

Особенности сейсморазведки на твердые полезные ископаемые

■ Череповский А.В., АО «Росгеология», г. Москва.

В сложившейся в последние годы международной обстановке особое значение приобретает обеспеченность нашей промышленности твердыми полезными ископаемыми (ТПИ). Геофизические методы исследований, включая сейсмические, доказали свою эффективность при поисках и разведке черных, щелочных и драгоценных металлов, урана, алмазов и других видов ТПИ. Сейсморазведка на ТПИ применяется всё шире благодаря возможности получать детальные изображения сложнопостроенных сред и картировать рудные тела и зоны крутопадающих и субвертикальных тектонических нарушений. Это минимизирует инвестиционные риски по освоению месторождений ТПИ благодаря сокращению количества разбуриваемых скважин и более оптимальному планированию глубоких шахт.

На недавнем пленарном заседании в Госдуме министр природных ресурсов и экологии РФ, Александр Козлов, подчеркнул, что «геологоразведка – это новые месторождения, сырьевой суверенитет нашей страны» [6]. Как известно, наша страна по ряду видов твердых полезных ископаемых (ТПИ) зависит от внешних закупок: например, по литию, плавиковому шпату, титану, ниобию и марганцевым рудам. Эти и другие виды полезных ископаемых уже исторически, десятилетиями, импортируются в страну. В связи с этим Федеральное агентство по недропользованию «Роснедра» расширяет проект "Геология: возрождение легенды", и в интервью информационному агентству «Прайм» руководитель агентства «Роснедра», Евгений Петров, отметил, что необходимо активизировать работу по сокращению зависимости российской экономики от импорта [7].

Геофизические методы исследований, включая сейсмические, доказали свою эффективность при поисках и разведке черных, щелочных и драгоценных металлов, урана, алмазов и других видов ТПИ [2, 3, 4]. В последние годы сейсморазведка на ТПИ применяется всё шире, хотя во многих случаях она сталкивается с большими трудностями из-за отсутствия

выдержанных и сильных отражающих границ, характерных для горизонтально-слоистых сред в осадочных бассейнах при поисках и разведке углеводородного сырья (УВС). Несмотря на это, сейсморазведка на ТПИ позволяет получать детальные изображения сложнопостроенных сред и, в благоприятных случаях, обеспечивает картирование рудных тел и зон крутопадающих и субвертикальных тектонических нарушений. Существенные аппаратно-методические различия между сейсморазведкой на УВС и на ТПИ показаны в таблице 1.

Задача повышения эффективности добычи ТПИ актуальна по всему миру. Десятки сейсмических съемок на ТПИ – как 2D, так и 3D – выполнены в Канаде, в Европе (Швеция, Финляндия, Испания), в Австралии, в Южной Африке и в России (Поволжье, Предуралье, Таймыр, Якутия) с целью оконтуривания рудных тел, обнаружения кимберлитовых трубок и планирования глубоких шахт. Что касается зарубежного опыта, то есть примеры успешных сейсмических исследований на залежи урана в Канаде, на никелево-медные рудные тела в Финляндии и на золотосодержащие породы в Южной Африке.

В Генеральной геофизической компа-

Сейсморазведка на УВС	Сейсморазведка на ТПИ
Большие глубины исследований: от 2-3 до 5-6 км	Небольшие глубины исследований: от первых десятков метров до 1-1,5 км
Большие площади работ: типично 200-300 кв.км, иногда 500-1000 кв.км и больше	Небольшие площади работ: от 5-6 до 15-20 кв.км
Большие сроки полевых работ: несколько месяцев, а иногда несколько лет	Небольшие сроки полевых работ: одна или две недели
Большие сейсмопартии: от 5 -10 тысяч до 60-100 тысяч регистрирующих каналов	Небольшие сейсмопартии: от 200 -300 до 1-2 тысяч регистрирующих каналов
Возбуждение волн мощными источниками: группы тяжелых виброисточников по 4-5 установок; группы импульсных источников до 12-16 штук; заряды ВВ несколько кг	Возбуждение волн одиночными источниками: легкие виброустановки; импульсные источники; взрывы ВВ по 100-5600 тяжелых виброисточников по 4-5 установок; заряды ВВ по 100-500 г
Большой шаг между ПВ и ПП (25 или 50 м), что позволяет получить высокую кратность наблюдений МОГТ только на больших временах регистрации	Сокращенный шаг между ПВ и ПП (5 -10 м), который обеспечивает высокую кратность и плотность наблюдений МОГТ даже на малых временах регистрации

▲ Табл. 1. Аппаратурно-методические различия между сейсморазведкой МОГТ 3D на УВС и ТПИ.

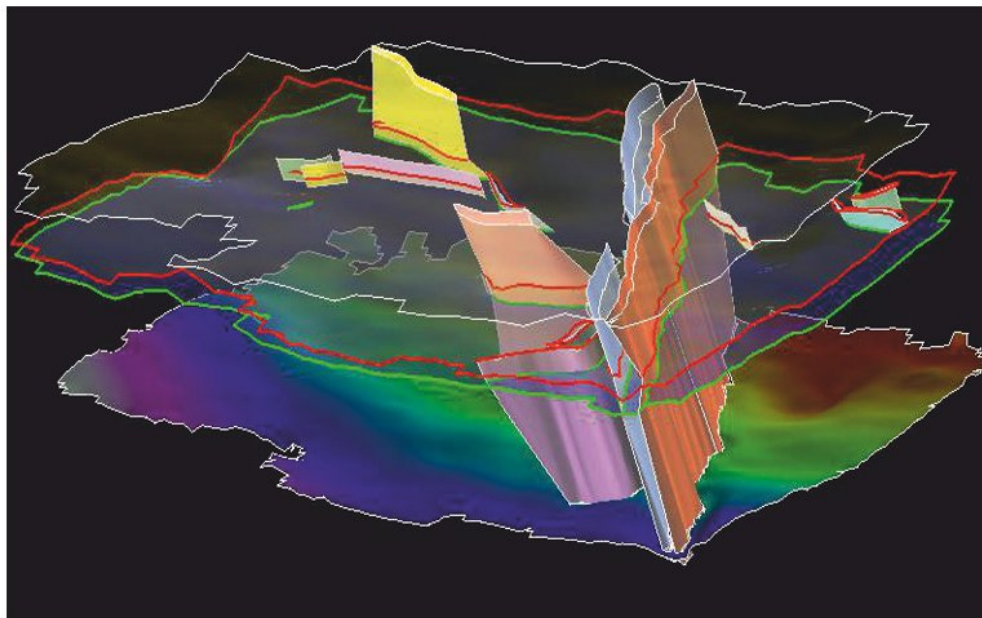
нии (СЖЖ, Франция) всегда уделялось большое внимание рудной сейсморазведке и ее комплексированию с другими геофизическими методами (ВСП, гравиразведка, магниторазведка, электроразведка методом вызванной поляризации, электромагнитные методы). Большие успехи были достигнуты в Южной Африке, где сейсмика была нацелена на оптимизацию прокладки шахтных стволов с использованием высокоразрешающих структурных изображений. Для проектирования и эксплуатации глубоких шахт очень важно закартировать зоны нарушений с амплитудами смещений менее 10 м, которые могут служить путями прорыва воды и проникновения взрывоопасных горючих газов (метана и водорода в первую очередь).

При сейсморазведке 3D на платину в Южной Африке, при глубинах залегания рудных тел от 500 до 1300 м, применялись небольшие активные приемные расстановки: 7 линий по 80 каналов [2]. Использовались группы по 6 стандар-

тных геофонов SM-4 на базе 15 м. Но шаг между линиями был равен 120 м, а шаг ПП по линиям – 15 м, что позволило получить плотность ПП, равную 555 на 1 кв.км (что в 10 раз больше, чем при стандартных съемках на нефть и газ). Плотность по ПВ была также достаточно высокой: 444 ПВ на 1 кв.км. Группа из двух вибраторов возбуждала 4 свип-сигнала на каждой точке возбуждения: 1-й свип-сигнал в диапазоне 10–80 Гц для последующего анализа первых вступлений; затем 3 логарифмических свип-сигнала в диапазоне 30–180 Гц. В результате в целевом интервале, на временах регистрации 350-400 мс, было получено высококачественное изображение целевого горизонта UG2 и построена объёмная структурная модель рудного тела (Рис.1).

Таким образом, компанией СЖЖ в Южной Африке было показано, что высокоразрешающая сейсмика 3D может играть важную роль в определении геометрии рудных тел и тонких пластов.

► Рис. 1.
Объёмная
структурная
модель
платино-
содержащего
рудного тела.



При этом стоимость площадной сейсмики 3D (включая полевые сейсмические работы, обработку и интерпретацию данных) составила около 1% от стоимости всего горнорудного проекта [2].

В Швеции сейсморазведка 2D и 3D уже несколько десятков лет успешно применяется для поисков и разведки железорудных тел, отличающихся от вмещающих пород более высокой плотностью и, соответственно, более высокими скоростями пробега акустических волн [4]. Чтобы обнаружить крутопадающие рудные тела (40-50 градусов и больше) на достаточно больших глубинах и избежать бурение пустых скважин, необходимы высокоразрешающие сейсмические исследования МОГТ. Например, в 2019 г. в центральной части Швеции на площади 6 кв.км была выполнена съемка МОГТ 3D с достаточно высокой плотностью наблюдений (Рис.2). С использованием сети имеющихся дорог и просек было установлено 1266 ПП с шагом 10 или 20 м. Использовался одиночный колесный тяжелый вибратор (32 тонны), свип-сигнал 10-160 Гц длительностью 20 с. Интервал между виброточками составил

10 м. В результате этих работ были уверенно зарегистрированы отраженные волны от железорудного тела, простирающегося по крайней мере на 300 м дальше, чем было известно по данным бурения. Таким образом, сейсмическая съемка позволила выявить дополнительные запасы 10 млн. тонн руды, которые предстояло подтвердить бурением.

В США, а именно в штате Иллинойс, проходку угольных шахт осложняют крутопадающие магматические дайки. Обычно они имеют толщину до 10 м, но отдельные дайки имеют толщину до 100 м. Магниторазведка успешно картирует

▼ Рис. 2. Вибрационные сейсмические исследования 3D в районе железорудной шахты в центральной части Швеции.





▲ Рис.3. Сейсмические работы в США (штат Иллинойс) для картирования крутопадающих магматических даек. Источник – ускоренный падающий груз весом 50 кг.

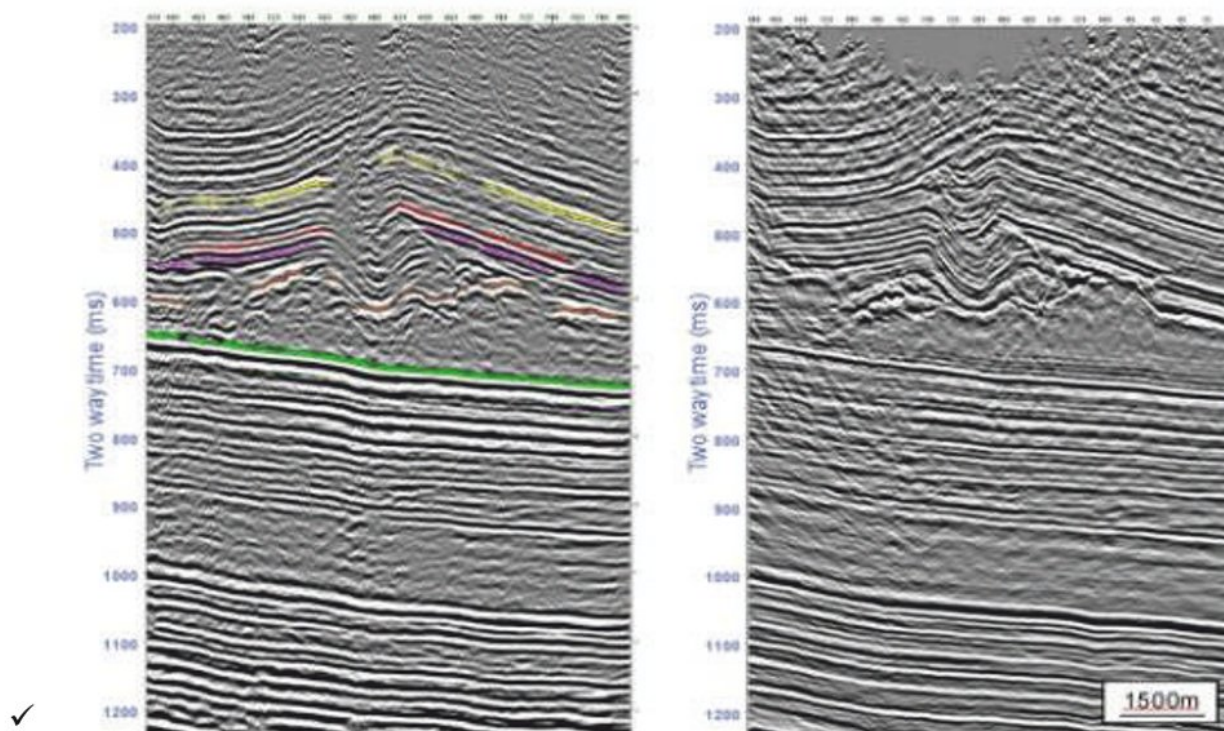
неглубокие дайки, но высокоразрешающая сейсморазведка МОГТ целесообразна для получения информации об ориентации даек. В отчете Геологической службы штата Иллинойс [8] были описаны результаты работы небольшой партии 2D с компактным источником: ускоренный падающий груз весом 50 кг (Рис. 3). Шаг точек возбуждения был равен 3 м. Для регистрации высокочастотных сигналов применялись 40-Гц приёмники с шагом ПП, равным также 3 м. В выводах было отмечено, что большинство вертикальных даек отчётливо выделяются на сейсмических разрезах МОГТ. В то же время, отдельные дайки надёжно картируются магниторазведкой, но неуверенно выделяются на сейсмических разрезах. Возможно, они слишком тонкие для наземных сейсмических методов. Было установлено, что дайки выглядят шире на сейсмических разрезах, чем они есть на самом деле – скорее всего, по причине тепловых изменений в породах при проникновении интрузии.

В Испании – в Каталонском бассейне калийных солей – сейсмические съёмки 2D методами МПВ и МОВ выполнялись с

70-х годов прошлого века с помощью 24-канальных аналоговых станций [1]. Первые крупномасштабные сейсмические и скважинные исследования (ГИС) были выполнены в конце 80-х годов 20-го века. Сейсморазведка была необходима, прежде всего, для картирования перерывов в слое калийных солей из-за седиментационных и структурных факторов. Как известно, скорости пробега продольных волн и плотности изменяются в широких пределах для известняков, доломитов и песчаников в зависимости от их пористости. Пласты разных видов соли могут иметь разную плотность (от 1,6 до 2,2 г/см³), но скорости пробега волн почти постоянны, поэтому виды соли трудно различать по сейсмическим данным. В Каталонском бассейне в основании эвапаритового комплекса есть выдержанный слой ангидритов, обладающих высокой скоростью пробега волн и высокой плотностью (3,85 г/см³), поэтому слой ангидритов послужил опорным горизонтом.

В 2009 году в Каталонском бассейне был сделан переход на сейсморазведку 3D. Впервые в Испании над шахтой были получены данные 3D на площади 50 кв.км (Рис.4). Если ранее применялся взрывной источник, то при последующих съёмках 3D применялся одиночный легкий виброисточник Nomad-15 (полный вес 9 тонн) для уменьшения воздействия на окружающую среду. После сравнительных опытных работ был сделан вывод, что легкий виброисточник при накоплении 4 свип-сигналов может вполне заменить взрывной способ возбуждения колебаний.

В России сейсморазведка 2D и 3D успешно используется многие десятилетия для поисков и разведки кимберлитовых трубок в Якутии, а в последние годы –



▲ Рис. 4. Сравнение профильных (2D) и площадных (3D) данных разных лет.
Слева – данные 2D, 1989 г.; справа – данные 3D, 2009 г.

для поисков железоникелевых интрузивных тел на Таймыре. Особенность таких работ в России – это широкое применение как импортных вибрационных установок, так и отечественных импульсных источников «Енисей» в колесной модификации (КЭМ-4) или в санной модификации (СЭМ-50 и СЭМ-100). На нескольких площадях опробована высокопроизводительная методика работ 3D с импульсным источником в движении.

Удивительное разнообразие вещественного состава кимберлитов и сложность геологического строения территории Восточной Сибири привели к созданию широкого комплекса геолого-геофизических методов для поисков кимберлитовых трубок. Новшеством для алмазной геологии в Якутии и для рудной геофизики СССР явилось производственное применение сейсморазведки МОГТ в Ботуобинском алмазоносном районе с 1979 года. Были получены положительные результаты на известных кимберли-

товых трубках и на рудовмещающих разломах (Рис.5). Сейсморазведка МОГТ 2D была включена в комплексную программу геологоразведочных работ в Якутской алмазоносной провинции, принятую на совещании алмазников в 1980 году в г.Мирный.

В 2011 году руководством компании "АЛРОСА" был составлен и одобрен проект под названием "Разработка и внедрение технологии трехмерной (3D) рудной сейсморазведки при поисках месторождений алмазов". В обосновании проекта утверждалось, что наибольшие перспективы для решения задачи выделения рудоконтролирующих и рудовмещающих зон, а также непосредственно обнаружения кимберлитовых тел могут быть связаны с дальнейшим развитием сейсморазведки. В действительности, применение сейсморазведки МОГТ 3D позволило обнаружить наиболее трудные в поисковом плане "слепые" рудные тела как трубчатого, так и даечного типа [5].

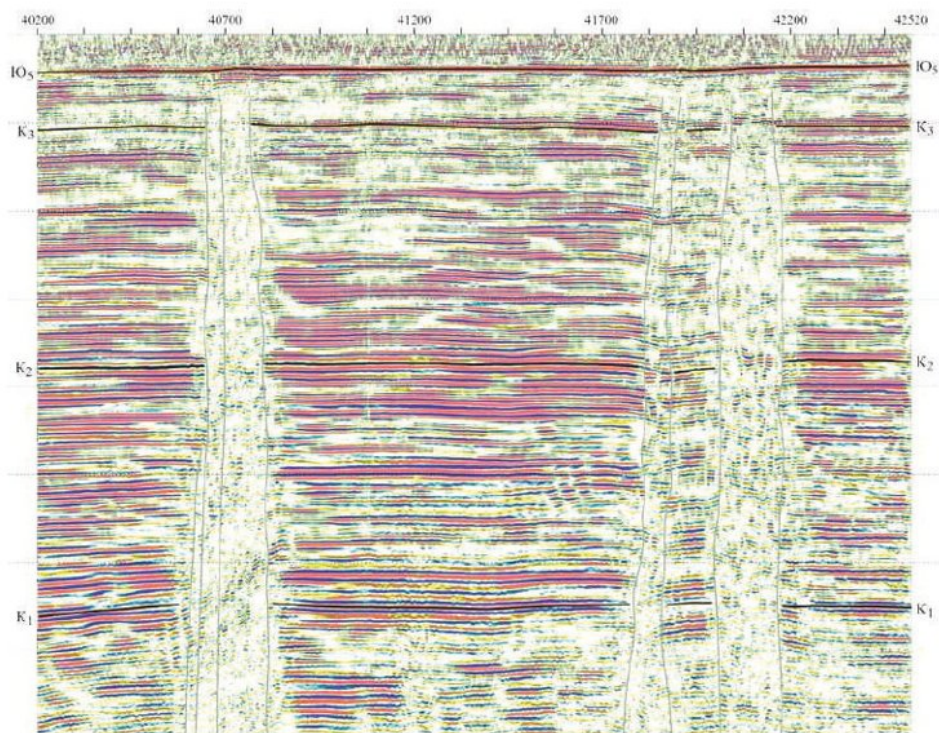


Рис. 5. Пример сейсмического разреза с вертикальными зонами отсутствия отражений, интерпретируемыми как кимберлитовые трубки. Материалы компании «АЛРОСА».

В 2014 г. на 6-й Международной геолого-геофизической конференции и выставке «Санкт-Петербург 2014. Геонауки — инвестиции в будущее» компания «АЛРОСА» показывала результаты высокочастотных сейсморазведочных работы на объекте трубчатой формы – это базитовая трубка Буордахская, открытая аэромагнитной съёмкой. Сначала там были выполнены профильные высокочастотные сейсмические исследования в варианте 2D. Изучена априорная волновая картина изучаемой трубки. Полученная информация послужила основой для выбора оптимальной методики съёмки 3D. Площадь съёмки 3D составила всего лишь 1,2 кв.км, но это были высокоплотные работы с расстояниями между линиями взрыва и приёма по 50 м. Источником был взрыв в скважине на глубине 5 метров, с укупоркой водой. Применялись одиночные сейсмоприёмники с собственной частотой 100 Гц. Регистрация данных осуществлялась с шагом дискретизации 0,25 мс. По результатам этих высокочастотных сейсмических исследований 3D были определены конфигурация и размеры Буордахского

разлома и вмещенной одноименной трубки. В плане форма трубки оказалась близка к изометричной, её диаметр составил около 180 м. Зафиксированный в сейсмическом поле размер трубки отличается от предполагавшегося по данным магнитной съёмки (разница около 80 м).

В 2019 г. на конференции «Инженерная и рудная геофизика 2019» в г.Геленджик компания «АЛРОСА» представила следующие выводы: 1) на примере двух кимберлитовых полей установлено, что по данным высокочастотной сейсморазведки МОГТ наблюдается диагностируемая закономерность присутствия дислоцированности (латеральной, вертикальной) во вмещающей осадочной толще с кимберлитомобразованием; 2) ранжирование по степени перспективности на основе дислоцированности пород кимберлитовмещающей толщи, фиксируемой в волновом сейсмическом поле, повышает прогнозную значимость исследуемых территорий, и, как следствие, геологическую эффективность поисковых работ на алмазы.

В последние годы (начиная с зимнего



▲ Рис. 6. Работа буксируемого импульсного источника в движении на льду.

сезона 2021-22 гг.) выполняются сейсмические работы МОГТ 2D на железоникелевые интрузивные тела на Таймыре. Для повышения производительности работ на некоторых площадях импульсный источник СЭМ-50, буксируемый бульдозером, применяется в движении, со средним шагом возбуждения около 5 м, что обеспечивает высокую плотность наблюдений и построение высокоразрешающих изображений исследуемой среды после надлежащей обработки данных с упором на подавление интенсивных помех. Практика показала, что такая методика высокопроизводительных работ позволяет уверенно регистрировать полезные сейсмические сигналы с глубин до 1 км, Рис. 6.

Заключение

В последние десятилетия сейсморазведка МОГТ применяется всё шире при поисках и разведке ТПИ благодаря возможности получать детальные изображения сложнопостроенных сред и картировать рудные тела и зоны крутопадающих и субвертикальных тектонических нарушений. Это минимизирует инвестиционные риски по освоению месторождений ТПИ благодаря сокращению количества разбуриваемых скважин и более оптимальному планированию глубоких шахт. Несомненно, что сейсморазведка способна сыграть ключевую

роль в сокращении зависимости российской экономики от импорта и в обеспечении нашей промышленности всеми необходимыми ресурсами.

Литература

1. History of Geophysical Work for Potash Salt Investigation in the Catalanian Potash Basin - ICL Iberia Súrria & Sallent – by I. Martinez Garcia et al., Near Surface Geoscience conference & exhibition, 4-8 September 2016, Barcelona, Spain.
2. How 3D seismic can help enhance mining by Larroque M., Postel J.-J., Slabbert M., Duweke W. – First Break, January 2002.
3. Seismic methods in mineral exploration and mine planning – Introduction. By Malehmir A., Urosevic M., Bellefleur G., et al. – *G E O P H Y S I C S* (2 0 1 2) , 7 7 (5) ; <http://dx.doi.org/10.1190/2012-0724-SPSEIN.1>
4. Sparse 3D reflection seismic survey for deep-targeting iron-oxide deposits and their host rocks, Ludvika Mines-Sweden. By Malehmir A. et. al.; <https://doi.org/10.5194/se-2020-141>
5. Вестник компании АЛРОСА, №1 (198) январь 2013 г., с.12.
6. Козлов рассчитывает на увеличение геологической изученности Дальнего Востока до 60%. – Сообщение ТАСС, 14 мая 2024 г.; <https://tass.ru/ekonomika/20788739>
7. Интервью руководителя Роснедр Евгения Петрова информационному агентству «Прайм» 30 июня 2023 г. - <https://www.rosnedra.gov.ru/article/15403.html>
8. Отчет Геологической службы штата Иллинойс о результатах сейсморазведки 2D.

Подробнее об авторе



Череповский

Анатолий Викторович

Советник Руководителя
производственного блока
АО «Росгеология», канд. техн.
наук, автор и соавтор более
40 научных статей и докладов.
Лектор ЦДУ РАН.