из полости и их теплообмена с частицами породы, а также дилатационного разрыхления разрушенной среды согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в [2]. Дальнейшее уточнение расчетной модели (учет переменной дилатации, влагонасыщенности среды, зависимости частиц раздробленной среды от расстояния и т.д.) позволит более обстоятельно выяснить роль каждого фактора динамической стадии камуфлентного взрыва.

Авторы признательны В.Н. Николаевскому за полезное обсуждение работы.

Московский инженерно-физический институт

Поступило
15 V 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.М., Шацкевич А.Ф. — ФГВ, 1979, т. 15, № 4, с. 126–131.
2. Куликов В.И., Шацкевич А.Ф. — ФГВ, 1971, т. 7, № 3, с. 441–446.
3. Кузнецов В.М., Шацкевич А.Ф. — ФГВ, 1977, т. 13, № 6, с. 733–737.
4. Николаевский В.Н. В сб.: Динамика многофазных сред, 1983, Новосибирск, с. 33–41.
5. Николаевский В.Н. — ПММ, 1971, т. 35, вып. 6, с. 1070–1082.
6. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1976, т. 1. 536 с.
8. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
9. Ergin S. — Chem. Eng. Progr., 1952, vol. 48, № 2, p. 89–94.
10. Габбасов М.Н., Колобашкин В.М., Кудряшов Н.А. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, № 2, с. 80–86.
11. Гордеев Ю.Н., Колобашкин В.М., Кудряшов Н.А. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1985, № 1, с. 183–186.
12. Кузнецов В.М., Кузнецов Н.М., Шацкевич А.Ф. — ФГВ, 1982, т. 18, № 1, с. 120–124.
13. Колобашкин В.М., Кудряшов Н.А., Мурзенко В.В. — ФГВ, 1985, т. 21, № 6, с. 126–131.
14. Артышев С.Г., Дуних С.Э., Ловецкий Е.Е. — ПМТФ, 1980, № 1, с. 141–145.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.

УДК 622.241(470.21) + 550.834

ГЕОФИЗИКА

М.В. МИНЦ, Н.И. КОЛПАКОВ, В.С. ЛАНЕВ,
М.С. РУСАНОВ, В.А. ЛЯХОВСКИЙ, В.П. МЯСНИКОВ

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ВНУТРИКОРОВЫХ СУБГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГРАНИЦ (ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ БУРЕНИЯ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ)

(Представлено академиком В.А. Магницким 5 III 1986)

Одной из фундаментальных проблем глубинной геологии, на решение которой направлено сверхглубокое бурение, является выяснение природы внутрикоровых субгоризонтальных (пологих) сейсмических границ. В районе бурения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) в пределах Печенгской вулканогенно-тектонической депрессии и ее обрамления отчетливо выделяющаяся пологая граница фиксируется сейсморазведкой (ГСЗ) на глубине 7–8 км с граничной скоростью продольных волн $V_p=6,4–6,6$ км/с (рис. 1). Эту границу, отождествляемую с опорной сейсмической поверхностью Кограда, до бурения СГ-3 было принято увязывать с кровлей "базальтового" слоя. СГ-3 пересекла эту границу и на 4–5 км углубилась в "базальтовый" слой, впервые предоставив исследователям уникальную возможность экспериментального изучения пород.

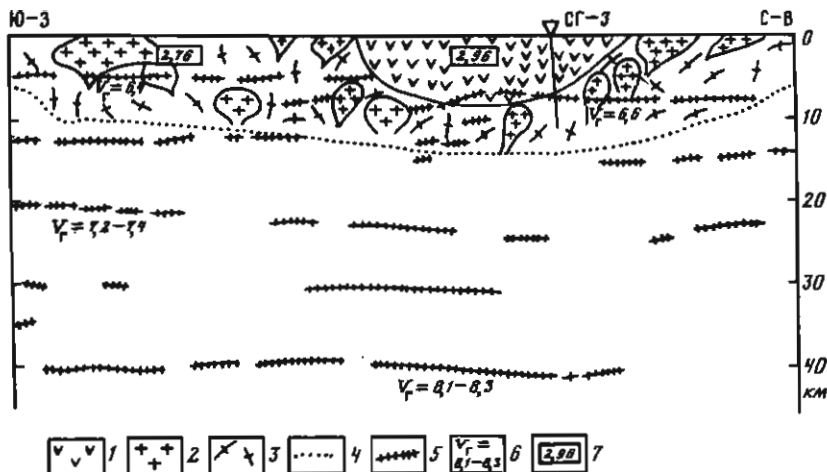


Рис. 1. Геологический разрез через СГ-3 и данные ГСЗ. 1 – metabазиты печенгского комплекса; 2 – гранитоиды и мигматиты, формирующие купола; 3 – гнейсо-амфиболито-мигматитовый комплекс; 4 – нижняя граница разуплотненных, интенсивно мигматизированных и гранитизированных пород; 5 – сейсмические границы; 6 – граничные скорости, км/с; 7 – средние плотности, г/см³

Профильными ГСЗ в районе Кольской сверхглубокой скважины установлена связь между величиной граничной скорости и составом пород, обнажающихся вдоль профиля: под комплексами пород с более высокой плотностью границе отвечают более высокие V_p [2, 5]. Глубинные сейсмические границы располагаются на относительно больших глубинах ("прогнуты") в тех частях профиля, где на большую глубину распространены низкоплотные мигматиты и гранитоиды, и на меньших ("подняты") – там, где близ поверхности преобладают более плотные образования (метабазиты). Аналогичные закономерности характерны и для других регионов. Более детальные данные, полученные по профилю МОВ (рис. 2), свидетельствуют о наличии многочисленных полого располагающихся отражающих площадок, которые в районе Печенгской депрессии начинают фиксироваться на глубинах 4,5–5 км. В районе преломляющей границы ГСЗ (7–8 км) они группируются, образуя зону ступенчатости в интервале глубин 6–9 км [3, 7]. Наблюдаемые на разрезах случаи прямого пересечения на глубине крутопадающих и пологих сейсмических границ указывают на наложенный характер последних [2, 7].

Сопоставление результатов исследования скоростных характеристик горных пород по данным лабораторных исследований образцов керна, АК и ВСП позволяет предположить, что, начиная с некоторой глубины, фактором, определяющим их изменение с глубиной, становится напряженное состояние пород. Последнее, в свою очередь, изменяется в зависимости от нагрузки вышележащих толщ, температур и насыщенности флюидами на соответствующих глубинах, тектонических напряжений и других причин. Трудности аналитической оценки напряженного состояния земных недр определяются сложностью учета многообразных факторов. Поэтому особый интерес представляет возможность непосредственной или хотя бы косвенной экспериментальной оценки напряженного состояния горных пород в массиве. Попыткой прямой оценки является проведенное при бурении СГ-3 натурное измерение вертикальной составляющей тензора напряжений P_z [4] (рис. 2). Однако полученные данные дают лишь частичную информацию о пространственном распределении параметров сложно-напряженного состояния пробуренного массива. Для косвенной

характеристики объемного напряженного состояния использованы результаты измерений физических свойств образцов керна, фиксирующих явление декомпрессионного эффекта, и данные об устойчивости стенок ствола скважины. Кривые изменения соответствующих параметров свидетельствуют о постепенно-скачкообразном изменении напряжений с глубиной (рис. 2). Фиксирующиеся градиентными зонами аномальные значения этих параметров в 2–5 раз превышают уровни, отвечающие их плавному возрастанию. Наиболее четкие градиенты фиксируются на глубинах 4,5 и 6,0–6,8 км, практически совпадающих с глубиной появления первых субгоризонтальных сейсмических площадок и началом их сгущения.

К числу геологических факторов, от которых зависит устойчивость стенок скважины, относятся прочностные характеристики пород, их структурно-текстурные признаки, трещиноватость, гравитационные и тектонические напряжения. Тектонические напряжения, обычно рассматриваемые как горизонтальные, нередко значительно превосходят гравитационные. Например, на Кольском полуострове в пределах Хибинского и Ловозерского массивов установлены избыточные горизонтальные напряжения, в несколько раз превышающие вертикальную компоненту на глубинах до 1 км [10].

Резкому расширению ствола скважины в интервале глубин 7200–8500 м отвечает пересечение скважиной зоны сгущения отражающих площадок МОВ (рис. 2). Для этого интервала характерно резкое изменение гидрогеологической и гидрохимической обстановки: ниже 7050 м развиты высокоминерализованные хлоридные кальциевые и кальциево-натриевые воды, находящиеся под очень высоким давлением, которые до глубины 8900 м существенно не изменяются [4].

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают предположение о связи пологой сейсмической границы, пересеченной СГ-3, с особенностями современного напряженного состояния горных пород. Объяснить появление в земной коре отражающих границ и волноводов в связи с особенностями напряженного состояния позволяют некоторые теоретические модели.

Учет влияния трещиноватости и напряженного состояния среды на скорости распространения сейсмических волн возможен в рамках нелинейной модели упругой среды. В [8] для описания поведения упругой среды с микронарушениями зависимость упругой части внутренней энергии U от плотности ρ , инвариантов тензора деформации I_1, I_2 задается в виде

$$U = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\lambda}{2} I_1^2 + \mu I_2 - \nu I_1 \sqrt{I_2} \right),$$

где λ, μ – коэффициенты Ламэ, ν – дополнительный коэффициент, позволяющий учесть влияние трещиноватости среды.

Вопросы распространения упругих волн в среде, описываемой потенциалом U , рассматривались в [13], где показано, что скорости сейсмических волн зависят от напряженного состояния и направления распространения волны.

Результатом длительного действия напряжений являются процессы роста и залечивания микронарушений, приводящие к изменению упругих характеристик среды. В [9] предложены соотношения, устанавливающие связь между изменением величины ν , действующими в среде напряжениями и характерной длиной микротрещин.

На рис. 3 приведено распределение величины ν ($\lambda = \mu = 1$), полученное в результате моделирования на ЭВМ процесса изменения трещиноватости среды, заполняющей прямоугольную область. В верхней части области помещено тяжелое чашеобразное включение (относительное изменение плотности 0,2). Силы на границе

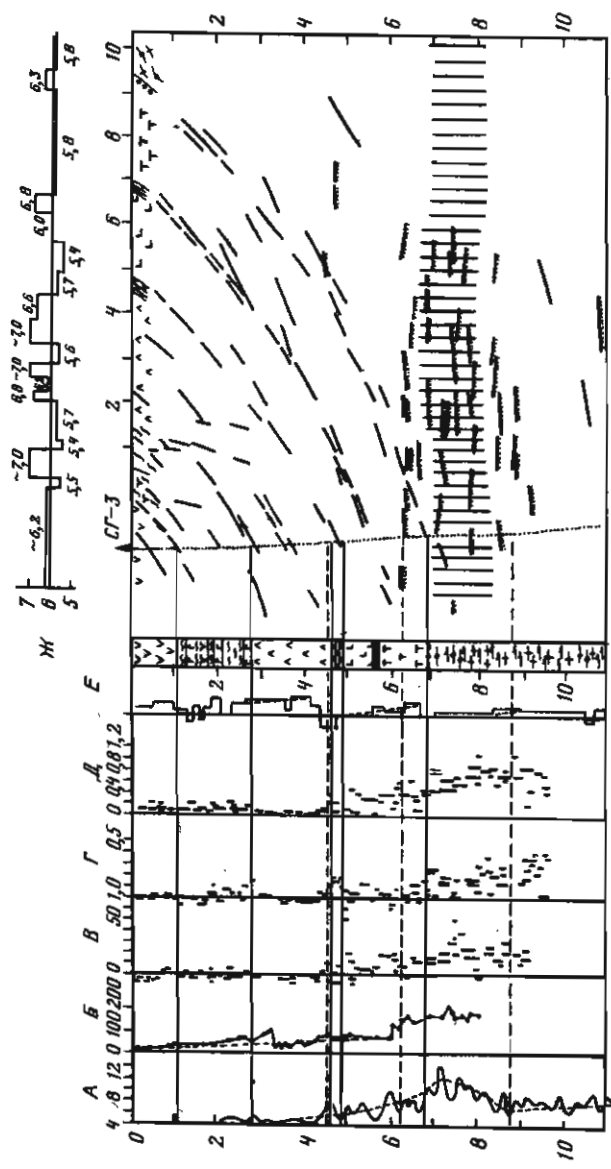


Рис. 2. Сопоставление данных сейсморазведки, свойств и напряженного состояния горных пород по СТ-3. 1-11 - геологические данные. Район протерозойский пещенский комплекс: 1 - метадиабазы IV покрова, 2 - туфогенно-осадочная "продуктивная" толща - IV осадочный горизонт, 3 - интрузия габбро-диабазов, 4 - интрузия габбро-верлитов, 5 - метадиабазы III покрова, 6 - III осадочный горизонт, 7 - метадиабазы, метаандезиты II покрова, 8 - II осадочный горизонт, 9 - метавезинто-базальты I покрова, 10 - I осадочный горизонт; 11 - архейский комплекс: а - гнейсы, б - амфиболиты, в - мигматиты и гранитоиды. 12-13 - данные сейсморазведки. 12 - отражающие элементы: а - наклонные, б - субгоризонтальные; 13 - интервал глубин залегания преломляющей границы с $V_T = 6,5-6,6$ км/с с учетом точности построения по МОВ. 14 - среденные линии физических параметров (А - объем скважины, м³/100 п.м.; Б - вертикальная составляющая тензора напряжений, МПа [3]); В - приращение скорости продольных волн при влагонасыщении образцов $\frac{\Delta V_p}{V_p} = \frac{V_{\text{сух}}}{V_p} - \frac{V_{\text{вод}}}{V_p}$, %; Г - анизотропия скорости продольных волн по образцам; Д - открытая пористость по керну, %; Е - скорость продольных волн по ВСП, км/с; Ж - скорость продольных волн вдоль профиля МОВ, км/с). 15 - границы зон, аномальных по напряженному состоянию. 16 - Кольская сверхглубокая скважина СТ-3

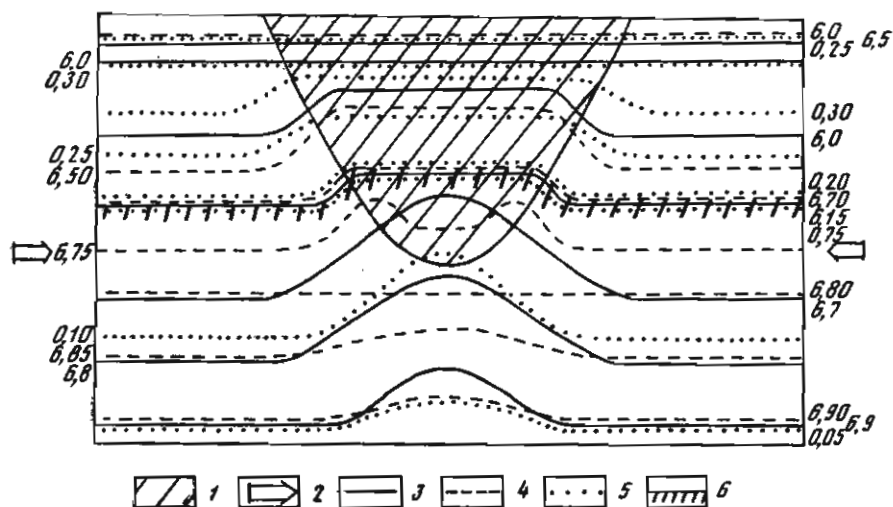


Рис. 3. Результаты модельных расчетов 1 – тяжелое включение; 2 – дополнительное горизонтальное сжатие; 3 – изолинии скоростей объемных волн, распространяющихся в горизонтальном направлении; 4 – изолинии скоростей объемных волн, распространяющихся в вертикальном направлении; 5 – изолинии распределения величины v ; 6 – зона с большим градиентом скорости

задавались в соответствии со следующими условиями: верхняя граница свободная; на нижней границе действуют силы, обеспечивающие условие изостатической компенсации; на боковые границы – гидростатическое сжатие плюс дополнительное сжатие, не зависящее от глубины. Для расчета напряжений использован метод конечных элементов [3]. Нелинейные поправки учитывались с помощью итерационной процедуры. На рис. 3 также показано распределение скоростей сейсмических волн, соответствующее распределению v и вычисленному полю напряжений. Скорость объемных волн, распространяющихся в горизонтальном и вертикальном направлениях, различна. В исследуемой области возникает зона с большим градиентом скорости сейсмических волн, отвечающая модельной сейсмической границе, пересекающей тяжелое включение, причем при подходе к включению глубина границы несколько уменьшается.

Геометрические особенности полученной в результате моделирования сейсмической границы дают основание сопоставлять ее с наблюдаемой границей Конрада в районе бурения Кольской сверхглубокой скважины.

Таким образом, положительный "рельеф" отражающих границ и соответственно границ геофизических "слоев" земной коры в условиях относительно равномерного теплового потока, флюидонасыщенности пород и наличия субгоризонтальных тектонических напряжений, равно как и возрастание при этом граничных скоростей, определяется в первую очередь размещением в верхней части коры выше соответствующих границ положительных гравитирующих масс. Напротив, прогибание границ указывает на относительно разуплотнение вещества в объеме выше этих границ. Уменьшение нагрузки в этом случае сопровождается в целом и уменьшением граничных скоростей. По отношению к району СГ-3 это отвечает расположению плотных метабазитов печенгской серии в верхней части разреза (ему соответствует поднятие границы "Конрада" и возрастание граничных скоростей вдоль этой границы) и указывает на значительную протяженность на глубину (порядка 7–10 км ниже уровня подошвы печенгской серии) разуплотненных пород, преимущественно гра-

нитондов и мигматитов, в соответствии с прогибом ниже расположенных сейсмических границ. Этот вывод согласуется с общегеологическими данными, свидетельствующими о размещении Печенгской депрессии в центральной части крупного сводообразного поднятия, образованного массовым всплыванием мигматит-гранитных куполов протерозойского возраста [11].

Производственное геологическое объединение
по зональному изучению геологического
строения территорий страны
Москва

Поступило
12 XII 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беллевский Н.А.* Земная кора в пределах территории СССР. М.: Недра, 1974. 279 с.
2. Земная кора восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1978. 232 с.
3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
4. Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. 490 с.
5. *Литвиненко И.В.* В сб.: Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1968, с. 90–95.
6. *Литвиненко И.В.* В сб.: Восточная часть Балтийского щита, геология и глубинное строение. Л.: Наука, 1975, с. 151–155.
7. *Литвиненко И.В.* В сб.: Геофизика, XXVII междунар. геол. конгр., секция С08, докл. М.: Наука, 1984, т. 8, с. 9–20.
8. *Ляховский В.А., Мясников В.П.* – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1984, № 10, с. 71–75.
9. *Ляховский В.А., Мясников В.П.* – Там же, 1985, № 4, с. 28–36.
10. *Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 90 с.
11. *Миц М.В., Колпаков Н.И.* – Разв. и охр. недр, 1984, № 10, с. 23–24.
12. *Моисеевко Ф.С.* Основы глубинной геологии. Л.: Наука, 1981. 278 с.
13. *Топалэ В.И.* – Изв. АН МССР. Сер. физ.-техн. и матем. наук, 1985, № 3, с. 53–57.