Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XIX, вып. 2, 1976 г.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН ПРИ РЕКОГНОСЦИРОВОЧНО-ПЛОЩАДНОМ ИЗУЧЕНИИ ГЛУБИННОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПЕЧЕНГСКОЙ СТРУКТУРЫ

И.В.ЛИТВИНЕНКО, М.Е.МЕЛАМУД

Печенгско-Аллареченская никеленосная структурная зона Кольского полуострова – один из немногих рудных районов СССР, где рудная сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) для решения структурных задач начала применяться впервые и систематически проводится длительное время. Работы выполняет Западный геофизический трест и Ленинградский горный институт. На примере этих исследований рассмотрены некоторые вопросы повышения геологической эффективности рудной сейсморазведки благодаря усовершенствованию МОВ применительно к данным условиям.

Уже при первых региональных сейсмических исследованиях по методике глубинного сейсмозондирования (ГСЗ) всего разреза земной коры северо-западной части Кольского полуострова (1960–1962 гг.), наряду с прослеживанием глубинных волн, связанных с поверхностью Мохоровичича и другими пологими внутрикоровыми сейсмическими границами, наметились некоторые возможности прослеживать отражения от крутопадающих геологических границ вблизи дневной поверхности. Однако при ГСЗ такие отражения предположительно выделяли лишь в редких случаях. Низкочастотный характер записи сейсмических волн (полоса пропускания частот 7–20 Гц) и, как следствие, недостаточная разрешенность интерференционных волн; интенсивные низкоскоростные и низкочастотные волны-помехи вблизи источников волн (пункты взрыва в мелких водоемах, болотах); большая амплитуда и широкий пакет записи первых волн, к которым примыкают более слабые отраженные волны от наклонных границ, воздымающихся к дневной поверхности; большие базы наблюдений (многие десятки километров), а также значительные расстояния между группами сейсмоприемников (75–100 м) – все это исключало возможность систематического прослеживания рассматриваемых отражений.

В 1963–1967 гг. проводили рекогносцировочно-площадные исследования МОВ с осциллографической аппаратурой по сети профилей, охватывающих, глав-

ным образом, северную часть Печенгской структуры, с более приспособленными для МОВ системами наблюдений. В условиях Печенгского района, как и всего Балтийского щита, создание регулярных систем наблюдений с постоянной величиной взрывного интервала затруднено. Рыхлые отложения имеют небольшую мощность (обычно не более 10–15 м) и представлены мореной с большим количеством валунов, что делает невозможным быстрое и дешевое бурение взрывных скважин. По этой же причине при сейсморазведке нельзя ориентироваться и на взрывы из скважин, пробуренных в кристаллических коренных породах. К тому же взрывы в скважинах в высокоскоростных коренных породах позволяют лишь экономить взрывчатые материалы, но не улучшают существенно запись полезных отраженных волн. Указанные обстоятельства заставили применять непрерывное профилирование системами удлиненных годографов (до 15–20 км) с небольшим количеством пунктов взрывов (ПВ). При этих исследованиях расстояния между регистрирующими приборами были уменьшены до 50 м и полоса записываемых частот упругих волн сдвинута в область 20–40 Гц.

Перечисленные и некоторые другие усовершенствования в методике наблюдений позволили при относительно небольших затратах проследить по площади Печенгской структуры несколько выдержанных сложных групп отраженных волн, связанных с осадочными толщами, разделяющими вулканогенные покровы печенгской серии, и таким образом достаточно быстро получить первое схематическое представление об условиях ее залегания на глубине.

Результатом рекогносцировочно-площадных исследований явились сейсмогеологические разрезы масштаба 1:100000, дающие представления о геологическом строении района до глубины 7–10 км, и структурные схемы по опорным отражающим горизонтам, приуроченным к контактам эффузивных и осадочных пород печенгской серии. Эти результаты сыграли важную роль в определении глубинного строения Печенгской структуры. Было показано, что мощность четвертого вулканогенного покрова, перекрывающего основное рудное поле – филлитовую толщу с никеленосными ультраосновными массивами, увеличивается в южном направлении до нескольких километров. При сейсмических наблюдениях установлена также сильная дислоцированность южной части Печенгской структуры (к югу от Порьиташского разлома) и отсутствие здесь предполагавшегося южного крыла структуры, аналогичного северному. Печенгская структура оказалась крупной приразломной моноклиналью, ограниченной с юга Порьиташским разломом, прослеживающимся, по-видимому, на большую глубину.

Следующий этап в развитии сейсморазведки МОВ относится к 1968–1973 гг., когда при рекогносцировочно-площадных исследованиях начали широко применять аппаратуру с промежуточной магнитной регистрацией и более совершенные системы наблюдений. В эти годы основные исследования проведены в восточной части Печенгской структуры и в прилегающем к ней с юга Аллареченском никеленосном районе, который характеризуется широким развитием гнейсовых комплексов.

Проведенные работы существенно уточнили глубинные разрезы и структурные схемы для Печенгской структуры, дали новые представления о строении так называемых гранитоидных „куполов" (некоторые из них имеют ограниченное распространение на глубину). Благодаря более детальному сопоставлению геологических и сейсморазведочных данных удалось многие из наклонных

отражающих границ связать с тектонизированными геологическими контактами и с зонами тектонических нарушений типа надвигов. В Аллареченском районе на глубине выделены крупные структурные несогласия.

Наряду с рекогносцировочно-площадными работами, в 1971 г. перед сейсморазведкой были поставлены задачи более детального изучения структур основного рудного поля Печенги – продуктивной филлитовой толщи с прослеживанием в ней отдельных массивов ультраосновных пород, выходящих в обнажения или вскрытых единичными скважинами. В настоящее время эти детальные работы вышли из стадии опытных исследований и развиваются на участках известных рудопроявлений.

В связи с внедрением аппаратуры с магнитной записью и благодаря разработке и усовершенствованию методики полевых наблюдений и интерпретации данных сейсморазведки МОВ применительно к условиям Печенгского района существенно повысилась детальность и точность работ и их геологическая эффективность. Эти качественные изменения в геологических результатах особенно заметны при сопоставлении двух сейсмогеологических разрезов, полученных с интервалом почти в 10 лет для одного и того же профиля через Печенгскую структуру. Разрез по профилю Р-5 впервые изучен сейсморазведкой в 1964 г., повторно – в 1973 г. (профиль 5-73). Сопоставление основных особенностей применявшейся при работах 1964 г. и 1973 г. методики полевых наблюдений, обработки и полученных результатов хорошо иллюстрирует современное состояние и возросшие разведочные возможности рудной сейсморазведки МОВ.

По профилю 5-73, как и при других исследованиях периода 1968-1973 гг., полевые работы МОВ проведены по системе непрерывного продольного профилирования в сочетании с непродольными наблюдениями на коротких (0,5-1,0 км) дополнительных профилях, ориентированных перпендикулярно основному маршруту. Применялась 48-канальная сейсмостанция СС-48 М, расстояние между группами приборов составляло 25 м, длина расстановки 1,15 км. Каждая расстановка отстреливалась из четырех пунктов взрыва, величина взрывного интервала достигала 3-4 км, а длина годографа 6-8 км. Для более равномерного освещения разреза по всей длине маршрута на концах профиля были созданы выносные ПВ. Как показывают расчеты [1] , такая система наблюдений позволяет почти повсеместно дважды прослеживать отражающие элементы, имеющие углы наклона от $\pm 80^0$ у дневной поверхности до $\pm 40^0$ на глубине 7 км. При этом обеспечивается многократная увязка опорных отражений по взаимным точкам и определяется пространственное положение отражающих границ. Несколько увеличенные из-за указанных выше затруднений с выбором ПВ взрывные интервалы и, вследствие этого, длина годографов (по сравнению со стандартными системами МОВ) имеют свои преимущества. Появилась возможность фиксировать лучи, отраженные от границ под большими углами. В данных условиях, когда имеются границы с относительно небольшим перепадом акустических жесткостей, для таких наклонных лучей коэффициенты отражения оказались большими по сравнению с нормальными лучами, регистрируемыми вблизи ПВ. Кроме того, при удалении от ПВ бо́льшая часть годографа свободна от влияния низкоскоростных волн-помех, создаваемых взрывами в шурфах, болотах или мелких водоемах.

Применявшиеся ранее (1963-1968 гг.) при рекогносцировочных работах системы наблюдений из ПВ, удаленных на 15-20 км друг от друга, формально

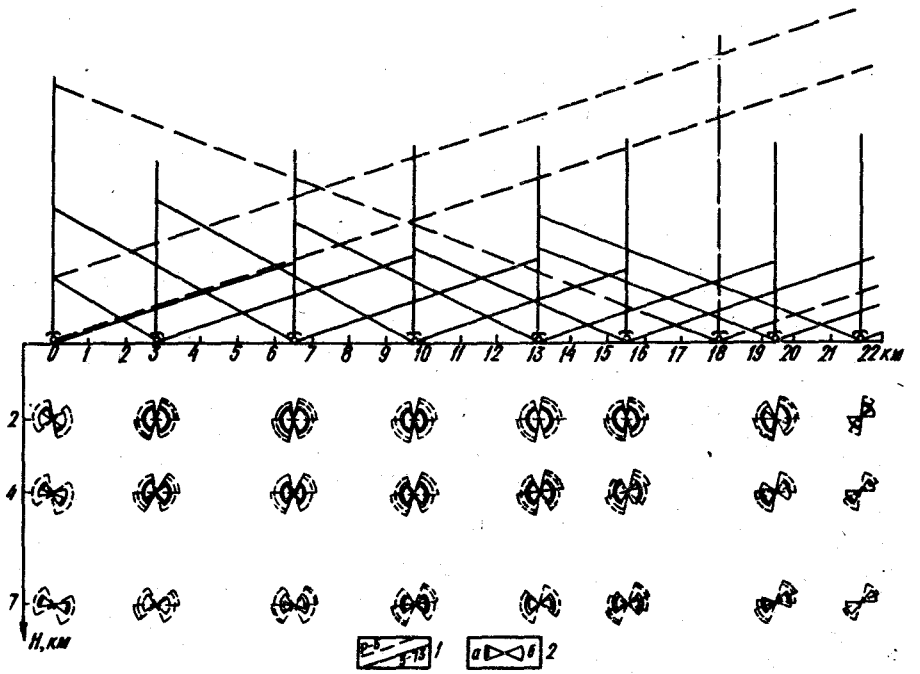


Рис.1. Разведочные возможности систем наблюдений на профилях Р-5 (1964 г.) и 5-73 (1973 г.)

1 – системы наблюдений на профилях; 2 – диапазоны углов наклона отражающих площадок, доступных прослеживанию в данной точке профиля двукратно (а), однократно (б); пунктирные линии – профиль Р-5, сплошные – профиль 5-73

также позволяли регистрировать отражения от наклонных границ в широком диапазоне углов падения (рис.1), но надежность и точность сейсмических построений при этом гораздо ниже. Такие системы обеспечивали в основном только однократное прослеживание сейсмических границ, что при неблагоприятных поверхностных условиях и при интенсивных помехах вблизи ПВ приводило к разрывам в корреляции волн и отражающих площадок на разрезах. Как показывают расчеты [4], построение отражающих элементов по волнам, зарегистрированным при наблюдениях в направлении падения сейсмических границ, производится со значительно большими погрешностями, чем при наблюдениях в противоположном направлении – по восстанию, особенно при значительных удалениях от ПВ.

Сокращение расстояния между группами сейсмоприемников до 25 м дало возможность надежно коррелировать высокочастотные волны и повысить разрешенность их записи. Магнитная запись позволила широко использовать аналоговые машины для анализа волновых полей: перезаписи на преобразователях „Луч" и ПСЗ-4М различными способами с введением статических поправок [2], оптическую фильтрацию [3] по частоте и кажущейся скорости и др.

Усовершенствованная методика полевых наблюдений и обработка записей на аналоговых машинах обеспечили получение монтажей сейсмограмм, содержащих большое количество волн. В волновых полях более надежно, чем ранее,

выделяются опорные отражения, приуроченные к контактам эффузивных и осадочных пород, к кровле архейского основания. Кроме того, в области первых вступлений установлено большое количество волн с отрицательными значениями кажущейся скорости, связываемых с крутопадающими тектоническими нарушениями. Помимо многочисленных продольных отражений регистрируются также обменные (PS и SP) волны, природа которых устанавливается по данным профильных или комбинированных (наземных и скважинных) наблюдений[x].

В настоящее время определяют положение отражающих элементов в пространстве или в плоскости сейсмического разреза и оценивают точность построений с помощью ЭВМ по специальной программе [4]. Этот этап интерпретации очень важен, так как позволяет оставить на разрезе и использовать для геологического истолкования только те отражающие площадки, положение которых определяется устойчиво. Ранее точность построения отдельных площадок не оценивали, и на разрезах одинаковое значение придавали отражающим элементам, положение которых определено достоверно или с большими погрешностями.

Повышению точности сейсмических построений в последние годы способствовало также детальное изучение скоростной модели Печенгской структуры. Для изучения скоростного разреза помимо годографов первых вступлений использованы протяженные годографы отраженных волн и данные сейсмокаротажа глубоких (до 2 км) скважин.

Усовершенствованная методика полевых работ, машинной обработки и интерпретации данных сейсморазведки обеспечила в 1968–1973 гг. получение качественно новой информации о геологическом строении района. На сейсмогеологическом разрезе, составленном по результатам профильных наблюдений в центральной части Печенгской структуры в 1973 г., в отличие от разреза, построенного по этому же маршруту в 1964 г. (рис.2), практически непрерывно прослежены от дневной поверхности до глубины 3–7 км отражающие площадки, приуроченные к горизонту туфов внутри диабазов четвертого вулканогенного покрова, к кровле и к подошве продуктивной филлитовой толщи и к осадочному горизонту в основании третьего вулканогенного покрова. Кроме того, в разрезе выделены сейсмические границы, предположительно связываемые с осадочными горизонтами в основании второго и внутри первого вулканогенных покровов, выходы которых на дневную поверхность не пересекаются профилем. Менее надежно прослежена подошва печенгской серии, что объясняется, по-видимому, сложной ее формой и невыдержанностью по мощности базальтовых конгломератов, определяющих ее положение.

Новый разрез 1973 г. в целом отражает монотонное погружение в юго-западном направлении пород печенгской серии. Углы падения их у дневной поверхности достигают 40^{0}, а по мере погружения уменьшаются. Вертикальная мощность пород печенгской серии в центральной части профиля достигает 7 км. На глубине намечается постепенное сокращение мощности филлитов и нижних покровов печенгской серии. На глубине около 7 км прекращается прослеживание опорных сейсмических границ. Это обстоятельство находит отра-

---

[x] См. наст. сб. М.Д.Лизинский. Определение природы сейсмических волн с помощью комбинированных систем наземных и скважинных наблюдений.

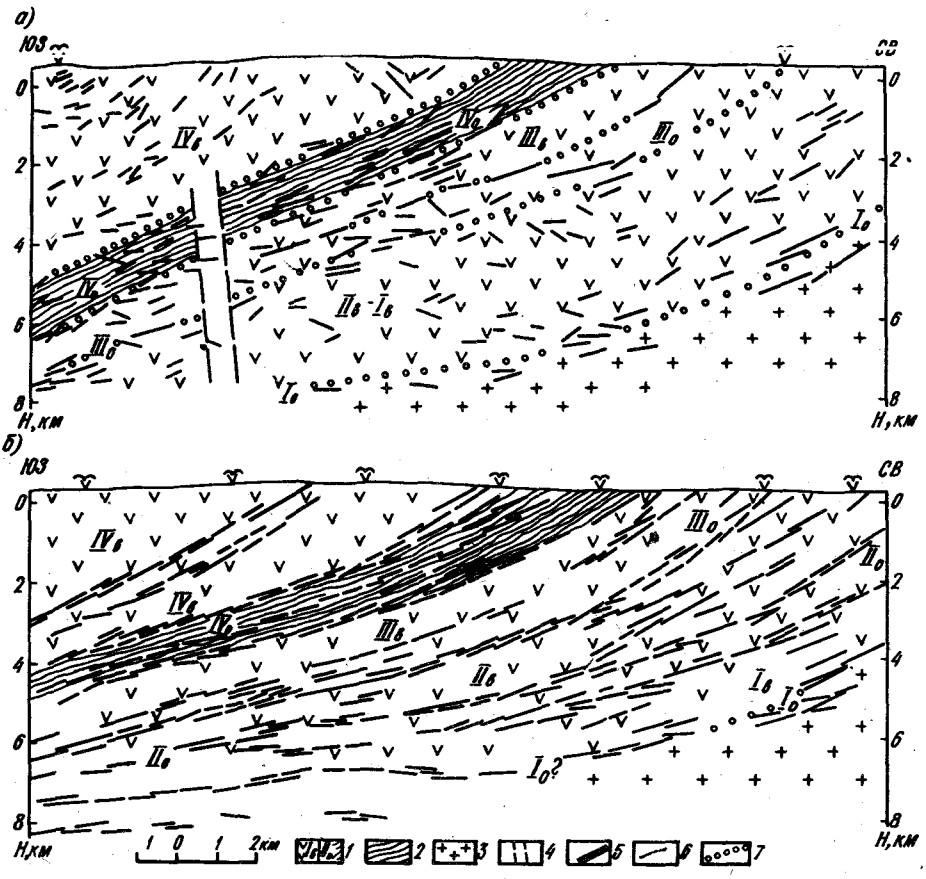


Рис.2. Сейсмогеологические разрезы по профилю в центральной части Печенгской структуры, построенные по работам 1964 г. (а) и 1973 г. (б)
1 – среднепротерозойские вулканогенные (в) и осадочные (о) образования печенгской серии и их индексы; 2 – продуктивная филлитовая толща печенгской серии; 3 – архейский гнейсовый комплекс; 4 – предполагавшееся положение крупного подводящего канала для диабазов четвертого покрова; 5 – отражающие площадки, построенные по волнам интенсивным, протяженным, образующим группы; 6 – отражающие площадки, построенные по одиночным годографам; 7 – осредненное положение отражающих горизонтов

жение в волновом поле: протяженные интенсивные волны со смещенными в направлении восстания границ минимумами годографов выделяются на сейсмических записях лишь до 2,0–2,5 с.

По сейсмическим данным установлены такие многочисленные крутопадающие отражающие элементы, которые часто совпадают с известными по геологическим данным тектоническими нарушениями. По-видимому, и другие крутопадающие площадки у дневной поверхности, в силу сходства кинематических и динамических характеристик соответствующих им отражений, также связаны с тектоническими нарушениями, не указанными на геологической карте.

О высокой точности сейсмических построений на рассматриваемом разрезе 1973 г. (рис.2) говорит сопоставление его с результатами структурно-

поискового бурения. Глубины от дневной поверхности до кровли филлитовой толщи по сейсмическим данным и по разрезу скважины, расположенной в 1,5 км от линии профиля, совпадают с точностью до стандартной ошибки определения глубины отражающего элемента (±0,1 км). Результаты комплексной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных также подтверждают реальность построенного сейсмогеологического разреза. При общепринятых средневзвешенных значениях плотности для основных комплексов пород, выделенных на глубине сейсморазведкой, получено хорошее совпадение расчетного и наблюдаемого значений поля силы тяжести.

Оценка точности сейсмических построений, выполненная по программе [4], показала, что для большинства площадок ошибка определения координат центра не превышает ±0,1–±0,2 км в плане и по глубине. Если же учесть при этом, что опорные границы в разрезе построены в интервале их прослеживания практически дважды, то станет очевидным, что погрешность построения отражающих горизонтов по совокупности площадок ниже упомянутых значений.

При сопоставлении разрезов 1964 г. и 1973 г. установлены и другие различия в качестве прослеживания и характере поведения на глубине сейсмических границ:

на профиле Р-5 (1964 г.) горизонт туфов в диабазах четвертого вулканического покрова не прослежен, тогда как на разрезе 1973 г. он выделен весьма надежно;

по данным 1973 г., кровля, подошва продуктивной толщи и подошва всей печенгской серии в южной части профиля предполагаются на глубинах несколько меньших по сравнению с разрезом 1964 г.;

непрерывное прослеживание опорных сейсмических границ на профиле 5-73 не подтверждает предполагавшегося ранее по разрывам в корреляции отражающих площадок широтного тектонического нарушения, с которым могли быть связаны крупные подводящие каналы для диабазов четвертого вулканогенного покрова.

Выводы

1. Метод отраженных волн стал основным геофизическим методом при изучении глубинного геологического строения Печенгско-Алларечепского района. Геологическая эффективность сейсморазведки МОВ при решении реконгносцировочных структурных задач резко возросла благодаря разработке и усовершенствованию методики полевых наблюдений и камеральной обработки:

системы наблюдений проектируют из расчета не менее двукратного прослеживания сейсмических границ в широком диапазоне углов их наклона;

длины годографов и взрывных интервалов обеспечивают возможность регистрации протяженных годографов опорных групп отраженных волн, увязку их во взаимных точках и точность построения сейсмических границ, необходимую для составления разрезов в масштабе 1:50000, а иногда и 1:25000;

обработка первичных материалов на аналоговых и цифровых машинах способствует более полному анализу регистрируемых волновых полей, выделению полезных волн в зонах интерференции, изучению динамических характеристик сейсмических волн;

в процессе камеральной обработки используют рациональную методику изучения скоростного разреза, широко применяют ЭВМ; учет погрешностей построения отдельных отражающих элементов повышает надежность получаемых результатов.

2. Перед сейсморазведкой в Печенгском районе поставлены более тонкие задачи детального изучения на глубине структур основного рудного поля и прослеживания в нем потенциально никеленосных массивов ультраосновных пород. Для этого проводят специальные опытные и опытно-производственные сейсморазведочные работы (методика и эффективность их в данной статье не рассматривались). Вместе с тем приведенные материалы убеждают в необходимости продолжения рекогносцировочно-площадных сейсморазведочных исследований в пределах Печенгско-Аллареченской структурной зоны и особенно на площади собственно Печенгской структуры, на участках, где филлитовая толща залегает на глубинах, доступных структурно-поисковому бурению (2-3 км). Возросшая геологическая эффективность рекогносцировочно-площадной сейсморазведки МОВ позволяет более полно использовать ее для надежного обоснования мест заложения дорогостоящих структурно-поисковых скважин. В процессе такого обоснования, несомненно, удастся разредить сеть скважин и, следовательно, ускорить и удешевить весь комплекс геологопоисковых работ на никель.

Литература

1. Литвиненко И.В. Методика изучения сейсморазведкой сложных структур верхней части консолидированной коры материков. Зап. ЛГИ, т. XI, вып. 2, 1971.

2. Меламуд М.Е. Учет статических поправок при сейсморазведке в Печенгском районе. Зап. ЛГИ, т. XI, вып. 2, 1971.

3. Меламуд М.Е., Потапов О.А. Опыт применения оптической фильтрации при обработке материалов рудной сейсморазведки в Печенгском районе. В кн.: „Разведочная геофизика", вып.58, М., „Недра", 1973.

4. О точности построения отражающих границ в разрезах Печенгского района. Зап. ЛГИ, т. XVI, вып.2, 1974. Авт.: И.В.Литвиненко, А.Л.Ливанцова, М.Д.Лизинский, М.Е.Меламуд.