

Комплексирование модификаций метода ВСП при изучении кимберлитовых тел в Якутии

- Ошкин А.Н., Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова и ООО «Неоген»
- Шехтман Г.А., Институт инновационных инженерных технологий РУДН
- Игнатьев В.И., ООО «Геодавайс»
- Гончаров Е.М., ПАО АК «АЛРОСА»

Опытнo-методические работы методом ВСП проводили на участке расположения Сюльдюкарского кимберлитового тела. Применяли разные методики прямого ВСП: азимутальное ВСП из 6 азимутов и непродольное ВСП (НВСП) из системы разноудаленных пунктов возбуждения (ПВ). Кроме того, использовали обращенное ВСП при возбуждении колебаний в скважине спаркером и регистрации колебаний на земной поверхности. Для всех модификаций метода ВСП, использованных в работах, исследованы волновые сейсмические поля, полученные на каждой из компонент в локальных системах координат XYZ и PRT. После выделения продольных и обменных отраженных волн путем лучевой миграции были получены изображения среды в виде глубинных разрезов. Сопоставление между собой разрезов, полученных для разных азимутов и разных участков окрестностей кимберлитового тела, позволило сделать важные методические выводы. Установлено, что присутствие фрагментов кимберлитового тела проявляется на разрезах и в волновых сейсмических полях резким ухудшением прослеживаемости осей синфазности, расщеплением поперечных волн, а также появлением на глубинных разрезах сдвигов, предположительно свидетельствующих о наличии тектонических нарушений.

Введение

Значительная часть неразведанных территорий Якутской алмазоносной провинции перекрыта трапповыми отложениями, мощностью в десятки метров. Традиционные методы поиска и локализации кимберлитовых трубок – потенциальных источников алмазов – в таких условиях перестают работать, поэтому встает в полный рост задача выбора нового метода, информативного в описанных геологических условиях.

Одной из альтернатив представляется метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП), располагающий довольно обширным арсеналом разных модификаций, позволяющих взяться и за поиски алмазов.

Первые опытнo-методические работы методом ВСП, результаты которых освещаются ниже, были проведены в 2019 году на территории Ыгыаттинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции в районе трубки Сюльдюкарской, открытой и изученной в

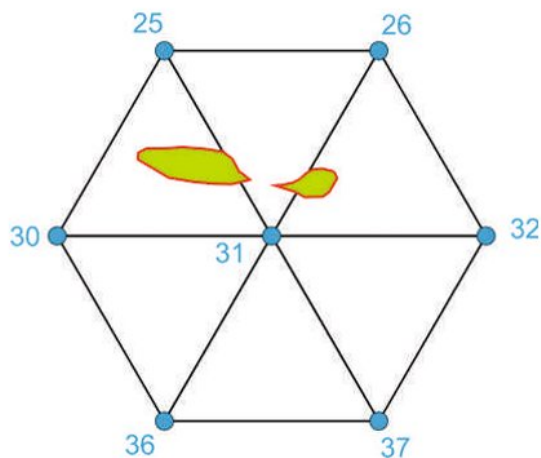
2015 году. Эта трубка, прорывающая карбонатные породы нижнего палеозоя и перекрытая песчаными отложениями верхнего палеозоя мощностью около 30–40 м, состоит из двух сопряженных блоков размерами порядка 40х100 и 30х40 метров. Зона рудопроявления наклонена с падением на север. В результате сейсморазведочных работ МОГТ-3D на трубке Сюльдюкарская была о контурена зона, совпадающая, с учетом угла падения, с контурами кимберлитов, а также были выделены не контрастные в других геофизических полях разнонаправленные малоамплитудные тектонические нарушения [1]. Перед работами ВСП основная ставка была сделана на выявление участков с хорошей корреляцией отражающих границ и граничащих с ними участков с плохой корреляцией, предположительно перспективных на кимберлиты.

В комплекс модификаций, выбранных для проведения описываемых работ, входили прямое и обращенное ВСП с

отработкой профильных и азимутальных систем наблюдений [2].

Методика работ

Схема расположения скважин и профилей относительно кимберлитового тела приведена на рис. 1. Скважины расположены по треугольной сетке, имитирующей разрабатываемый процесс поиска кимберлитовых трубок. По линиям между скважинами располагались либо наземные пункты приема (вертикальные сейсмоприемники), либо пункты возбуждения, в зависимости от тестируемой модификации ВСП. В ходе съемки получались сведения как по лучам, пересекающим кимберлитовое тело, так и по «пустым» лучам на южной половине изучаемой площадки, которые в данном случае выполняли роль контрольных.



▲ Рис. 1. Схема расположения скважин и профилей. Номерами указаны скважины.

Азимутальное ВСП было выполнено с целью опробования возможностей поиска объектов вокруг поисковой скважины и определения направления трещин во вмещающих породах. При этом зонд GStreamer-P размещали в центральной скважине 31. Прием колебаний осуществляли вдоль всего интервала скважины с шагом 4 м. Пункты возбуждения (ПВ) располагались на

поверхности вблизи скважин 25, 26, 30, 32, 36, 37. Таким образом, азимуты между соседними ПВ относительно регистрирующей скважины отличались на 60° . Общее количество азимутов составило 6. Возбуждение выполнялось посредством вертикального удара кувалдой по металлической плашке.

Непродольное ВСП выполнялось с целью изучения влияния на волновое поле кимберлитовых тел и зоны дробления вокруг них. Для всех скважин были получены сейсмограммы с наземных ПВ, располагавшихся с шагом 10 м по линиям между скважинами. Всего в работе использовалось одновременно до 4-х скважинных зондов GStreamer, размещенных в разных скважинах, что сокращало время съемки.

Обращенное ВСП выполнялось с целью повысить разрешающую способность исследований, так как сигнал, генерируемый спаркером, был в разы более высокочастотным, чем при возбуждении кувалдой. Возбуждение проводилось в каждой скважине электроискровым спаркером, а регистрация велась на поверхности вдоль линий между скважинами с шагом 5 м.

Для всех видов ВСП шаг исследований в скважине составлял 4 м как для ПВ, так и для ПП. Глубины скважин изменялись в диапазоне от 100 до 126 м.

Технические средства

В работах использовали зонды ВСП, погружные источники и источники питания для них, разработанные в ООО «Геодевайс». Кроме того, для возбуждения колебаний применяли строительную кувалду весом до 8 кг.

Электроискровой источник Pulse предназначен для возбуждения продольных волн в водонаполненных скважинах при выполнении межскважинного сей-

смического просвечивания (МСП) и ВСП. Работа источника Pulse обеспечивается накопителем энергии семейства Jack.

Накопитель Jack-5000HP3.0 генерирует короткий высоковольтный электрический импульс с энергией до 5 кДж, который обеспечивает формирование ионизированных парогазовых полостей высокого давления на электродной группе электроискрового источника Pulse, помещенной в контейнер с солёной водой.

Регистрацию колебаний проводили геофонами GS-20DX с собственной частотой 10 Гц (производство ООО «Геоспейс Технолджис Евразия», г. Уфа). Они обладают частотной характеристикой, обеспечивающей равномерность в полосе частот 10-250 Гц. Помимо них, при полевой съемке применялись более современные геофоны GS-One, обладающие значительно большей чувствительностью, чем GS-20DX.

Трёхкомпонентный зонд GStreamer-P предназначен для выполнения работ ВСП и межскважинного сейсмического просвечивания. Количество модулей в зонде – 8. В качестве чувствительных элементов в каждом модуле используется три ортогонально расположенных геофона GS-One. Прижим модулей обеспечивался посредством раздувания пневматической линии, воздействующей на прижимной рычаг каждого прибора зонда.

В качестве регистрирующей аппаратуры для производства сейсморазведочных работ использовали 96-канальные сейсмостанции ЭЛИСС-3 (производство ООО «Геосигнал», г. Москва).

Обработка и интерпретация данных

Граф обработки включал следующие процедуры: ориентацию трехкомпонентных записей по прямой продольной

волне; разделение волн по направлениям подхода; миграцию записей волн разного типа и класса с использованием ориентированных компонент в системах координат X, Y и Z, а также P, R и T; миграцию трехкомпонентных записей по следящей компоненте отраженных волн. Для увязки волн на сейсмограммах ВСП и глубинных разрезах, полученных путем миграции, в интерактивном режиме использовали систему «двух курсоров», позволяющую отождествлять на мониторе фрагменты волнового поля и разреза.

Особенности волновых полей в разных модификациях метода ВСП

Азимутальное ВСП. При предварительной обработке записей, полученных в скв. 31 из разных ПВ, расположенных на практически одинаковых расстояниях, равных 250 м от исследуемой скважины, оказалось возможным связать изменения волновых полей не с изменением выноса ПВ, а с изменением условий формирования волн.

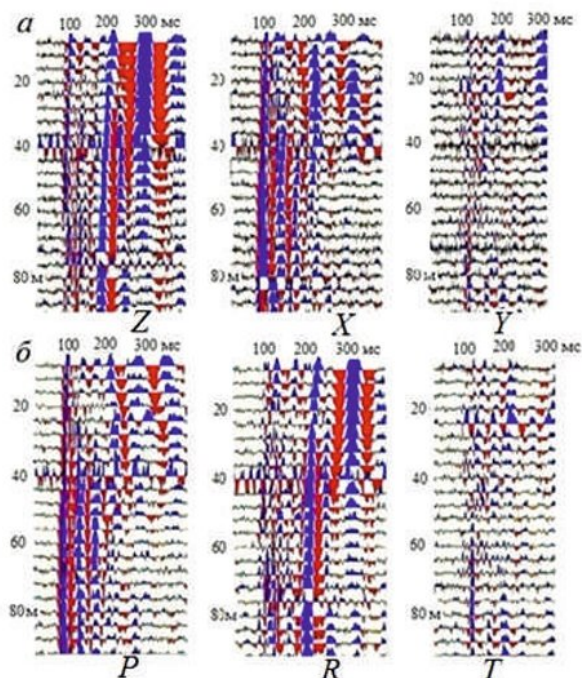
На рис. 2 показаны волновые поля, полученные в локальных системах координат XYZ и PRT с ПВ25, расположенного вблизи скв.25.

Можно видеть, что на компонентах Y и T наблюдаются одни и те же особенности: резкое ослабление интенсивности проходящей продольной волны и невысокий уровень низкочастотных волн с субвертикальными осями синфазности, прослеживаемых в верхних 40 м скважины. Эти волны могут быть результатом расщепления более интенсивных поперечных волн, регистрируемых на близких временах на компонентах Z и P, а также X и R. Не исключено, что отчасти они представляют собой поверхностные волны Лява, затухающие с глубиной. Наиболее сильными на компонентах Z и R выглядят волны, предположительно связанные с

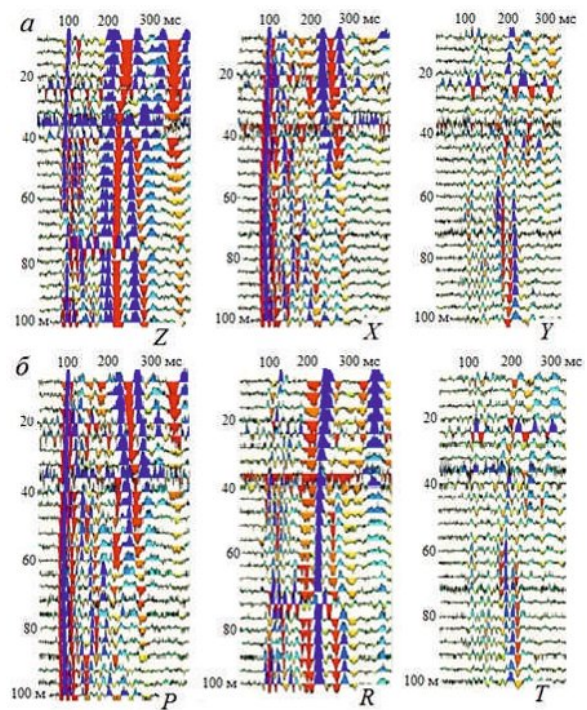
отражениями от границ ниже забоя. Прямая продольная волна одинаково интенсивной является на компонентах X и P, что вполне согласуется с теорией.

На рис. 3 показаны волновые поля, полученные в локальных системах координат XYZ и PRT с ПВ26, расположенного вблизи скв.26. Наиболее существенным отличием волновых полей с данного ПВ от волнового поля с ПВ25, описанного выше, состоит в резком усилении низкочастотных, предположительно поперечных, волн на компонентах R и T. Существенно, что в нижней половине вертикального профиля на компонентах Y и T эти волны преобладают по интенсивности. В остальном волновые поля с ПВ25 и ПВ26 сходны между собой.

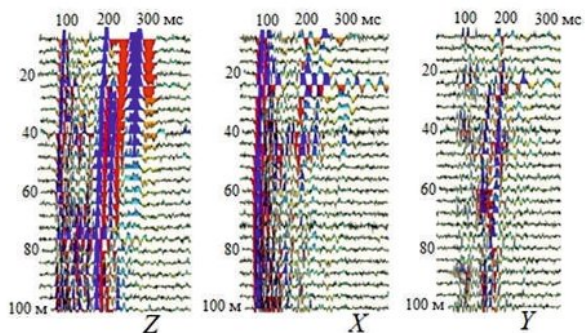
На рис. 4 показаны волновые поля, полученные с ПВ30, расположенного вблизи скв.30. Видно, что с ПВ30 поперечные волны на Y-компоненте прослеживаются практически вдоль всего вертикального профиля. При этом их интенсивность стала выше, чем на ком-



▲ Рис. 2. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые в скв. 31 с ПВ25.



▲ Рис. 3. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые в скв. 31 с ПВ26.



▲ Рис. 4. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ30.

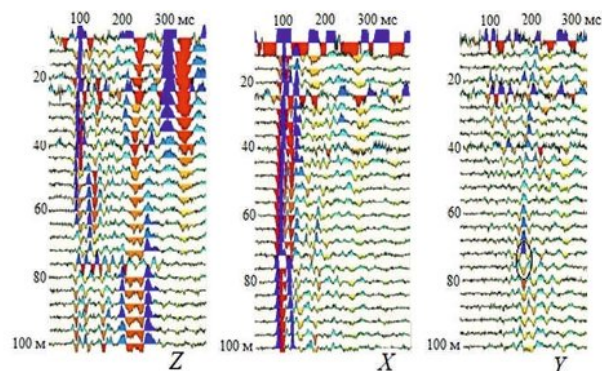
поненте X. Становится возможным фазовое прослеживание поперечных волн на Y-компоненте. Оказывается, что их спектральный состав выше, чем у близких по временам регистрации поперечных волн на компоненте R, а время прихода – заметно меньше. Это приводит к выводу о том, что на Y-компоненте регистрируется более быстрая и более высокочастотная поперечная волна по сравнению с поперечной волной на R-компоненте. Таким образом, имеет место расщепление попереч-

ных волн на две волны – быструю и медленную. При этом быстрая волна поляризована, как известно, в плоскостях симметрии, в данном случае ими могут быть субвертикальные трещины.

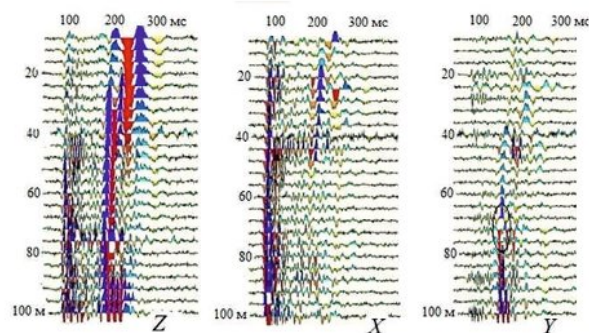
При переходе к ПВ32 (рис. 5) прослеживаемость поперечной волны на Y-компоненте улучшается, она отчетливо протягивается вдоль всего вертикального профиля, при этом количество фаз в волне уменьшается. В интервале глубин 72-76 м наблюдается смена полярности SH-волны. Причина этого состоит, возможно, в различии направления подхода SH-волн в разных частях вертикального профиля, обусловленном механизмом расщепления поперечной волны в сложно построенной среде. Все другие особенности волнового поля аналогичны описанным выше, с других ПВ.

При возбуждении колебаний с ПВ36 (рис. 6) поперечная волна, наблюдаемая на Y-компоненте, в нижней половине вертикального профиля становится гораздо сильнее, чем в верхней его части. Полярность волны в интервале глубин 68-72 м становится противоположной. С ПВ32 аналогичный эффект уже наблюдался, причина этого, вероятно, такая же.

Волновые поля, наблюдаемые с ПВ37 (рис. 7), в средней части вертикального



▲ Рис. 5. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ32. Овалом показана область смены полярности волны на у-компоненте.

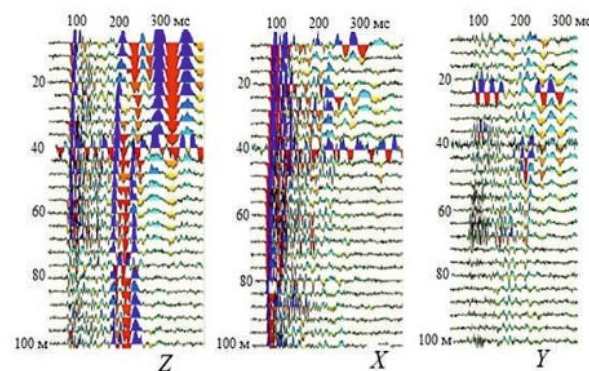


▲ Рис. 6. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ36. Овалом показана область смены полярности волны на у-компоненте.

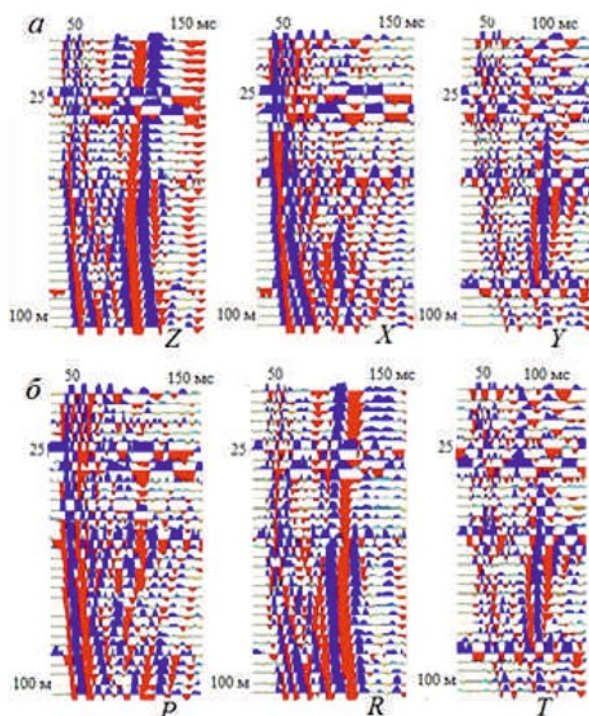
профиля (в интервале глубин 36-68 м) искажены высокочастотными многофазными колебаниями. Скорее всего, это помехи технического характера, вызванные паразитными колебаниями скважинных приборов, плохо прижатых к стенке скважины. На Z-компоненте уровень этих помех невелик, а регулярные волны прослеживаются довольно отчетливо, также как и с ПВ36.

Скв. 25 была отработана с пунктов возбуждения (ПВ), расположенных в направлении на скв. 31. На рис. 8 приведены примеры волновых полей для удаления ПВ, равного 112 м.

Основные особенности этих волновых полей состоят в следующем. На Y- и T-компоненте глубже 30 м прослеживается довольно интенсивная поперечная волна, близкая по времени регистрации к более сильной поперечной волне,



▲ Рис. 7. Волновые поля, наблюдаемые в скв. 31 с ПВ37.

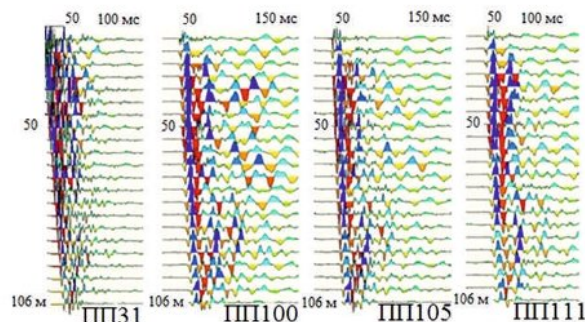


▲ Рис. 8. Волновые поля на компонентах XYZ (а) и PRT (б), наблюдаемые при ВСП в скв. 25 из ПВ112.

наблюдаемой на компонентах Z и R. На Z- и X-компонентах на фоне падающих волн уверенно намечаются продольные и обменные отраженные волны, приуроченные к границам, расположенным выше и ниже забоя скважины. Кроме того, на X- и R-компонентах наблюдаются обменные проходящие PS-волны с обменом P-волны на S-волну на глубине около 50 м. Обменные отраженные волны на компоненте X прослеживаются лучше, чем на компоненте R.

Обращенное ВСП

При возбуждении колебаний в скв. 26 пункты приема (ПП) были расположены в направлении на скв. 31. На рис. 9 приведены примеры волновых полей для разных удалений ПП – 31 м, 100 м, 105 м и 111 м. На фоне слабо регулярных волн можно уверенно проследить отраженные волны, приуроченные к границам, расположенным в нижней части скважины и под ее забоем. Однако прослежива-



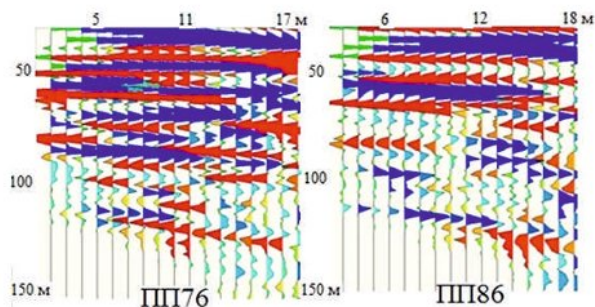
▲ Рис. 9. Сейсмограммы обращенного ВСП в скв. 26 для разных пунктов приема.

ются эти отражения лишь в нижней части вертикального профиля.

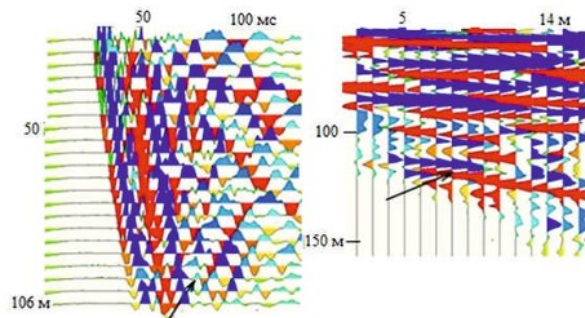
Формирование изображений среды

Для формирования изображений среды путем лучевой миграции использовали отраженные продольные и отраженные обменные PS-волны.

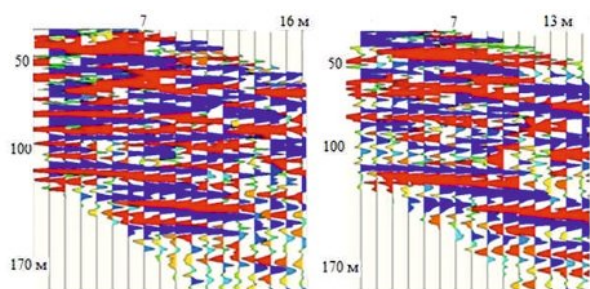
При обращенном ВСП миграцию выполняли по каждому пункту приема (ПП) после подавления падающих волн. Глубинные разрезы, полученные для разных ПП на продольных отраженных волнах в скв. 26, похожи между собой (рис. 10): выше 100 м границы на разрезах залегают субгоризонтально, а на больших глубинах – с резким наклоном в сторону от скважины. Эти наклонные границы вызвали большое сомнение в части их достоверности. В итоге был сделан обоснованный вывод о том, что это ложные границы, сформированные обменными отраженными волнами. На рис. 11 стрелками показаны обменные отраженные волны на сейсмограмме ВСП и ложные наклонные границы, полученные при миграции записей на отраженных продольных волнах. Миграция тех же записей на обменных отраженных волнах устраняет эти ложные границы с глубинных разрезов (рис. 12): наклоны глубоких границ в направлении от скважины сохраняются, однако величина углов наклона существенно мень-



▲ Рис. 10. Глубинные разрезы на отраженных РР-волнах при обращенном ВСП в скв. 26, ПП76 и ПП86.



▲ Рис. 11. Пример формирования ложных границ из PS-волн. Стрелками на сейсмограмме слева показаны обменные отраженные волны, а справа – ложные границы скв. 26, ПП76.

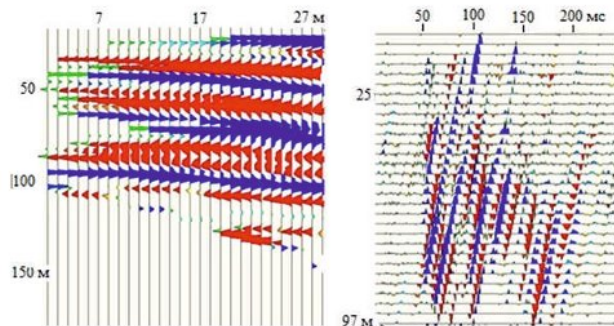


▲ Рис. 12. Глубинные разрезы на отраженных PS-волнах при обращенном ВСП в скв. 26, ПП76 (слева) и ПП86 (справа).

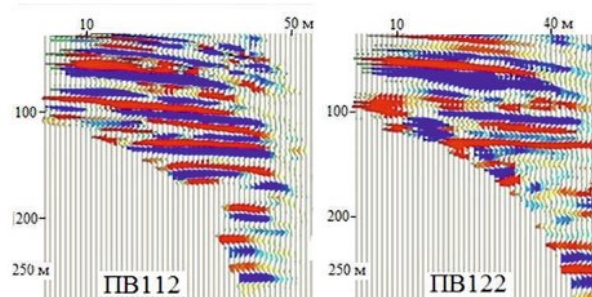
ше. Сходные результаты получены на PS-волнах в скв. 37.

Изображения среды при прямом ВСП.

На рис. 13 показаны сейсмограмма ВСП с выделенными продольными отраженными волнами и глубинный разрез, полученный путем лучевой



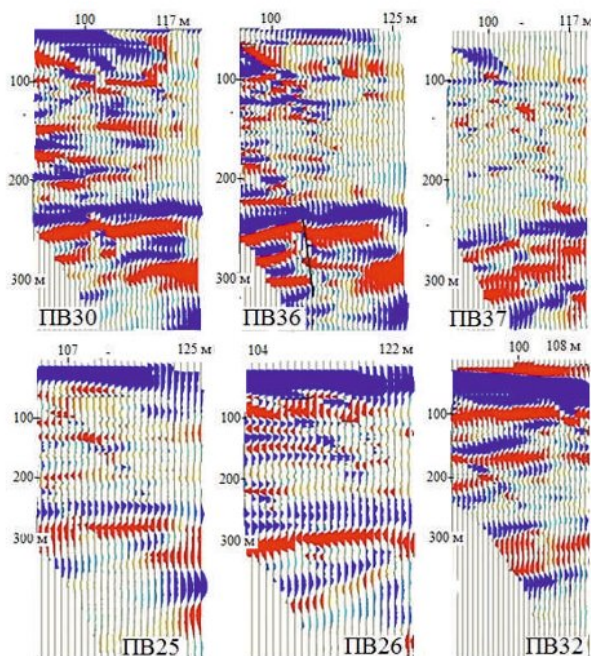
▲ Рис. 13. Глубинный разрез НВСП на РР-волнах (слева) и сейсмограмма НВСП с выделенными восходящими волнами (справа). Скв. 25, ПВ132.



▲ Рис. 14. Глубинные разрезы НВСП по РР-волнам, полученные при НВСП в скв. 25.

миграции этой сейсмограммы. Этот результат получен при обработке скв. 25 с ПВ132, расположенного на расстоянии 132 м в направлении скв. 31. Можно видеть, что границы в покрывающей толще залегают субгоризонтально, с небольшим наклоном в сторону от скважины. Глубинные разрезы, полученные при разных выносах ПВ, сравнимы между собой по качеству и информативности (рис. 14).

На рис. 15 представлены примеры глубинных разрезов, полученных при азимутальном ВСП на Z-компоненте в скв. 31 с ПВ, расположенных вблизи скважин 30, 36, 37, 25, 26 и 32. Можно видеть, что залегание границ в пределах исследованной толщи субгоризонтальное, но при этом вполне уверенно намечаются тектонические нарушения (одно из них указано на разрезе, полученном с ПВ36). Эти разрезы были получены при миграции записей на Z-компоненте.



▲ Рис. 15. Глубинные разрезы на продольных отраженных волнах, полученные в скв. 31 с разных ПВ.

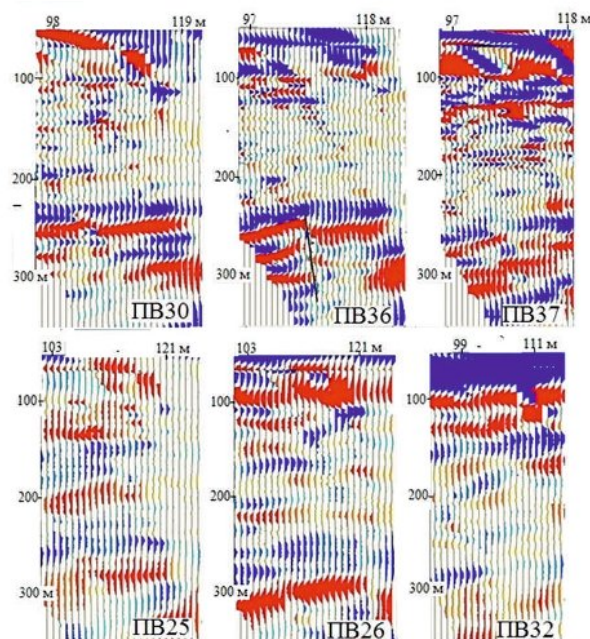
Приведенные в нижнем ряду на этом же рисунке глубинные разрезы с ПВ25, ПВ26 и ПВ32 по качеству гораздо ниже, наверняка из-за расположения линий ПВ-скважина через тело кимберлита.

Аналогичные результаты наблюдаются при миграции на продольных отраженных волнах по следящей компоненте (см. рис. 16, где расположение глубинных разрезов аналогичное).

Изменения кинематических параметров при азимутальных наблюдениях

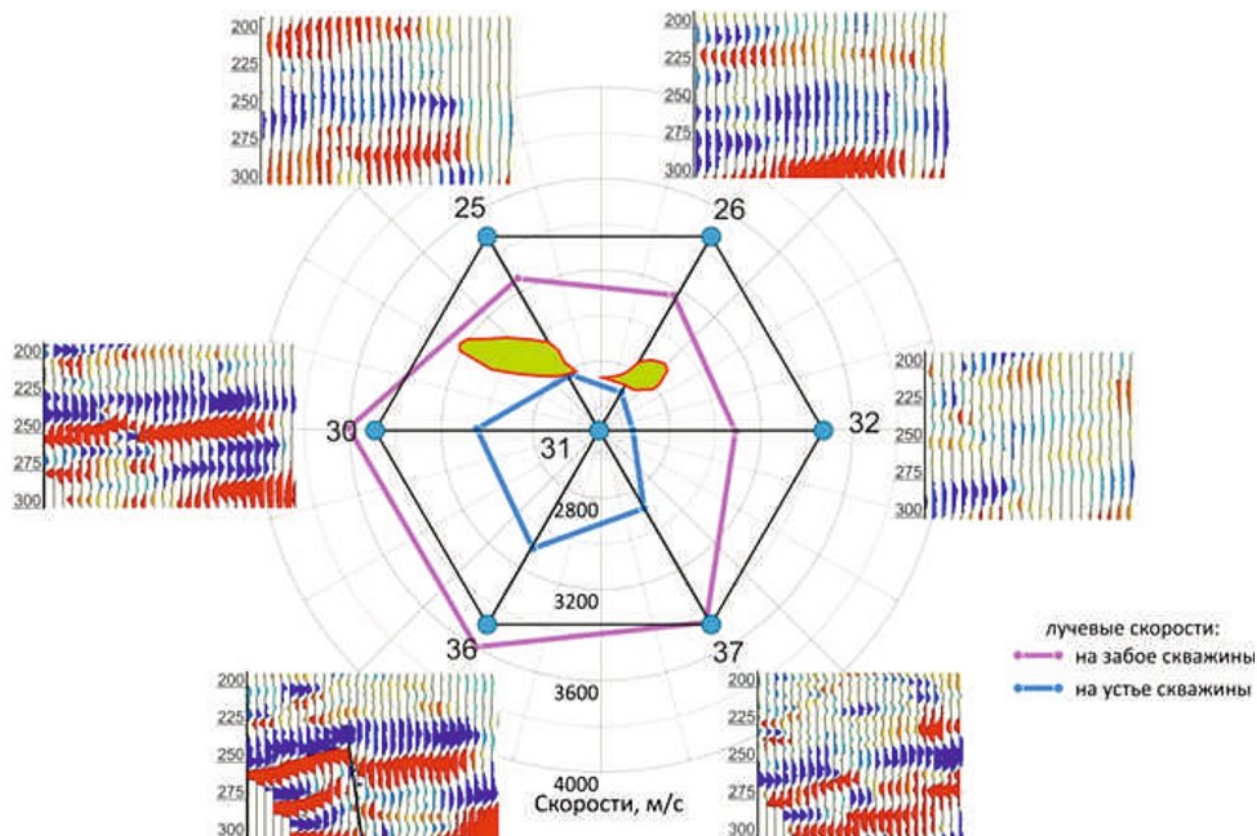
Выше при рассмотрении волновых полей азимутального (кругового) ВСП в скв. 31 были детально описаны особенности поляризации волн, представляющие интерес при решении вопроса о направлении преобладающей трещиноватости окружающей среды. Полученные в скв.31 записи были использованы также для изучения изменения лучевых скоростей вокруг исследуемой скважины.

Годографы первых вступлений, полученные с каждого из ПВ, уверенно разби-



▲ Рис. 16. Глубинные разрезы на продольных отраженных волнах, полученные на следящей компоненте в скв. 31 с разных ПВ.

ваются на две группы. Рассчитанные по этим годографам лучевые скорости позволили получить диаграмму, аналогичную «розе трещиноватости» (рис. 17). Эта диаграмма имеет резко асимметричный вид: минимум лучевых скоростей наблюдается в направлении на северо-восток от скв.31. Это направление связано, очевидно, с тектоническими нарушениями в покрывающей толще и разуплотнением среды. Минимальную скорость на такой диаграмме предположительно можно связывать с направлением, ортогональным к плоскостям преобладающей трещиноватости. В этом же примерно направлении наблюдается минимум интенсивности поперечных волн, регистрируемых на побочной (т.е. тангенциальной) компоненте, в наших обозначениях – это компоненты Т и Y. В этих же направлениях отмечается потеря корреляции отражений в сейсмограммах отраженных волн азимутального ВСП.



▲ Рис. 17. Диаграммы лучевых скоростей и глубинные разрезы азимутального ВСП на отраженных РР-волнах.

Выводы

1. Впервые проведенные в Якутской алмазодобывающей провинции в районе трубки Сюльдюкарской работы в модификациях прямого и обращенного ВСП позволили положительно оценить информативность метода при исследованиях в условиях месторождения кимберлитов.

2. Кимберлитовые тела в волновом сейсмическом поле, наблюдаемом в методе ВСП, проявляют себя в виде резкого нарушения корреляции волн, расщеплении поперечных волн и сильной зависимости поляризации поперечных волн от интервала наблюдений в скважине.

3. На глубинных разрезах НВСП, полученных на продольных и обменных отраженных волнах, присутствие кимберлитовых тел проявляется резким

ухудшением корреляции сейсмических границ, угловыми несогласиями, а также присутствием тектонических нарушений.

4. Полученные результаты свидетельствуют о взаимосвязи расщепления поперечных волн с моделью среды, которая существенно меняется с глубиной.

Выполненные опытно-методические работы ВСП позволили дополнить сведения о кимберлитовой трубке Сюльдюкарская: по всей видимости на глубинах более 150 м (глубина бурения) тело уходит на восток, что обуславливает потерю корреляции отраженных волн и резкое понижение лучевых скоростей в направлении на скв. 32.

Литература

1. Бояров В.М., Гончаров Е.М., Егоров Г.С. Результаты применения высокоразрешающей сейсморазведки 3D на кимберлитовых телах Якутской алмазоносной провинции// Инженерная и рудная геофизика 2018 — Алматы, Казахстан, 23-27 апреля 2018 г.

2. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. - М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2017. - 284 с.

Подробнее об авторах



Ошкин
Александр Николаевич

К. ф.-м. н, ассистент
Геологического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова,
Гендиректор ООО "Неоген".



Шехтман
Григорий Аронович

Д. т. н., ведущий научный
сотрудник Института
инновационных
инженерных технологий
РУДН.



Игнатьев
Владимир Иванович

Коммерческий директор
ООО "Геодевайс".



Гончаров
Евгений Михайлович

Начальник отдела
экспертизы и методологии
Управления минерально-
сырьевой базы
АК "АЛРОСА" (ПАО).