

УДК 550.834:553.81

Оконтуривание кимберлитовой трубки на основании данных сейсморазведочных работ МОГТ 3D

■ Душкин А.Б.¹, Лаптев А.П.¹, Мамедов О.Г.¹, Мифтахутдинова Е.В.¹, Пенделяк Р.Н.², Пятунина Е.В.¹, Спешиллов В.И.¹, Устинов В.Н.², Шелковникова И.Ф.¹.

¹ ПАО «Пермнефтегеофизика», г.Пермь.

² АО «АГД Даймондс», г.Архангельск.

Аннотация. В статье представлены результаты опытно-методических сейсморазведочных работ МОГТ 3D, проведённых на одной из кимберлитовых трубок Зимнебережного алмазонасного района Восточно-Европейской провинции на территории лицензионного участка АО «АГД ДАЙМОНДС». Целью исследований являлось уточнение строения трубки высокоплотными сейсморазведочными работами МОГТ 3D и решение вопроса об эффективности их использовании в комплексе поисковых работ на алмазы. Работы проводились в условиях залесённой и заболоченной местности с использованием малогабаритных буровых установок и пиропорохового заряда в качестве источника возбуждения. Выполнялись небольшим количеством специалистов широкого профиля. На основе обработки и интерпретации данных полевых наблюдений удалось уверенно выделить тело кимберлитовой трубки, уточнить её положение в плане и в разрезе, выявить особенности строения и связанные с ней зоны нарушения корреляции отражений. Полученные данные подтверждают высокую эффективность сейсморазведочных работ МОГТ 3D для выявления коренных месторождений алмазов в сложных поисковых обстановках.

Ключевые слова: сейсморазведка МОГТ 3D, кимберлитовая трубка, пиропороховой заряд, сейсморужье, оконтуривание, статические поправки.

В последние годы в геофизической практике наблюдается устойчивый рост интереса к применению методов высокоразрешающей сейсморазведки при поисках и разведке твердых полезных ископаемых. Особенно активно развиваются технологии МОГТ 3D для картирования рудных тел сложного строения, локализации зон трещиноватости и уточнения морфологии магматических объектов. В отличие от традиционных задач нефтегазовой геофизики, объекты рудной геологии характеризуются существенно меньшими размерами, высокой латеральной изменчивостью и сложными скоростными условиями, что предъявляет повышенные требования к плотности систем наблюдений и устойчивости возбуждения упругих колебаний.

Кимберлитовые трубки являются основными коренными источниками алмазов диаметром от первых десятков до

сотен метров. Традиционные геофизические методы (магниторазведка, гравиразведка, электроразведка) часто дают неоднозначные результаты из-за сложного геологического строения и экранирующего влияния четвертичных отложений. Данные методы эффективно применяются на поисковой стадии, однако обладают ограниченной вертикальной разрешающей способностью и не позволяют достоверно восстанавливать внутреннюю морфологию объектов. Некоторые исследователи считают, что возможен пропуск до 20% кимберлитовых тел девон-раннекаменноугольного возраста, особенно на площади развития вендских отложений осадочного чехла [1, 3].

Например, магниторазведка традиционно используется при поисках кимберлитовых трубок благодаря повышенной магнитной восприимчивости кимберлитов, обусловленной присутствием магнетита

и пикроильменита. Амплитуда аномалий магнитного поля варьирует от первых нТл до тысяч нТл.

Основными преимуществами магниторазведки являются:

- высокая производительность;
- относительно низкая стоимость;
- возможность быстрого обследования больших территорий;
- эффективность на региональных стадиях поисков.

Вместе с тем метод обладает рядом ограничений:

- неоднозначность интерпретации;
- низкая вертикальная разрешающая способность;
- невозможность достоверного определения внутреннего строения объекта;
- слабая чувствительность к немагнитным кимберлитовым фациям;
- наличие искажающего эффекта, который вносят трансформации поля. Азимут простирания длинных осей трубок не совпадает с простиранием аномалий, их сопровождающих [1].

К другим проблемам, замедляющим открытие месторождений алмазов на северо-западе РФ также относят:

- на многих известных перспективных площадях не выполнен достаточный комплекс геолого-геофизических исследований;
- на ряде перспективных площадей не проведена заверка аномалий бурением;
- фонд относительно легко открываемых месторождений алмазов на большей части территорий к настоящему времени исчерпан [8].

Для поиска трубок взрыва на территории Зимнебережного района применялись и методы сейсморазведки МОГТ с 80-х годов прошлого столетия. Результаты данных работ показали, что кимберлитовые трубки отображаются в волновых полях, образуя волновые эффекты: образование зоны тени, увели-

чение интенсивности низкочастотных компонент, сужение полосы частот и нарушение когерентности спектров, образование локальных аномалий времен прихода отраженных и преломленных волн, локальное прекращение корреляции мелких горизонтов во вмещающих породах [3]. Аналогичные признаки подмечены при проведении сейсморазведочных работ на различных зарубежных объектах, например в Австралии [9].

При поисках алмазоносных трубок на территории Сибирской провинции применялся метод высокочастотной сейсморазведки ОГТ 2D. В отличие от строения кимберлитовмещающих пород Зимнебережного района осадочный чехол в районе якутских трубок взрыва сложен терригенными и терригенно-карбонатными толщами пород рифея и венда, кембрийской, ордовикской систем, мезозоя и кайнозоя. Высокочастотной сейсморазведкой 2D установлено, что в плане трубки имеют изометричную форму, в волновом поле проявляются в виде аномальной зоны отсутствия корреляции отражающих горизонтов. Однако, наибольший интерес при опосредованном и планировании разработки кимберлитовых трубок связан с геологическим строением верхней части разреза и обычная сейсморазведка не может в полной мере решить эту задачу, т.к. верхняя часть характеризуется низкой кратностью сейсмических данных. Необходимо применение пространственной системы наблюдений с широким набором азимутов и удалений и плотной сетью наблюдений. Так на нескольких малоразмерных перспективных объектах Сибирской платформы было принято решение об инициации внедрения технологии трехмерной сейсморазведки с предварительным моделированием систем наблюдений [6].

Результаты моделирования трехмерной съемки, выполненные сотрудниками ПАО «Пермнефтегеофизика», показали,

что сеть профилей с расстояниями более 50 м (например, между профилями возбуждения 100 м и профилями приема 50 м) не позволит непрерывно проследить верхний, перекрывающий трубки, горизонт и, следовательно, решить геологическую задачу в полной мере. Выбрана оптимальная методика наблюдения, обеспечивающая достижение кратности 20 в верхней части разреза: сеть профилей приема и возбуждения с расстояниями 50 м, шаг по пунктам приема 5 м, по пунктам возбуждения 10 м, расстановка 8 линий по 100 каналов, [6]. С помощью предложенной методики 3D возможно получение объемного изображения недр, уточнение морфологических параметров трубок, строения покрывающих пород и картирование зон нарушения сплошности разреза, связанных с трубками взрыва. Дополнительным преимуществом является возможность применения атрибутного анализа для выделения зон нарушения когерентности, деформации отражающих горизонтов и локальных изменений волнового поля.

При этом необходимо отметить основные недостатки высокоплотных съемок МОГТ 3D:

- высокая стоимость полевых работ;
- сложность логистики;
- значительный объем и длительность обработки;
- зависимость качества данных от условий возбуждения.

Для северных лесисто-болотистых территорий России дополнительными ограничениями являются экологические требования к подготовке профилей, высокая стоимость мобилизации тяжелой техники и организации складов взрывчатых веществ (ВВ).

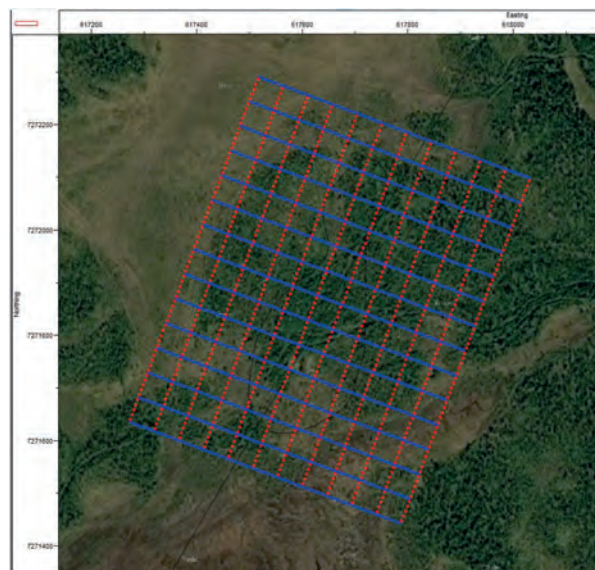
В связи с этим актуальной темой становится разработка компактных экологосберегающих технологий сейсморазведки, обеспечивающих необходимое

качество данных при минимальных затратах.

Основной задачей опытно-методических сейсморазведочных работ 3D 2026 года в Зимнебережном алмазоносном районе являлась апробация и оптимизация методики работ в условиях заболоченной и залесенной местности (Рис.1) с минимальным воздействием на окружающую среду с целью уточнения строения перспективной кимберлитовой трубки «В» на малых глубинах высокоплотными сейсморазведочными работами МОГТ 3D [4].

Объект исследований «В» открыт в 1988 году в результате поисково-оценочных работ и в плане представляет собой трубку с двумя подводщими каналами, образующую на погребенной поверхности правильный овал размером 340х205м, длинная ось которого ориентирована в север-северо-восточном направлении. Сложена образованиями жерловой и кратерной фаций. Жерловая фация представлена туфобрекчиями и ксенотуфобрекчиями, кратерная - туфопесчаниками, туфоалевролитами, брекчиями осадочных пород, туфами и туффитами. [5, 7]. Трубка прорывает толщу терригенных пород верхнего венда, залегающих на архейско-протерозойском кристаллическом фундаменте (или на

▼ Рис. 1. Обзорная схема района работ.





◀ Рис. 2. Условия выполнения опытно-методических работ 3D по профилям возбуждения (слева) и профилям приема (справа).

породах верхнего рифея). Отложения венда представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов. В толще вендских пород (до 900-1100 м) выделяют три свиты (снизу вверх): усть-пинежская, на 60% состоящая из алевролитов и аргиллитов (40%), мезенская, представленная в основном алевролитами (до 75%) и падунская, в объеме которой песчаники составляют до 75% объема [2]. Породы вендского комплекса со стратиграфическим перерывом перекрываются маломощными среднекаменноугольными и четвертичными образованиями общей толщиной до 80 м.

Полевые сейсморазведочные работы МОГТ 3D выполнены силами ПАО «Пермнефтегеофизика» на участке площадью 0,382 кв.км, расположенном восточнее месторождения им. В. Гриба. Для минимизации расходов было принято решение проводить работы сокращенным составом сейсмопартии. Общая численность сейсмопартии составила 22 человека (5 инженерно-технических работников, 17 рабочих). Работы проводились с использованием небольшого количества колесной техники, снегоходов «Буран» и малогабаритных буровых установок «УБШМ-1-13» производства ОАО «Курганавторемонт» (Рис.2).

В отличие от традиционных схем проведения сейсморазведки не потребовалось:

- рубка леса – подготовка профилей ограничивалась визирками расширение просек;
- применение тяжелой гусеничной техники;
- организация складов взрывчатых веществ;
- использование специализированного транспорта для перевозки ВВ.

В качестве источника возбуждения предложено применение сейсморужья с пиропороховыми патронами промышленного типа (Рис. 3).



▲ Рис. 3. Сейсморужье.

Глубина бурения выбиралась с учетом необходимости возбуждения упругих колебаний в плотных обводненных глинах. Литологический разрез верхней части в зоне исследований представлен (по данным керна поисковых скважин и шлама буровых скважин): до 0.2 м – почвенный

слой; от 0,2 м до 2-3 м – торф; от 2-3 м до 3-3,5 м – песчаник с глинистыми примесями; от 3-3,5 м до 6 м – плотная обводненная глина.

Перед началом основных работ были выполнены опытные наблюдения на двух типах рельефа: заболоченном участке и лесной территории. В ходе опытных работ исследовались следующие параметры:

- глубина скважин 3 и 6 м;
- количество патронов 1 и 2;
- количество накоплений 1 и 2;
- для сравнения использовались заряды ВВ массой 0,075 и 0,150 кг.

Анализ данных выполнялся в программном комплексе SeisPro (модуль QCONTR).

Задача работ состояла не в демонстрации превосходства ВВ, а в обосновании возможности использования порохового источника как полноценной альтернативы для высокоплотной сейсморазведки.

По результатам опытных работ определены оптимальные параметры возбуждения сигнала (глубина бурения 6 м, 1 патрон, 1 накопление). Качество оценивалось исходя из визуального анализа

сейсмограмм и комплексной оценки амплитудно-частотных характеристик сейсмической записи в интервале целевых отражений. После бурения скважины сейсморужье погружалось через полый шнек на глубину 6 м, далее происходил пуск заряда (Рис. 4). Использовалась энергия пороховых газов, выделяющихся при сгорании заряда пороха в замкнутом объеме, образуемого между патроном сейсморужья и дном скважины. Источник обеспечивал генерацию волнового поля широкого частотного диапазона с интенсивностью, достаточной для регистрации отраженных волн в изучаемом интервале глубин. Результаты опытных наблюдений показали, что качество записи с ВВ в данных условиях выше, однако стабильность импульса у сейсмического ружья выше благодаря закрытой камере сгорания, обеспечивающей одинаковую энергию от выстрела к выстрелу.

Следует отметить, что эффективность порохового источника ограничивается глубиной исследований и существенно зависит от литологических условий верхней части разреза. В условиях сухих рыхлых песчаных грунтов, а также при

▼ Рис. 4. Процесс погружения сейсморужья в полый шнек.



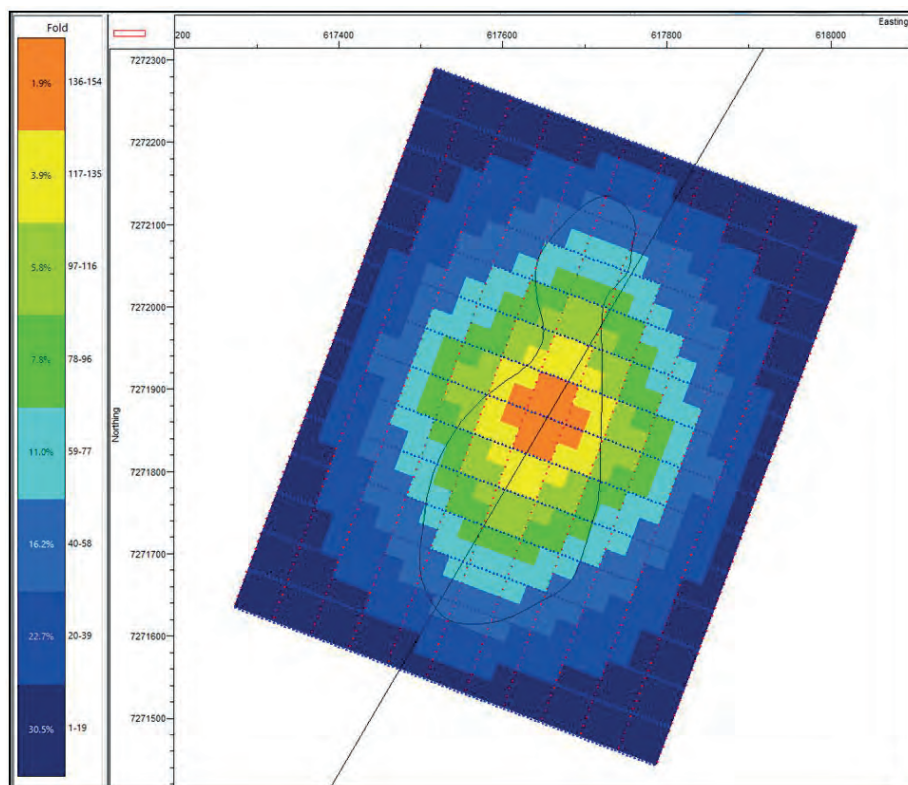


Рис. 5. Карта эффективной кратности.

глубинах более 600–800 м энергия источника может оказаться недостаточной для получения устойчивых отражений. В подобных условиях потребуются увеличение числа патронов либо использование малых зарядов ВВ.

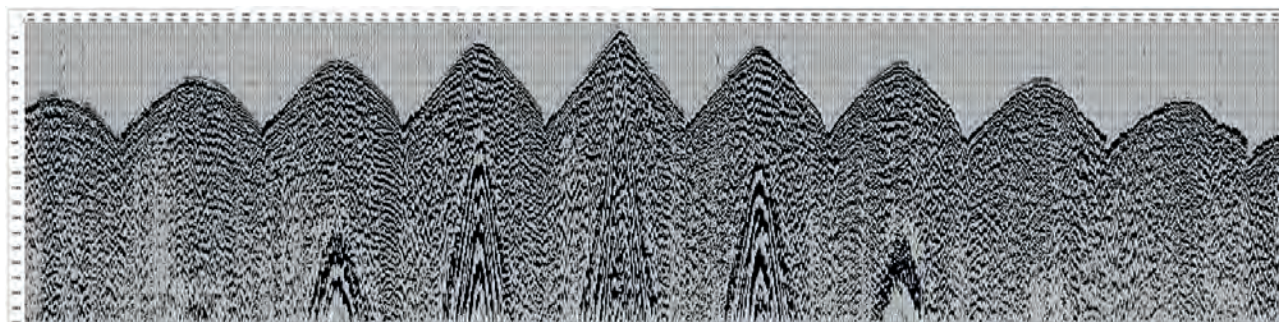
В процессе опытно-методических работ применена ортогональная асимметричная центральная система наблюдений: шаг ПП – 5 м; шаг ПВ – 10 м; расстояние между линиями ПП и ПВ – 50 м; активных каналов для каждого ПВ – 1650 (15 линий × 110 каналов); максимальная кратность в пределах контура трубки – 154 (бин 2.5 м × 5 м) (Рис. 5). Сейсмоприёмники – «GS-ONE»; сеймостанция – «G3i NXT» компании «INOVA»;

длина записи 2 с, шаг дискретизации 0.25 мс. Общий объем работ составил 0.382 км², 840 физических наблюдений. Асимметричная система наблюдений обеспечивала более равномерное азимутальное освещение крутонаклонных границ и способствовала улучшению качества изображения стенок трубки.

Кондиционное качество полевого материала (Рис. 6) обеспечило последующую качественную обработку и интерпретацию данных.

На этапе предобработки сейсмический куб и данные бурения загружены в базу данных интерпретационного комплекса KINGDOM. Предобработка дан-

Рис. 6. Фрагмент сейсмограммы. Глубина бурения 6 м.



Преобразование данных во внутренний формат системы «Geovation». Анализ качества исходных данных
Формирование и присвоение геометрии, контроль качества
Расчёт априорных статических поправок по методу взаимных точек с использованием первых вступлений преломленных волн
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (первая итерация)
Компенсация амплитуд за затухание
Подавление высокоамплитудных шумов (процедура гармонизации амплитудно-частотного спектра)
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (вторая итерация)
Динамическое выравнивание амплитуд в широком окне для группы, состоящей из всех трасс внутри сейсмограммы ОПВ
Потрассная деконволюция
Полосовая фильтрация
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (третья итерация)
Подавление линейных волн-помех с помощью разложения Радона по сейсмограммам ОПВ и ОПП
Автоматическая коррекция статических поправок (четвертая итерация) и скоростей суммирования
Получение суммарного временного куба
Динамическое выравнивание амплитуд в широком окне
Фильтрация в F-K-области по кубу
Амплитудная деконволюция по кубу

▲ Табл. 1. Граф обработки.

ных выполнялась в системе «Geovation» по графу, представленному в таблице 1.

Волновое поле характеризуется:

- хорошим качеством первых вступлений, что обеспечило надёжное статическое решение;
- наличием интенсивных низкочастотных линейных помех (поверхностные волны до 20-25 Гц), успешно подавленных на этапе обработки;
- высоким уровнем когерентности отражений в верхней части разреза (до 0.25-0.3 с);
- постепенным снижением энергии и усложнением волновой картины с глубиной.

Анализ суммарного куба ОГТ после предварительной обработки в комплексе «Geovation» показал уверенную корреляцию отражающих горизонтов в интервале до 1 с, наиболее выдержанные

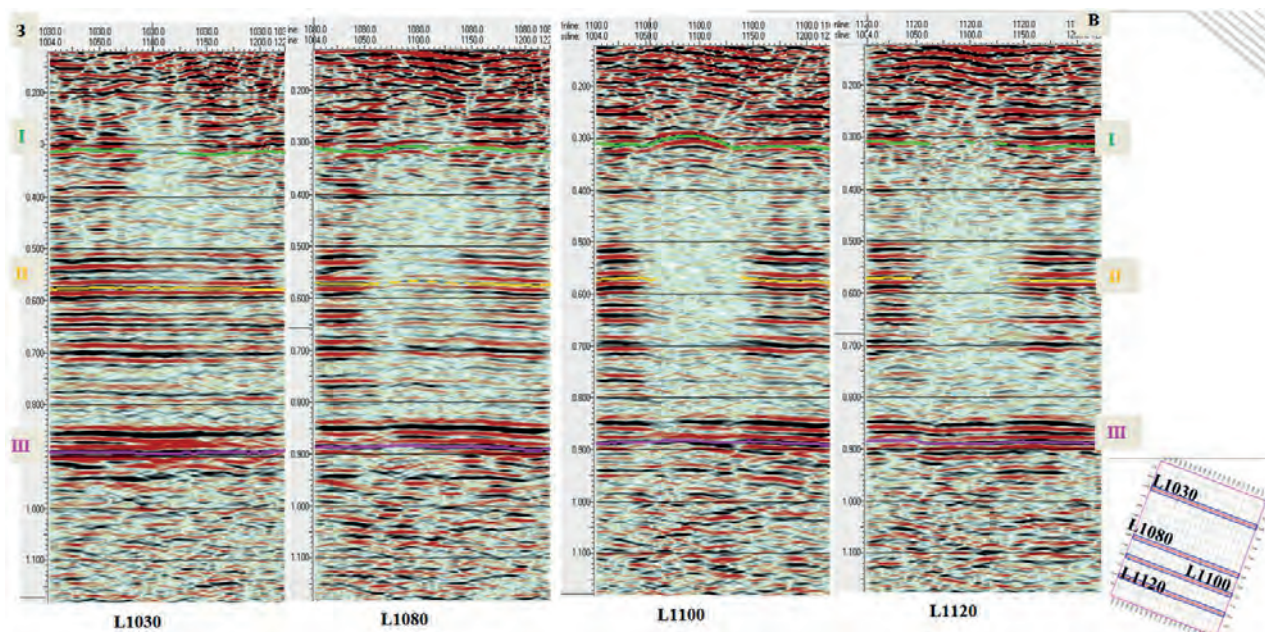
из них предварительно прослежены в разрезе, отмечены зоны потери корреляции, которые можно интерпретировать как внедрившиеся породы трубки (Рис.7).

Кимберлитовые трубки отобразились и на карте среднеквадратичных амплитуд по кубу пониженными амплитудами, оконтурены две области (Рис. 8) на юге и севере площади.

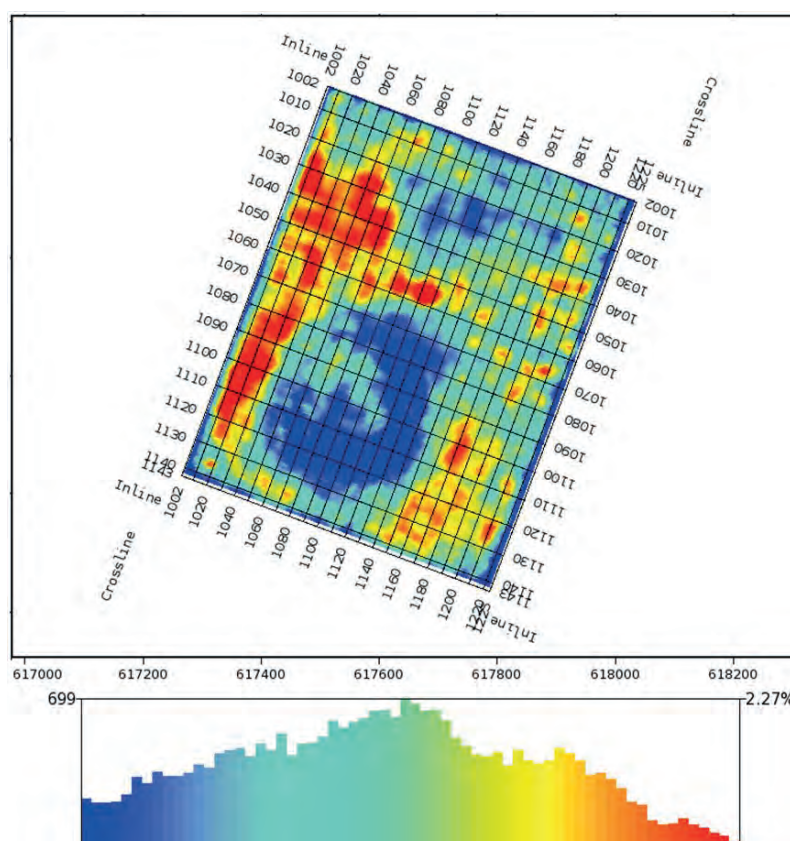
Главным результатом предварительной интерпретации стало прямое картирование кимберлитовой трубки по комплексу признаков:

1) Зона ослабления энергии отражений – в центральной части куба наблюдается значительное снижение амплитуд отражений и ухудшение когерентности записи.

2) Нарушение корреляции – на вертикальных срезах (Inline и Crossline) чётко



▲ Рис. 7. Корреляция на вертикальных срезах куба с постобработкой.



▲ Рис. 8. Карта среднев-
дратичных амплитуд по кубу.
Окно 300-600 мс.

видна вертикальная зона отсутствия или сильного искажения отражений, типичная для тел трубок взрыва.

3) Поведение атрибутов:

- пониженные значения RMS-амплитуд – демонстрируют приуроченность зон пониженной энергии к телу трубки;
- низкие значения параметра Confi-

dence (Рис. 9) (автоматического отслеживания горизонтов – параметра когерентности трасс) – ниже 0.6-0.7с – области белого и синего цвета (низкая уверенность) точно оконтуривают положение трубки;

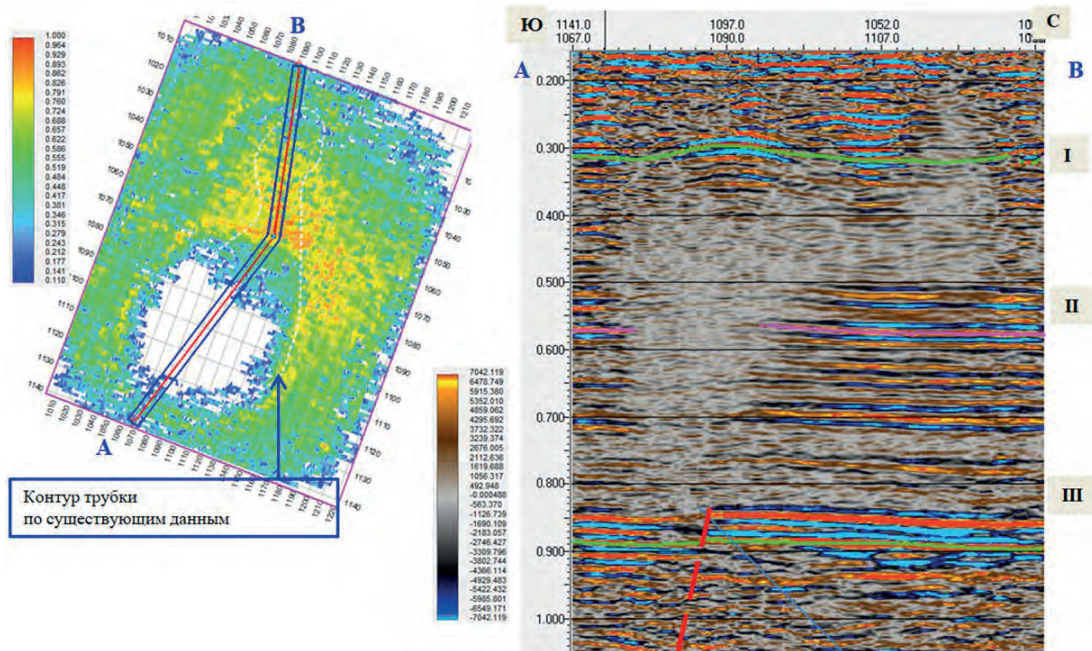
- значения параметра Dip (Рис. 10) (наклона отражений) вдоль горизон-

тов на временах 0,3, 0,57с – показывают аномальные зоны деформации разреза над телом трубки и вокруг нее;

- уровень частот и соотношение сигнал/помеха – подтвердили высокую надёжность данных.

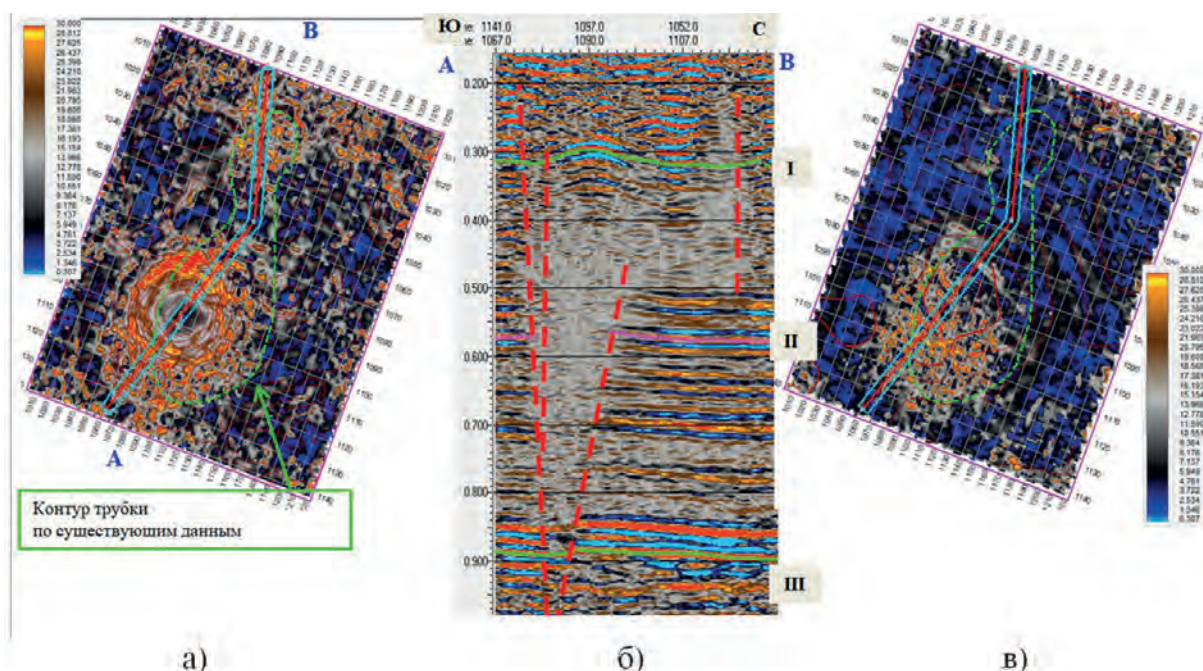
Основное тело трубки выделяется в южной части на временах $\sim 0.32 \div 0.85$ с. Наблюдается смещение тела на запад

относительно контура по архивным данным. На уровне времен 0,9 с фиксируются тектонические нарушения. Впервые установлено, что северная трубка не имеет отдельного корня, а является спутником (боковым кратером) южной трубки. Зона отсутствия корреляции начинается значительно выше по разрезу (0.2-0.5 с) и не перекрыта выдержанными отражениями в верхней части.



▲ Рис. 9. Карта параметра Confidence вдоль ОГ II и вертикальный срез куба амплитуд по линии A-B.

▼ Рис. 10. Карты параметра Dip вдоль горизонтов на временах 0,3 с (а), 0,57 с (в) и разрез по линии A-B (б).



На вертикальных срезах куба вдоль длинной оси трубки хорошо видна вертикальная «зона» нарушения когерентности, различие в проникновении тела трубки вверх и вниз по разрезу в глубине залегания кровли между южной и северной частями, возможные тектонические нарушения, сопровождающие внедрение кимберлита.

Преимущества сейсморазведки МОГТ 3D (по результатам проведенных работ):

- объёмное изображение локального участка недр, позволяющее даже на этапе предобработки оконтуривать тело трубки в пространстве и определять её морфологию (в данном случае – смещение южной части на запад и вероятный боковой кратер на севере);
- высокая разрешающая способность по глубине и латерали, благодаря высокой кратности и плотной системе наблюдений;
- прямая визуализация зон нарушения когерентности отражений, ослабления энергии записи и изменения параметров атрибутов (RMS-амплитуды, Confidence, Dip), что даёт структурно-вещественную информацию;
- надёжное определение глубины залегания кровли и подошвы трубки при проведении стратиграфической привязки и наличии скоростных законов для перевода из времени в глубину, а также связанных тектонических нарушений.

Для детального оконтуривания, уточнения пространственного положения и морфологии кимберлитовой трубки сейсморазведка МОГТ 3D значительно превосходит другие геофизические методы. При поисках погребённых кимберлитовых тел в условиях Зимнебережного алмазоносного района применение высокоплотной 3D-сейсморазведки позволит существенно повысить эффективность последующего бурения и снизить геологические риски. Оптимальной стратегией при выполнении геологоразведочных

работ является комплексное применение электро-, магниторазведки и сейсморазведки МОГТ 3D.

Опытно-методические работы, проведенные на объекте «В», показывают хорошую эффективность МОГТ 3D при решении задач оконтуривания кимберлитовых тел. Полученные предварительные результаты подтверждают высокую разрешающую способность методики работ при использовании экологически щадящих источников возбуждения. Результаты демонстрируют целесообразность применения малогабаритной техники и пиропорохового источника возбуждения при оконтуривании кимберлитовых трубок. Высокая кратность и плотная система наблюдений позволяет оконтурить даже относительно небольшие тела. Особенности волнового поля (высокий фон низкоскоростных помех, в том числе поверхностных волн-помех), типичные для торфяно-глинистого разреза, успешно подавлены в процессе обработки данных.

В 2026 году разработанная технология и основные результаты выполненных работ были представлены на IV ежегодном Форуме «Арктика – Регионы», который проходил 13–14 августа в Архангельске. Методика может быть рекомендована к включению в комплекс геологоразведочных работ при поисках погребённых коренных месторождений алмазов на площадях Зимнебережного района и других территорий древних платформ со сходными геолого-поисковыми обстановками.

Литература

1. Данилов К.В. Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области). Диссертация на соискание ученой степени кандидата фи-

- зико-математических наук. Архангельск, 2017. – 181 С.
2. Кротков В.В., Кудрявцева Г.П., Богатилов О.А. и др. Новые технологии разведки алмазных месторождений. – М.: ГЕОС, 2001. – 310 С.
3. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. – Архангельск: ИПП «Правда Севера», 2004. – 283 с.
4. Опытнo-методические сейсмoразведочные работы МОГТ 3D при поисках кимберлитовых тел в Зимнебережном алмазоносном районе. Отчет СП №15 ПАО «Пермнефтегеофизика», 2026.
5. Пенделяк Р.Н. Веричев Е.М., Головин Н.Н. Месторождение им. В.Гриба: геологическое строение и алмазоносность // Горный журнал, 2014, №3, стр.16-21.
6. Столбова Т.А., Максимкина Л.В. Опыт проектирования сейсмических работ 3D для разведки малоразмерных алмазоносных объектов в Республике Саха (Якутия) // Материалы конференции «Геомодель – 2012». Россия, г. Геленджик, 2012 г.
7. Устинов В.Н., Неручев С.С., Загайный А.К. и др. Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы.- СПб.: Наука, 2021.- 410 С.
8. Устинов В.Н., Антащук М.Г., Загайный А.К. и др. Перспективы выявления месторождений алмазов на севере Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы, 2018, №1. С-11-26.
9. M. Urosevic. Surface and borehole seismic methods to delineate kimberlite pipes in Australia.-TLE, July 2000.