

3D сейсморазведка на трапповом разрезе для задач ТПИ

- Ошкин А.Н., Турчков А.М., Бурденко А.А., Вязниковцев А.А., ООО «Соника», МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва.
- Воробьев Ю.В., ООО «Норникель Технические сервисы», г. Санкт-Петербург.
- Детков В.А., ООО «Красноярскнефтегеофизика», г. Красноярск.

В статье приводится опыт авторов по выполнению сейсморазведки МОГТ 3D в Норильском промышленном районе на разрезе, представленном переслаиванием базальтовых траппов. Съемка выполнялась по высокоплотной технологии возбуждения сигнала импульсными источниками в движении.

Особенности обработки и интерпретации данных не рассматриваются в данной статье.

Введение

Применение сейсморазведки для решения задач поиска и разработки твердых полезных ископаемых (ТПИ) является давно обсуждаемой темой, однако практического опыта проведения таких работ в России крайне мало. Авторам известны работы, в которых для изучения разреза используется сейсмотомография на преломленных лучах по 2D профилям. Известно несколько практических примеров использования 2D ОГТ для выделения в разрезе основных границ и разломов. Однако авторам неизвестны примеры выполнения 3D сейсморазведки в сколь-либо представительных объемах.

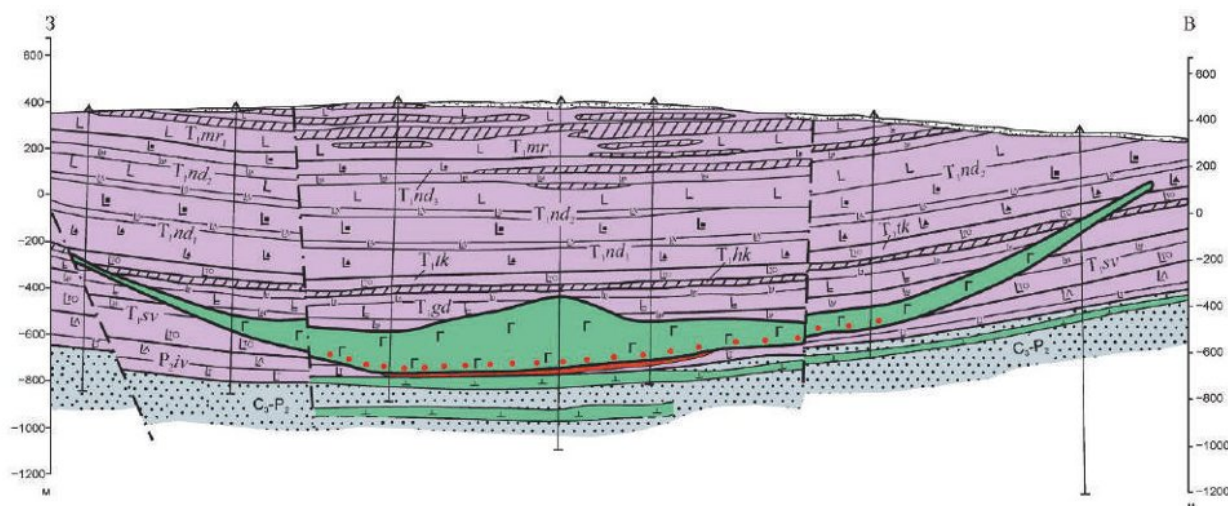
Между тем авторы статьи активно разрабатывают и внедряют технологию выполнения высокоплотных сейсморазведочных работ с применением импульсных источников с излучением сигнала непосредственно во время движения по линии возбуждения, без остановки. То есть, съемки в движении. В своей прошлой статье (Ошкин, и др., 2023) авторы утверждали, что такая сейсмика, дополненная бескабельными нодальными системами регистрации, позволяет быстро, качественно и недорого отрабатывать небольшие участки и может быть рентабельной для применения при решении задач ТПИ.

В настоящей статье авторы делятся опытом выполнения таких сейсморазведочных работ МОГТ 3D на одном из месторождений медно-никелевых руд в геологических условиях Норильского промышленного района. Работы носили опытно-методический характер. Изучаемая площадь была хорошо исследована бурением, а особенности геологического строения были известны заранее.

Основной задачей описываемых работ было изучение возможностей сейсморазведки для выделения рудоносных интрузивных тел во вмещающих базальтовых отложениях пермь-триасового возраста, а также изучение тектоники.

Условия производства работ

Работы выполнялись на участке, находящемся в северо-западной части Сибирской трапповой провинции. Геологический разрез по профилю, пересекающему участок работ, приведен на Рис. 1. (Звездов В. С., 2020). Отложения верхней перми – нижнего триаса, мощностью до 1100-1200 м, представлены породами трапповой формации (базальты, туфы и т.п.). Они являются вмещающими породами для рудоносного интрузивного тела, внедрившегося в подошвенной части траппов. Эта пачка характеризуется высокими скоростями распространения Р-волн, порядка 5000-6000 м/с.



▲ Рис. 1. Геологический разрез, пересекающий участок работ. (По материала Звездова В. С., 2020).

Подстилаются траппы породами тунгусской серии, представленными аргиллитами, алевролитами, песчаниками и пластами углей. Перечисленные породы отличаются пониженными скоростями V_p , вплоть до 2000-3000 м/с. При этом в самой тунгусской серии также могут находиться интрузивные тела субгоризонтального простирания.

Дневная поверхность характеризуется ландшафтами, сформированными в результате сложных геологических и климатических процессов. Перепады рельефа непосредственно на участке работ составляли около 130 м. В целом рельеф спокойный, однако встречаются резкие формы в виде ступеней, недоступные для прямого пересечения тяжелой техникой. На исследуемой площади присутствовали заболоченные участки, расположенные в поймах небольших ручьев, а также возвышенность в средней части, местами с обнаженными голыми скалами. Встречались россыпи валунов на поверхности.

Но в целом рельеф благоприятствовал выполнению сейсморазведочных работ, хотя и присутствовали крутые склоны, недоступные для тяжелой техники и не позволившие сделать систему наблюдений симметричной.

Оборудование для производства работ

В качестве регистрирующей системы применялась бескабельная нодальная сейсмостанция «GSX», производства компании «Geospace Technologies» (Рис. 2). Для повышения чувствительности одиночной группы применялся современный сейсмоприемник «GS-ONE», чувствительность которого более чем в три раза превышает чувствительность наиболее распространенных «GS-20DX».

▼ Рис. 2. Нодальная система «GSX». Процесс проверки технических параметров ноды по радиоканалу.





▲ Рис. 3. Импульсная группа из сцепки двух «Енисей СЭМ-50».

В качестве источника сейсмических сигналов применялась группа на основе двух импульсных источников «Енисей СЭМ-50» (Рис. 3). Электропитание для источников обеспечивалось мобильной дизельной электростанцией.

Для управления импульсной группой использовалась система синхронизации на основе контроллера «SGD-SP» и пульта «SGD-SEL».

Определение фактических координат ПП и ПВ выполнялось с применением GNSS-систем в режиме RTK.

Подготовительные операции

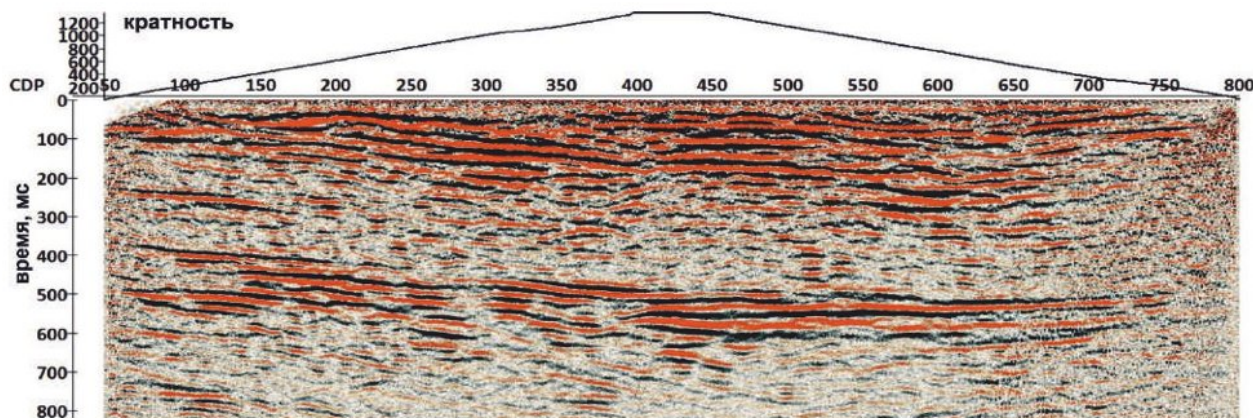
Так как при использовании слепой нодальной системы невозможно оценить качество данных непосредственно в процессе регистрации, необходимо подтверждение о применимости сей-

сморазведки на конкретном участке работ. Для этого перед выполнением основной 3D съемки был выполнен тестовый 2D профиль, пересекающий участок работ. Применялась та же методика возбуждения, что и для основной съемки. Сразу после съемки 2D профиля, данные с нодов были считаны и переданы в полевую обработку.

В результате был получен разрез (Рис. 4), с выраженными отражениями на времени около 500 мс, что соответствует ожидаемому времени отражения от контрастной подошвы траппов.

Таким образом, было получено подтверждение применимости сейсморазведки для изучения конкретного геологического разреза на всем целевом интервале и обоснованы дальнейшие работы 3D.

▼ Рис. 4. Результат полевой экспресс-обработки тестового профиля 2D.



Методика выполнения полевых работ

Полевые сейсморазведочные работы МОГТ 3D выполнялись осенью 2023 года по технологии возбуждения импульсным источником в движении с малым шагом.

Для ускорения и удешевления полевых работ предварительная геодезическая разбивка линий и пунктов сети наблюдений не выполнялась. Раскладка системы регистрации производилась непосредственно в ходе выставления пикетов ПП в натуру с помощью GNSS-оборудования. Линии возбуждения вообще не выносились в натуру, а существовали только в системе навигации буксирующего бульдозера, куда также были загружены координаты всех пунктов приема для уменьшения вероятности наезда при выполнении работ. Водитель импульсной группы в реальном времени видел свое положение относительно элементов системы наблюдения на экране навигатора.

После расстановки нодальной регистрирующей системы была выполнена съемка фактических координат ПП (в первую очередь для определения высотных отметок), а также выполнены тесты нодов посредством входящей в комплект станции «GSX» системы тестирования «Line Viewer» по радиоканалу.

Система наблюдений изначально проектировалась как пластичная, учитывающая особенности дневной поверхности, влияющие на выполнение съемки. В качестве опорной была выбрана сеть со следующими параметрами:

Шаг ЛПП	160 м
Шаг ЛПВ	100 м
Шаг ПП	20 м
Шаг ПВ	плавающий, около 5 м
Количество ПП	не менее 1000
Выносы	пунктами возбуждения

Пункты приема были установлены в проектные координаты, а вот пункты возбуждения располагались вдоль проектной линии с возможностью отклонения от нее, если поверхностные условия не позволяют или затрудняют нахождение строго на линии (резкие черты рельефа, ручьи, крупные камни, скальные поверхности без снежного покрова и т.п.).

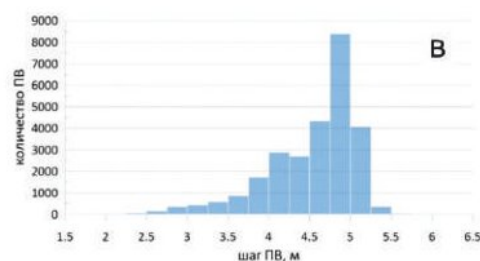
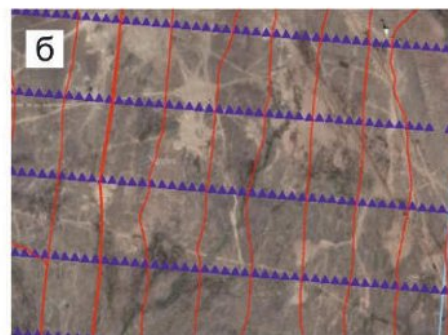
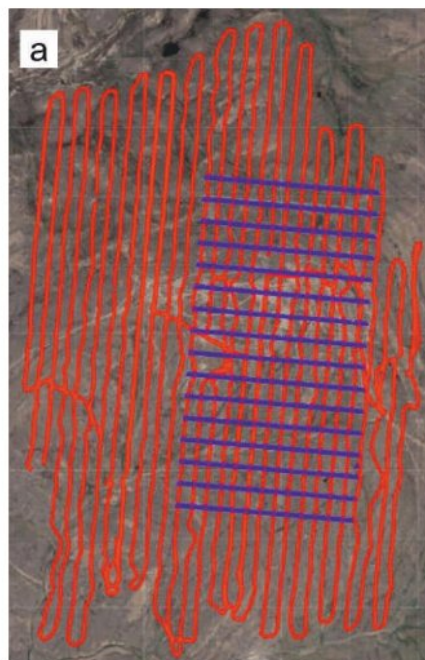
Отклонение ПВ от проектных координат не вызывает проблем при обработке в случае фиксации фактических координат каждого ПВ. Основным критерием для расположения ПВ было сохранение некоей средней плотности ПВ на единицу площади съемки.

На Рис. 5-а приведена общая карта расположения ПВ и ПП. На севере и юге линии возбуждения (ПВ обозначены красными точками) ограничивались ручьями и заболоченными участками, на востоке крутыми формами рельефа.

Увеличенный фрагмент сети наблюдений приведен на Рис. 5-б. Хорошо видна равномерная сетка ПП (синие треугольники), и искривленная поверхностными условиями сеть пунктов возбуждения. Ввиду малого шага между ними красные точки сливаются в сплошную линию. Как видно из -в, средний фактический шаг ПВ составил 4,0...5,25 м.

Так как применяемая система регистрации является слепой, пульт оператора сейсмостанции как таковой отсутствовал. Однако для контроля за процессом возбуждения, был организован мобильный пункт управления, целью которого был контроль за процессом возбуждения в целом, перемещением импульсной группы по участку исследований, а также за корректностью работы импульсной группы. Мобильный пункт управления был размещен на одном из вездеходов сопровождения. Из-за сложного релье-

► Рис. 5.
Система наблюдений.
а) – общий вид,
б) – увеличенный фрагмент,
в) – распределение шагов ПВ по всему объему.



фа, мобильный пункт управления при необходимости перемещался по площади наблюдений для обеспечения стабильной радиосвязи с импульсной группой.

Вся съемка выполнялась единым шаблоном – были установлены и активны все пункты приема, на которые велась регистрация. Импульсная группа при этом последовательно отработала все линии возбуждения.

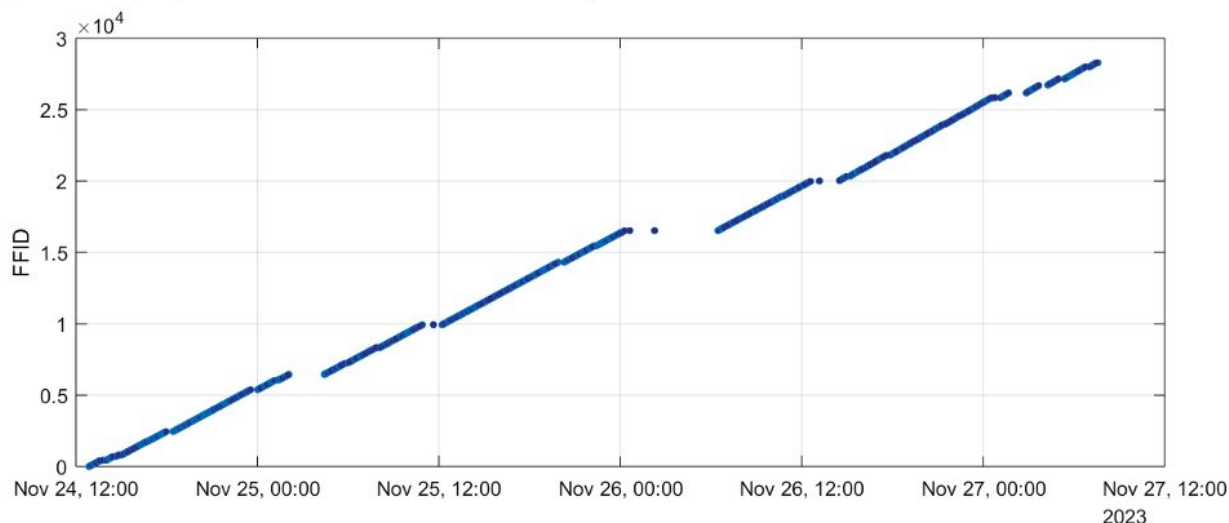
Так как скорость заряда конденсаторов применяемых источников позволяла

выполнять возбуждение с интервалом 6 секунд, для достижения шага между ПВ 5 м была выбрана скорость движения импульсной группы 3 км/ч.

Весь объем линий возбуждения, суммарной протяженностью около 120 км был выполнен менее чем за 72 часа. На приведен график выполнения возбуждения во времени. Возбуждение производилось круглосуточно, с небольшими технологическими окнами.

Всего было выполнено более 28 тыс. физнаблюдений.

▼ Рис. 6. Процесс выполнения съемки 3D во времени.



Общее время нахождения полевой партии на участке работ составило 14 дней, в которые входили подготовительные операции, тест на идентичность, съемка 2D и 3D, сбор нодов системы регистрации.

Контроль качества

Как уже отмечалось выше, классический контроль качества путем анализа сейсмограмм в реальном времени невозможен при использовании слепых регистрирующих систем. Однако, существует и иной подход к контролю качества, предлагаемый, например, компанией Sercel для высокоплотных данных (Tellier, 2018).

Суть подхода в следующем: при высокой плотности регистрации значимость одного физнаблюдения (или сейсмического канала) уменьшается. То есть, нет нужды контролировать каждую сейсмограмму, нужно стремиться к тому, чтобы среднее качество сейсмограмм было удовлетворительным.

В случае, если доподлинно известно, что сейсморазведка на конкретном участке дает результаты, известно, что уровень микросейсм находится на допустимом уровне (например, в случае слабых или отсутствующих ветровых помех), а самое главное – сейсморазведочное оборудование, как регистрирующее, так и возбуждающее, работает корректно, то нет предпосылок к получению некачественных данных. Случайные отклонения на одиночных сейсмограммах или приемниках с лихвой могут быть компенсированы высокой плотностью съемки.

Данный подход реализован и на описываемых работах.

Как уже отмечалось выше, перед началом съемки 3D был выполнен тестовый профиль 2D, продемонстрировавший наличие отраженного сигнала на

всем целевом интервале исследований. Эта съемка показала фактическую применимость сейсморазведки на конкретном разрезе, поэтому главной задачей полевой партии была необходимость обеспечения корректности работы полевого оборудования.

Регистрирующее оборудование может быть проконтролировано встроенными системами радиообмена, техническими параметрами: уровнем заряда батарей, результатами внутренних тестов. Что и было выполнено после установки пунктов приема на площади. Ввиду малой продолжительности съемки данная процедура не повторялась.

Особое внимание уделялось корректности работы импульсной группы. Перед началом полевых работ, а также на протяжении всего периода полевой съемки после каждой рабочей смены производилось техническое обслуживание источников:

1. Внешний осмотр оборудования и соединительных кабелей;
2. Осмотр элементов электродвигателей на предмет наличия усталостных трещин;
3. Проверка зазора электродвигателей;
4. Осмотр электронных компонентов на предмет выявления механических повреждений от работы источника;
5. Анализ записей с акселерометров и анализ технической информации о состоянии систем источников.

При выявлении проблем производилось обслуживание и ремонт источника для устранения неисправности.

Не менее важной задачей был контроль за стабильностью работы системы определения координат ПВ. Применяемое оборудование позволяло транслировать показания GNSS-системы на экран ноутбука в кабине тягача, что позволяло в

случае неисправности своевременно остановить съемку и устранить неисправность. Однако для повышения надежности получаемых данных после каждой рабочей смены осуществлялся анализ полученных данных для выявления возможных ошибок.

При выполнении съемки оборудование работало корректно. Поломок не было. Из важных отклонений было отключение базовой станции GNSS-системы, что понизило точность определения координат ниже критической. Неисправность была выявлена оперативно, и линия возбуждения, на которой она произошла, была пройдена импульсной группой еще раз. Сейсмограммы, полученные при отключенной базовой станции, были отбракованы.

Одиночные сейсмограммы с выявленными отклонениями в работе импульсной группы и системы навигации также отбраковывались.

Всего было зарегистрировано 28 275 ф.н. В работу после отбраковки принято 27 237 ф.н.

Результаты сейсмической съемки

Исходные полевые записи отличаются невысоким соотношением сигнал/помеха, особенно для сортировки ОПВ, на которой особенно хорошо проявляются поверхностные волны от буксирующего трактора, приходящие на всем времени регистра-

ции, в том числе до прихода головных продольных волн (Рис. 7).

Среднее соотношение сигнал/помеха составило 1,41 по всей площади работ (Рис. 8). Медианное – 1,29.

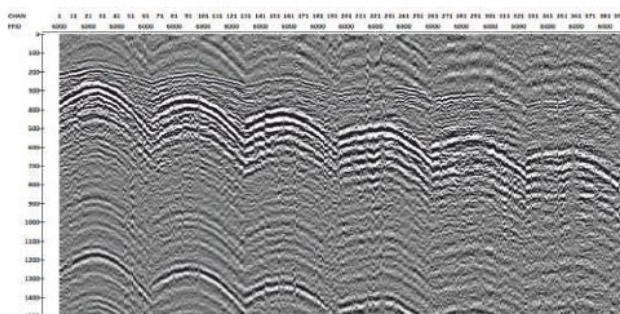
Однако это типичный результат для полевых материалов, получаемых при высокоплотной съемке в движении. Основное шумоподавление происходит при суммировании по ОГТ при высокой кратности. На Рис. 9. приведена получившаяся карта кратности для бина 25x25 м. Максимальные значения достигают 7000 отражений на бин в центральной области.

Тут нужно отметить, что приведенная карта учитывает все ПВ и ПП. Безусловно, при выполнении обработки сейсмограммы ОГТ ограничивались некоторым максимальным выносом, и реальная кратность была ниже. Однако в любом случае она оставалась очень высокой, что и позволило эффективно подавить шумы.

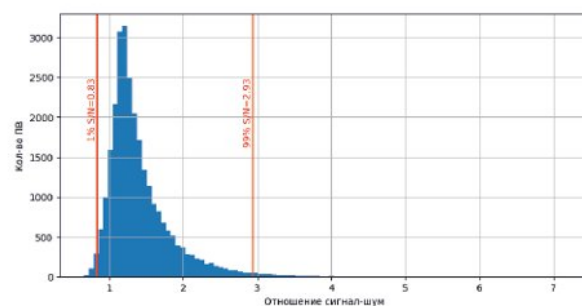
В результате обработки был получен сейсмический куб, признанный пригодным к интерпретации.

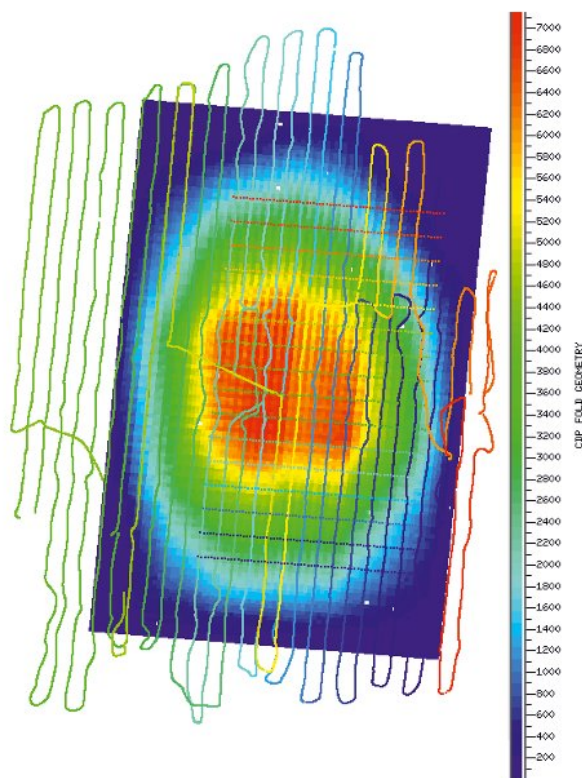
На Рис. 10. слева приведен пример одного из сечений куба. Яркие отражения на временах 500-600 мс – тунгусская свита низкоскоростных осадочных пород с прослоями магматических тел в ней. Целевая толща базальтовых траппов представлена над этими отражениями.

▼ Рис. 7. Пример сырых данных МОГТ 3D. Сейсмограмма ОПВ.



▼ Рис. 8. Гистограмма распределения соотношения сигнал/помеха.





▲ Рис. 9. Карта кратности для бина 25х25 м. Максимальные значения достигают 7000.

Как видно из рисунка, по сейсмическим данным хорошо прослеживается слоистое строение базальтового покрова. На фото справа это хорошо продемонстрировано.

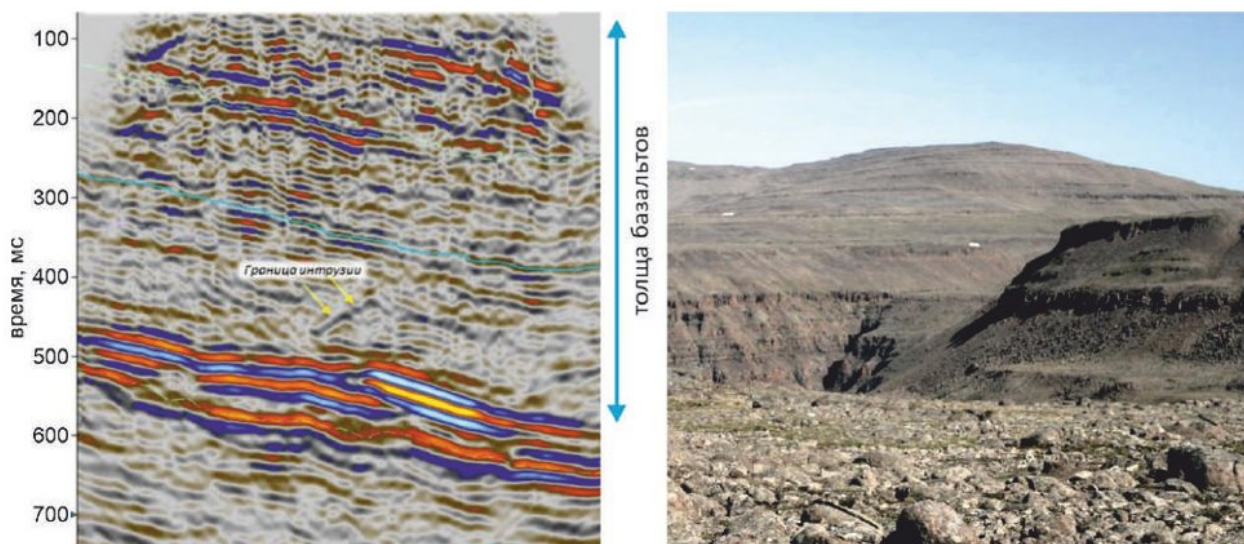
Изучаемое интрузивное тело оказа-

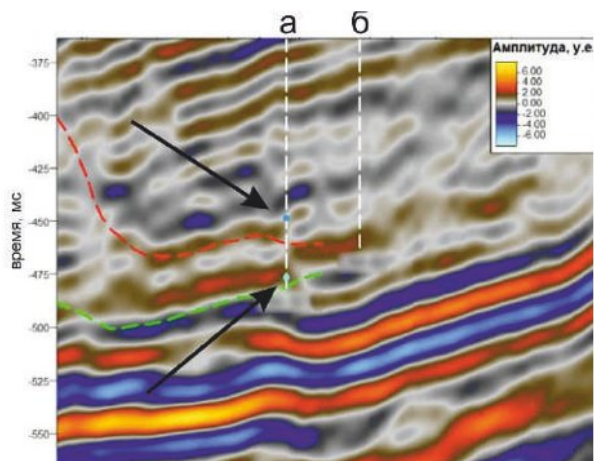
лось слабоконтрастным на фоне вмещающих пород. Разные элементы тела выделялись в разных атрибутах, различных представлениях. Однако применение правил корреляции сейсмической записи позволили восстановить интрузивное тело в объеме в полном соответствии с результатами бурения. Отклонения составляли первые десятки метров, что соответствует разрешающей способности сейсморазведки на таких глубинах.

На Рис. 11. приведен любопытный пример сейсморазведочных данных на краю интрузивного тела. Тело имеет сложную форму и переменную мощность, и утоньшается к краям. Скважина А на рисунке вскрыла как кровлю, так и подошву интрузии, а соседняя скважина Б нет. Мощность интрузии по данным бурения на этом участке составляет около 60-80 м. На сейсмической записи наблюдается разлом между скважинами, по которому кровля интрузивного тела могла опуститься ниже забоя скважины Б, либо внедрение магматического расплава могло быть остановлено разломом в направлении вправо по рисунку.

Рисунок демонстрирует детальность

▼ Рис. 10. Справа - пример сечения сейсмического куба с наиболее проявившейся границей интрузивного тела. Справа - слоистое строение базальтовых траппов плато Путорана.





▲ Рис. 11. Сейсмическая запись на краю интрузивного тела. Стрелками указаны кровля и подошва интрузии, вскрытые скважиной А. Скважина Б не вскрыла интрузивное тело. Пунктиром показаны корреляции кровли и подошвы интрузии.

получившихся сейсмических изображений, позволяющих при должных вводных производить корректную геологическую интерпретацию.

Помимо выделения границ в трапах и контуров самого интрузивного тела, неожиданно многочисленными оказались проявления тектонических нарушений (Рис. 12).

Еще более эффектным выглядит проявление тектонических нарушений в

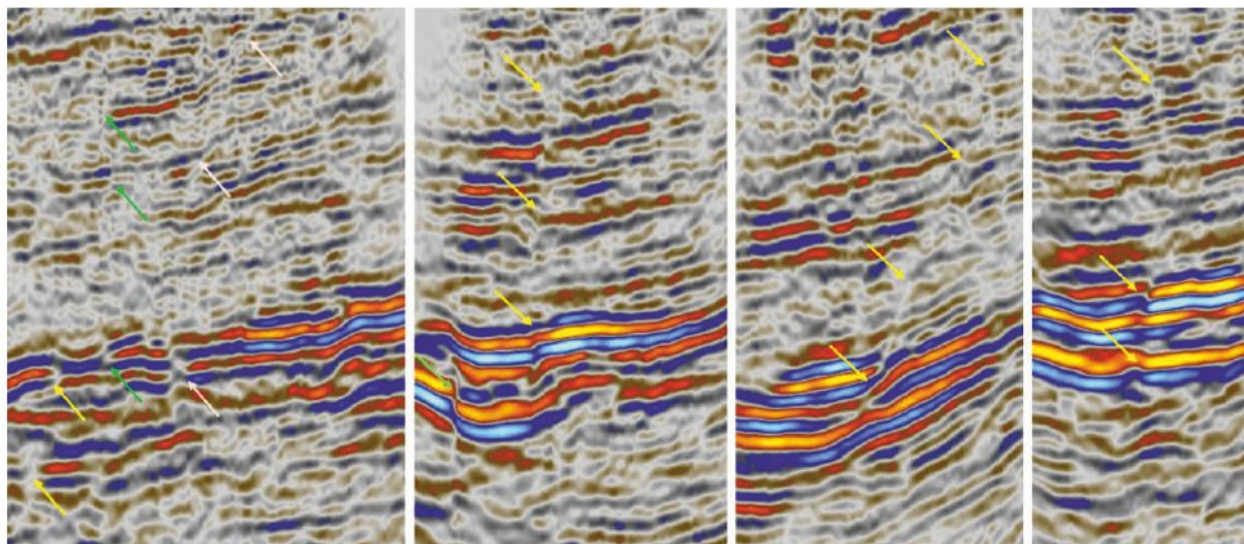
картах атрибута когерентность, рассчитанных по изохронам сейсмических горизонтов (Рис. 13). Отдельные разломы прослеживаются как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном. Как в волновом поле, так и в атрибутах когерентность и аналогичность. Наиболее яркие совпадают с разломами, известными ранее по результатам геологических исследований и бурения. Таким образом, нет сомнений в том, что получаемые разломы реальны, а не являются артефактом обработки шумных данных.

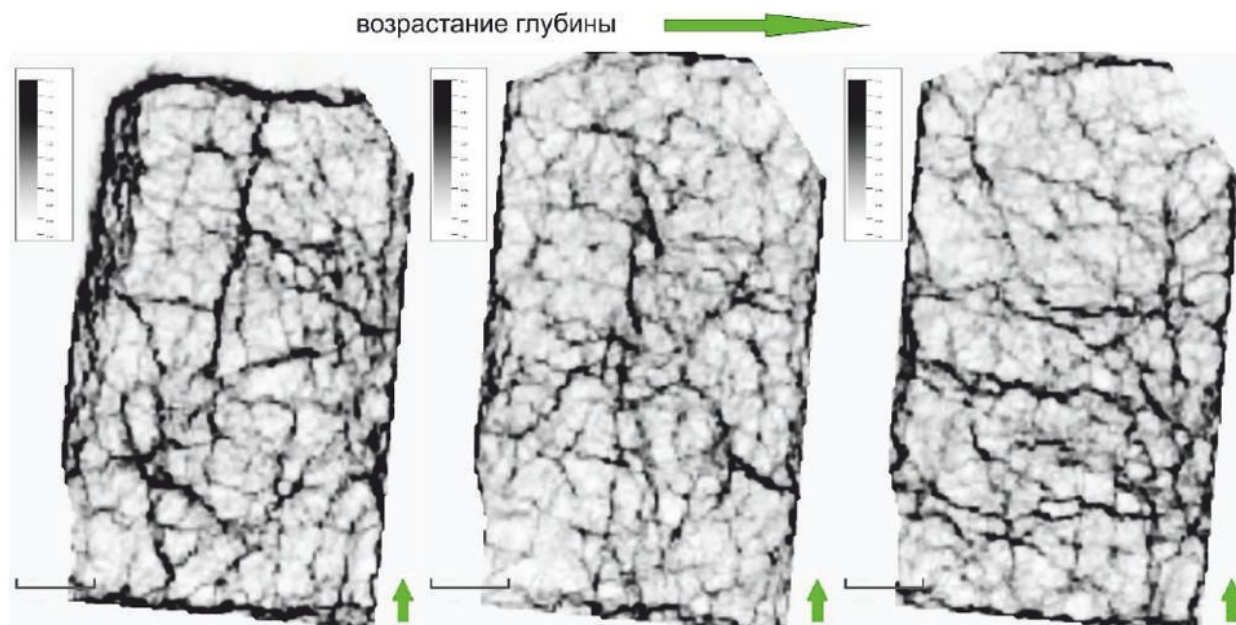
Выводы

Выполненные сейсморазведочные работы МОГТ 3D позволили решить все поставленные геологические задачи: изучить разрезы на глубину до 1,5 км, оконтурить интрузивное тело сложной формы, выявить тектонические нарушения.

Благодаря использованию бескабельной системы регистрации пункты приема были разложены на участке работ небольшим полевым отрядом за короткий срок. Отсутствие кабельных соединений позволило упростить пересечение линий возбуждения и приема и опера-

▼ Рис. 12. Выделение разломов на сейсмической записи. Стрелками разных цветов прослежены разные разломы





▲ Рис. 13. Выделение разломов в картах атрибута когерентность.

тивно менять траекторию перемещения импульсной группы без предварительной подготовки (изготовления «ворот» и т.п.).

Опыт выполнения работ вновь подтвердил значительные преимущества использования бескабельных регистрирующих систем над кабельными даже при отсутствии необходимости в рубке леса. Главным достоинством последних является получение и анализ сейсмических данных в режиме реального времени. Но простота и скорость развертывания и сбора бескабельных нодов, невиданная для кабельных систем гибкость в создании систем на наш взгляд перевешивают невозможность контроля данных онлайн. При должной модификации подхода к контролю качества вполне допустимо успешное применение даже слепых нодальных систем. А если учесть, что в настоящее время развиваются бескабельные системы, позволяющие хотя бы частично считывать зарегистрированные сейсмические данные без снятия нодов с профиля, то отказ от кабельных систем представляется лишь

делом времени.

Принципиально важным является вывод о применимости сейсморазведки для изучения трапповых отложений. Последние, как правило, являются осложняющим сейсмические данные фактором, однако опыт авторов показывает, что это по крайней мере не всегда так. Надежно зарегистрированы отражения не только в толще траппов, но и от сложноустроенной подошвы, а также от границ ниже нее. Вероятнее всего мощности применяемой группы из двух маломощных «Енисей СЭМ-50» было недостаточно для получения более глубоких отражений из-за наличия контрастной границы, однако при увеличении мощности излучателя, есть шансы получить разрез на большую глубину.

При анализе финальных сейсмических разрезов может возникнуть впечатление, что они очень зашумлены и отличаются от классических «гладких» разрезов, получаемых в нефтяной сейсмике по классической технологии. Это предположение подкрепляется сильно зашумлен-

ными исходными полевыми данными.

Непривычный результат действительно может быть следствием шумов. Прямое сравнения материалов, полученных разными технологиями на конкретном разрезе нет. Но не стоит забывать о том, что изучаемый геологический разрез отличается от классических осадочных разрезов, к которым привыкли сейсмики.

В статье (Турчков и др., 2022) авторы сравнивали результаты, полученные по технологии съемки в движении с аналогичными данными, полученными по классической технологии с остановками на каждом ПВ. Съемка также выполнялась на трапповых отложениях. Результаты, хоть и были невыразительными с точки зрения геологического строения, однако продемонстрировали полную идентичность разрезов ОГТ и даже небольшое расширение спектра вправо при съемке в движении.

Кроме того, опыт авторов на работах по этой технологии съемки на осадочном разрезе показал, что при сравнении с архивной 2D съемкой, выполненной с применением взрывного источника, данные, получаемые при высокоплотном возбуждении в движении как минимум не хуже, а часто лучше (Ошкин и др., 2023).

Кажущаяся шумность данных может быть следствием развитой системы разломов (Рис. 13), работающих как рассеиватели сейсмического сигнала.

Большой практический интерес представляет собой выполнение инверсии полученных сейсмических данных. По имеющейся информации породы интрузии отличаются повышенными плотностями, и должны хорошо выделяться на результатах инверсии. Теоретически, инверсия позволила бы выделять и

значительно более мелкие рудоносные объекты. Возможно, позволила бы расчленить само интрузивное тело с выделением отдельных областей, отличающихся степенью оруденения. Однако инверсия требует наличия качественных данных ГИС, в первую очередь данных акустического каротажа, который в исследованиях на ТПИ не входит в комплекс ГИС. Поэтому выполнить инверсию не было технической возможности. Тем не менее, авторы считают, что в перспективе такое дополнение результатов сейсморазведки МОГТ может показать значительный рост информативности съемки.

Авторы ожидают, что в будущем можно будет улучшить результат и экономическую эффективность выполнения сейсмики на ТПИ, путем оптимизации технологий и работы оборудования, путем расчета более оптимальных систем наблюдений. Потенциал возбуждения импульсными источниками в движении раскрыт далеко не полностью.

Литература

1. Звездов В. С. Механизмы внедрения базитовой магмы в многослойную толщу чехла Восточно-Сибирской платформы и влияние деформационных свойств пород на размещение и морфологию рудоносных трапповых интрузивов (на примере Норильского района) – Отечественная геология., 2020., №. 3., с. 47-74.
2. Ошкин А. Н., Турчков А. М., Бурденко А. А., Вязниковцев А. А., Гладилов Д. В., Мосягин Е. В., Детков В. А. Сейсморазведка малых объектов: быстро, качественно, недорого. – Приборы и системы разведочной геофизики, 4(79)/2023., с.52-60.
3. Турчков А. М., Ошкин А. Н., Детков В. А., Мосягин Е. В., Воронцов В. В. Опыт

применения высокопроизводительного способа получения сейсмических данных в районе действующих рудников ПАО «Норильский Никель». – Приборы и системы разведочной геофизики, 1(72)/2022.

4. Tellier N., Wilcox S. Confidence in data recorded with land seismic recorders // First Break. 2018. vol. 36 issue 1 pp: 53-59

Подробнее об авторах



Ошкин

Александр Николаевич

Технический директор ООО "Соника", ассистент кафедры Сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М. В. Ломоносова.



Турчков

Алексей Михайлович

Ведущий геофизик ООО "Соника", ассистент кафедры Сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М. В. Ломоносова.



Воробьев

Юрий Вадимович

Главный специалист Управления Исследований и Развития ООО "Норникель Технические сервисы"



Бурденко

Александр Андреевич.

Геофизик ООО "Соника", аспирант кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ имени М. В. Ломоносова.



Вязниковцев

Андрей Александрович

Геофизик ООО "Соника", аспирант кафедры Сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М. В. Ломоносова.



Детков

Владимир Алексеевич

ООО «Красноярскнефте-геофизика». Кандидат технических наук.