Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т.XCII, 1982 г.

УДК 550.834

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ПРОСВЕЧИВАНИЯ НА ВУОРИ-ЯРВИНСКОМ МАССИВЕ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД

М.Д.ЛИЗИНСКИЙ

Сейсморазведка в районах развития кристаллических пород зарекомендовала себя как эффективный метод изучения рудоконтролирующих структур. В основном используется метод отраженных волн, с помощью которого структуры изучаются по границам, связанным с контактами пород разного состава и разрывными нарушениями. В последние годы назрела необходимость привлечения сейсмического метода для решения задач непосредственных поисков руд, особенно в тех случаях, когда другие геофизические методы оказываются недостаточно эффективными. Физико-геологической предпосылкой применения сейсморазведки для этой цели является дифференциация рудных объектов от вмещающих пород по скорости упругих волн, причем в большинстве случаев руды характеризуются повышенными значениями скорости.

Эта предпосылка реализуется в методе сейсмического просвечивания, предполагающем изучение скорости упругих волн в массиве горных пород, в пределах которого ведутся поиски рудных объектов. При этом могут использоваться две равноправные модификации расположения источников и приемников упругих колебаний: одни на дневной поверхности, другие - в скважине. В настоящее время разведочные скважины на рудных объектах бурятся преимущественно инструментом малого диаметра, поэтому при исследованиях методом просвечивания источники упругих колебаний (пункты взрыва) удобно располагать на дневной поверхности, а приемники - в скважинах. Повышенная детальность наблюдений может быть обеспечена исследованиями в скважине по методике вертикального сейсмического профилирования (ВСП) из большого числа наземных пунктов взрыва. Пункты взрыва (ПВ) располагают обычно по одному или нескольким прямолинейным профилям, проходящим через устье наблюдательной скважины. Сейсмическое просвечивание с успехом применялось для локализации рудных объектов в Казахстане [4], на Южном Урале [1] и в других регионах.

На Балтийском щите этот метод был опробован в условиях массива центрального типа Вуори-Ярви, сложенного главным образом пироксенитами, кото-

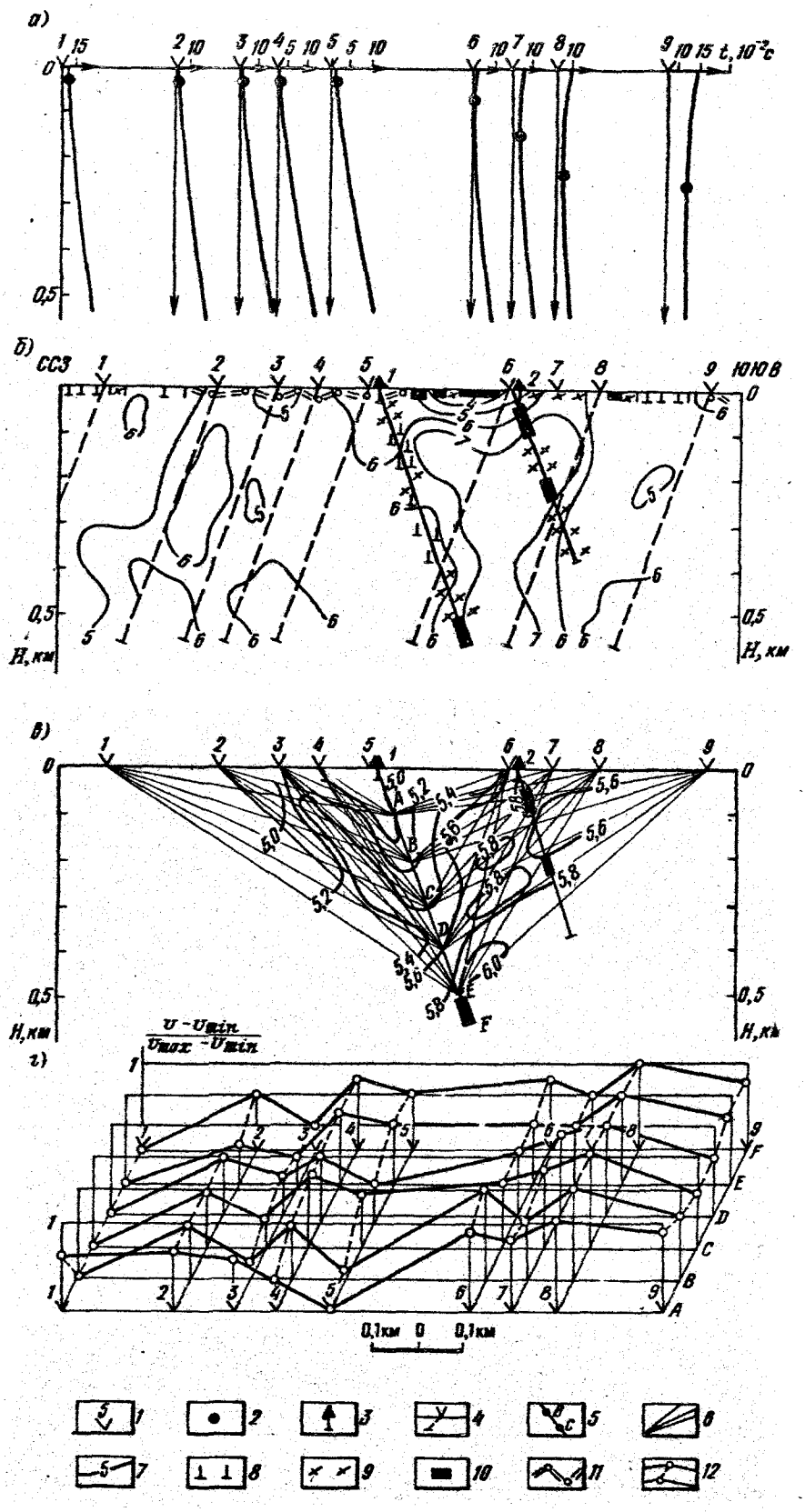
рые на периферии сменяются ийолитами и фенитами. В пределах массива закартировано штокообразное тело карбонатитов размером в поперечнике около 0,5 км. Падение пород крутое (65–80°) в северо-западном направлении. Канавой и скважинами в пределах штока вскрыты апатит-магнетитовые породы, являющиеся объектом поисковых работ.

С целью выявления поисковых возможностей скважинной сейсморазведки были проведены опытные исследования методом просвечивания. Для наблюдений использована скважина I глубиной 0,6 км (см.рисунок), забуренная вне штока навстречу его падению и вскрывшая карбонатиты и апатит-магнетитовые породы. Прямолинейный профиль взрывов проходил через устье этой скважины и имел длину 1,3 км, примерно втрое превышающую видимую мощность штока карбонатитов. В пределах штока располагались ПВ 6–8, ПВ 5 был удален от него на несколько десятков метров, остальные пункты располагались в пределах пироксенитового ядра массива. Наблюдения из всех пунктов взрыва выполнены по методике ВСП с шагом 10 м между сейсмоприемниками.

Избыточная против стандартной методики просвечивания (единичные точки наблюдений в скважине) детальность скважинных наблюдений была принята с целью изучения не только лучевой скорости в среде, как это принято в методе просвечивания но и других особенностей скоростного разреза. Такой подход вполне оправдал себя, так как позволил выявить существенные отличия распределения скорости в пределах штока по сравнению с вмещающими породами.

Скоростной разрез скважины I охарактеризован продольным ВСП из ПВ 5. Как и в других районах Балтийского щита, он слабо дифференцирован. Вертикальный годограф не имеет четко выраженных изломов, поэтому пластовая скорость и границы пластов с постоянной скоростью оцениваются приближенно. Большая часть разреза, представленная пироксенитами с отдельными жилами карбонатитов, характеризуется скоростью около 6,2 км/с. В нижней части ствола (глубже 0,4 км), где скважина пересекает карбонатиты и апатит-магнетитовые породы, скорость увеличивается до 6,8 км/с.

Особенности скоростного разреза карбонатитового штока и вмещающих пироксенитов, которые проявились как в кинематических, так и в динамических свойствах первых волн, выявлены главным образом по непродольным наблюдениям ВСП. Годографы первых волн для всех девяти пунктов взрыва характеризуются своеобразным расположением вертикальной координаты минимума. Для ПВ 6–8, расположенных в пределах штока, характерно существенное увеличение вертикальной координаты минимума годографов при удалении пункта взрыва от скважины. В области минимума наблюдается отчетливое изменение полярности записи первых вступлений. Указанные особенности однозначно свидетельствуют о существенном увеличении скорости [5] до глубины свыше 0,2 км, соответствующей наибольшей вертикальной координате минимума годографа, с градиентом около 3,5 $км^{-1}$. В последующих вступлениях на монтажах сейсмограмм ВСП надежно прослеживаются прямые поперечные волны. Отмеченная для продольных волн закономерность изменения вертикальной координаты минимума годографов полностью справедлива и для поперечных волн. Их скорость увеличивается с глубиной и с тем же градиентом.



Результаты сейсмического просвечивания: а – годографы вступлений; б – разрез в изолиниях истинной скорости через 1 км/с; в – разрез в изолиниях лучевой скорости; г – графики нормированной лучевой скорости для точек $A-F$ скважины 1

1 – пункты взрыва; 2 – координаты минимума годографов; 3 – структурно-поисковые скважины; 4 – условные профили ВСП; 5 – точки наблюдений, использованные для вычисления лучевой скорости; 6 – сейсмические лучи; 7 – изолинии скорости в километрах в секунду; 8 – пироксениты; 9 – карбонатиты; 10 – апатит-магнетитовые породы; 11 – моренные отложения; 12 – графики (сплошные линии) нормированной лучевой скорости и корреляции их (пунктирные линии) для одноименных пунктов взрыва

Сопоставление данных продольного (ПВ 5) и непродольного (ПВ 6-8) ВСП показывает, что в верхней части разреза штока (по меньшей мере до 0,2 км) скорость упругих волн растет с глубиной и глубже 0,4 км достигает 6,8 км/с.

Для вмещающих пород, в отличие от штока карбонатитов, не характерно столь резкое увеличение скорости упругих волн с глубиной. Об этом свидетельствуют те же кинематические и динамические особенности первых волн: минимумы годографов и соответствующее им изменение полярности колебаний практически не углубляются при удалении пункта взрыва от скважины (рисунок, а). В северо-западной части профиля для всех пунктов взрыва минимум годографов располагается на глубине около 30 м. Для ПВ 9 на юго-восточном конце профиля минимум годографа находится на глубине 0,25 км - практически той же, что и для ПВ 8 (0,23 км), расположенного в пределах штока.

Различие вертикальных координат минимума для годографов из ПВ 1-5 и ПВ 9 объясняется особенностями расположения пунктов взрыва и скважины относительно аномального по скоростному разрезу карбонатитового штока. Сейсмические лучи для ПВ 1-5 в верхней части разреза, где находятся минимумы годографов, располагаются только в пределах вмещающих пород, в то время как для ПВ 9 первые волны, по-видимому, существенную часть пути проходят в пределах аномальных по скоростному разрезу карбонатитов. Вместе с тем близость вертикальных координат минимума годографов из ПВ 8 и 9 подтверждает, что юго-западный контакт штока расположен между этими пунктами взрыва и скорее всего ближе к ПВ 8, чем к ПВ 9.

Таким образом, анализ формы годографов первых волн и динамических характеристик их в окрестностях минимумов позволил выявить аномальную особенность скоростного разреза (существенный вертикальный градиент для продольных и поперечных волн) карбонатитового штока по сравнению с вмещающими породами пироксенитового ядра массива. Естественно предположить, что карбонатиты, как и апатит-магнетитовые породы, в большей степени подвергаются процессам физического выветривания, чем вмещающие пироксениты. Наряду с выявлением особенностей скоростного разреза получены дополнительные данные о локализации юго-западного контакта этого штока.

Стандартная методика интерпретации данных сейсмического просвечивания на рудных объектах пока не сформировалась. Исследователи используют различные параметры проходящих волн (время вступлений, кажущуюся и лучевую скорость и т.д.) и по-разному оценивают их информативность. Поскольку нет оснований заранее предпочесть определенную методику, данные просвечивания на массиве Буори-Ярви были обработаны несколькими приемами.

Один из них, предлагаемый С.А.Казарным [3], основан на априорном представлении о зависимости скорости во всем изучаемом объеме среды только от вертикальной координаты. Несмотря на очевидную упрощенность такого предположения, способ обработки позволяет локализовать аномальные по скорости объекты в исследуемом разрезе. Основа интерпретации заключается в использовании принципа взаимности. Непродольный годограф из каждого пункта взрыва заменяется равносильным годографом по условному профилю, проходящему через этот пункт из точки возбуждения, совмещенной с устьем на-

блидательной скважины. Положение условного профиля симметрично реальному профилю относительно вертикальной оси, проходящей через середину расстояния между пунктом взрыва и устьем скважины (рисунок, б).

Полученная система годографов первых волн по условным профилям из общей точки возбуждения, совмещенной с устьем скважины I, использована для построения поля времени, по которому вычислена истинная скорость для изучаемого разреза.

Для оценки кондиционности полученных результатов их можно сопоставить с представленными выше данными сейсмокаротажа скважины I и анализом годографов вступлений непродольного ВСП в пределах карбонатитового штока. Пластовая скорость в верхней части ствола скважины I (около 6,2 км/с) соответствует пересекающим его изолиниям 6 км/с, а в нижней части (6,8 км/с) - изолинии 7 км/с. Градиентный скоростной разрез карбонатитового штока, выявленный по наблюдениям из ПВ 6-8, описывается отчетливым повышением скорости по изолиниям от 4 до 7 км/с в соответствующем интервале глубин (до 0,2 км) и в области разреза, где установлены карбонатиты и апатит-магнетитовые породы. Разрез вне карбонатитового штока представлен изолиниями 5 и 6 км/с, контуры которых не указывают на систематическое увеличение скорости с глубиной. Таким образом, можно считать, что результаты обработки материалов по способу С.А.Назарного соответствуют данным о скоростном разрезе, полученным с помощью традиционных методик.

Другой способ обработки материалов ВСП состоял в вычислении лучевой скорости первых волн с целью представления разреза в изолиниях этого параметра. Лучевая скорость по своему определению (скорость на прямолинейном отрезке между точками возбуждения и приема) есть эффективный, а не физический параметр, поскольку в реальных средах траектории сейсмических лучей отличаются от прямолинейных. Тем не менее этот параметр используется для приближенной характеристики среды по скорости в тех случаях, когда нельзя установить истинные траектории сейсмических лучей. К числу таких случаев можно отнести и метод сейсмического просвечивания.

В соответствии с другими методиками просвечивания (например, межскважинного прозвучивания [2]), исследуемый параметр может быть охарактеризован в точке пересечения лучей по наименьшему значению из вычисленных отдельно для каждого луча. Применительно к лучевой скорости упругих волн такой подход означает, что принятые на разрезе значения параметра являются минимальными из возможных, и полученные локальные повышения скорости объективно характеризуют среду. Согласно изученному ВСП разрезу скважины 1, карбонатиты, содержащие апатит-магнетитовые породы, характеризуются в целом повышенной скоростью упругих волн. В связи с этим можно предполагать, что повышенные значения лучевой скорости указывают на локализацию этих пород.

Для вычисления лучевой скорости в разрезе выбраны лучи, которые соединяют пункты взрыва с точками A-F скважины 1, расположенными на удалении около 0,1 км друг от друга (рисунок, в). Расстояние между этими точками близко к взрывному интервалу наземного профиля. Это обеспечивает достаточное число пересечений сейсмических лучей на плоскости разреза для построения изолиний лучевой скорости.

На полученном разрезе в изолиниях отчетливо выделяется область к юго-востоку от скважины 1 с повышенным значением лучевой скорости (5,8-6,0 км/с). Сопоставление с геологическими данными показывает, что именно в этой области расположены подсечения апатит-магнетитовых пород структурными скважинами 1 и 2, а цепочка локальных максимумов лучевой скорости, оконтуренных изолиниями 5,8 и 6,0 км/с, ориентирована в направлении, совпадающем с падением штока (под углом около 80°). Возможно, что по этой цепочке максимумов лучевой скорости коррелируются подсечения скважинами 2 (верхнее) и 1 (нижнее) апатит-магнетитовых пород. Это означает, что указанная область может представлять интерес как перспективная на поиски соответствующих руд.

Разрезы в изолиниях лучевой и истинной скорости могут быть сопоставлены между собой как результаты различных методик интерпретации одних и тех же исходных материалов. В целом значения лучевой скорости несколько ниже истинной для соответствующих глубин. Это различие объясняется влиянием верхней части разреза с пониженной скоростью, которое трудно учесть без специальных дополнительных исследований. Вместе с тем повышенные значения как лучевой, так и истинной скорости локализуются в одной и той же области разреза, соответствующей карбонатитовому штоку. Согласованность результатов, полученных различными методиками, указывает на приемлемость использования обеих для локализации областей разреза с повышенной скоростью упругих волн в рассматриваемых сейсмогеологических условиях.

Данные вычислений лучевой скорости первых волн между ПВ I-9 и точками $A-F$ скважины 1 можно рассматривать как самостоятельную форму интерпретации материалов просвечивания, в соответствии с существующей практикой, тем более что отдельные исследователи (см.например [I]) считают этот параметр наиболее информативным для локализации рудных объектов. Лучевая скорость представлена в виде графиков по профилю взрывов, построенных для каждой из шести точек наблюдательной скважины (рисунок, г). Для удобства сопоставления графиков друг с другом лучевая скорость на каждом из них нормирована в виде $(v-v_{min})/(v_{max}-v_{min})$, где v – значения скорости по конкретному лучу, а v_{min} и v_{max} – соответственно наименьшее и наибольшее значения скорости для рассматриваемой точки скважины. Минимальному значению скорости отвечает нулевая ордината, а максимальному – ордината 1. Для удобства сравнения графики построены в аксонометрической проекции.

Естественно считать, что надежность локализации области разреза с высокой скоростью связана с количеством соответствующих лучей. Согласно такому подходу, повышенной скоростью характеризуется разрез между точками $A-F$ ствола скважины 1 и ПВ 8, для которого по всем шести лучам значения скорости максимальны. К этим значениям примыкают близкие лучи $7C$ (из ПВ 7 в точку C) и $7D$, для которых нормированная скорость близка к единице (соответственно 0,8 и 0,9). Для всех остальных рассмотренных лучей значения нормированной лучевой скорости либо существенно ниже максимального, либо приближаются или достигают его в отдельных изолированных случаях ($6B$, $4C$), не подтвержденных соседними лучами. Поэтому области разреза к северо-западу от наблюдательной скважины и к юго-востоку от ПВ 8

можно в целом считать представленными породами с относительно низкой скоростью.

Получаемое из анализа графиков представление о скоростном разрезе и локализац участков с повышенной скоростью, представляющих поисковый интерес, в общих чертах согласуется с интерпретацией рассмотренных выше разрезов в изолиниях как истинной, так и лучевой скорости, хотя и отличается от них большей схематичностью.

Выводы

1. Опытные скважинные сейсмические исследования карбонатитового штока в пределах Вуори-Ярвинского массива щелочно-ультрасновных пород дали результаты, имеющие методическое значение.

2. Карбонатитовый шток, который содержит апатит-магнетитовые породы, являющиеся объектом поисковых работ, характеризуется аномальным (существенно градиентным) скоростным разрезом по сравнению с вмещающими пироксенитами массива. Такой разрез в условиях щелочно-ультраосновных массивов центрального типа Балтийского щита можно рассматривать в качестве поискового признака на апатит-магнетитовые руды.

3. Обработка данных сейсмического просвечивания позволила выявить в разрезе область с повышенной скоростью упругих волн, согласующуюся с геологическими данными о карбонатитовом штоке.

4. Сопоставление различных методик обработки данных сейсмического просвечивания показало в общих чертах сходимость полученных результатов. Несмотря на использование ограничивающих априорных предположений о среде (в способе С.А.Назарного) и эффективных сейсмических параметров (лучевой скорости), полученные разрезы в изолиниях локализуют одну и ту же область с повышенной скоростью упругих волн, перспективную для поисковых работ. Использование графиков лучевой скорости дает в принципе тот же результат, но с меньшей детальностью.

5. С имеющимися геологическими данными лучше других согласуются результаты обработки материалов просвечивания в виде изолиний лучевой скорости. Их надежность может быть повышена за счет учета искажающего влияния верхней части разреза с низкой скоростью упругих волн с помощью дополнительных специальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленский В.А. Результаты применения сейсмического просвечивания на одном из медноколчеданных месторождений Южного Урала. – Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. Межвуз. сб., вып. 5. Свердловск, изд. СГИ, 1979.

2. Межскважинное прозвучивание на тональном сигнале. Методические указания / Л.С.Привкер, Ю.А.Бутузов, В.И.Шадхин. Алма-Ата, изд. КазВИРГ, 1979.

3. Назарный С.А. Интерпретация данных малоглубинной сейсморазведки с помощью полей скорости. Л., Недра, 1974.

4. Основные направления развития методики и техники сейсморазведки при изучении рудных районов Казахстана / Ш.К.Абдрашидов, В.С.Жобольда, И.П.Кулемина и др. – В кн.: Методы разведочной геофизики. Рудная сейсморазведка. Л., Изд. НПО „Геофизика", 1978.

5. Рудницкий В.П. Сейсмические исследования в скважинах. Киев, Наукова думка, 1968.