

Пример планирования и реализация работ ВСП в наклонно - направленной скважине

- Горбачев С.В., Титов А.Б., ООО «РН-Шельф-Арктика», г. Москва
- Черкашнев С.А., ИП Черкашнев С.А., г. Москва

В работе представлены результаты проектирования, подготовки и выполнения вертикального сейсмического профилирования в наклонно - направленной скважине. Особое внимание уделено вопросу выбора оптимальной методики и объемов полевых работ с учетом особенностей и сложностей поверхностных условий, а также конструкции скважины. Продемонстрированы необходимые мероприятия для успешного выполнения полевых работ. Представлены результаты обработки и интерпретации данных ВСП с учетом решения геолого-геофизических задач и сложности полевого материала. По результатам работ делаются объективные выводы по эффективности выполненных работ ВСП и рекомендации для будущих проектов.

Ключевые слова: ВСП [5, 7, 8], планирование и проектирование работ, сейсморазведка 2D и 3D, данные ГИС, анизотропия, трещиноватость, поглощение, эффективность работ.

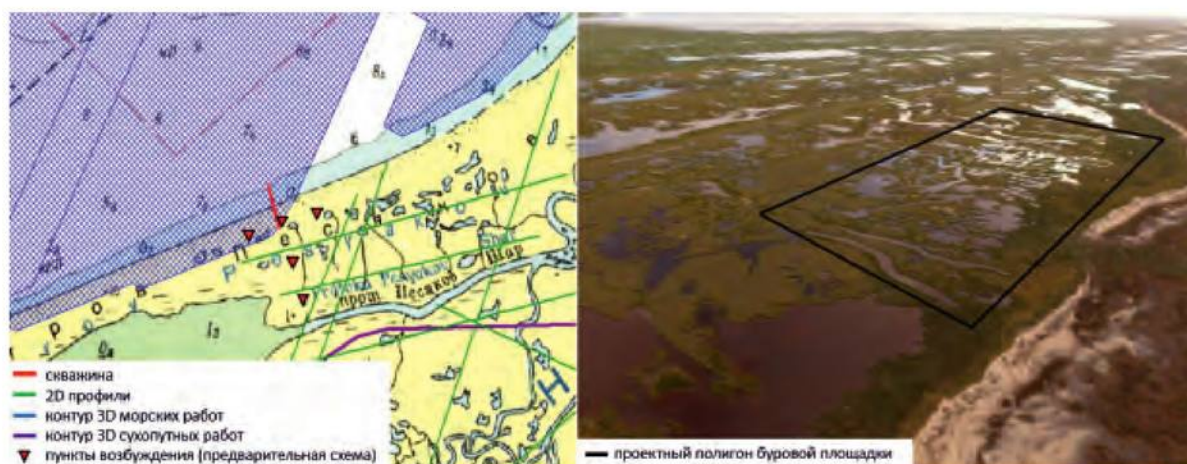
Введение

Успешность и эффективность многих геофизических методов во многом зависит от детальности и качества проработки и реализации каждого из этапов работ (планирования, подготовки, полевых работ, обработки и интерпретации) [2]. Часто, отсутствие точно продуманных и корректно сформулированных геолого-геофизических задач, а также четкого плана реализации проекта может привести к получению неоднозначных результатов и ошибочных выводов, как о геологическом строении, так и об эффективности используемого метода исследований в целом. Это в полной мере касается всех геофизических методов на всех этапах геологоразведочных работ, поэтому вопросам постановки задач и проверки их реализации необходимо уделять особое внимание. Метод ВСП не является исключением, существует много примеров, когда по результатам работ ВСП не были решены поставленные задачи и, как следствие, сделаны выводы о его неэффективности. Анализ результатов предыдущих работ показал, что основными причинами таких непра-

вильных выводов явилось не соответствие применяемой методики поставленным геолого-геофизическим задачам, отсутствие проектирования и моделирования при выборе методики и технологии работ на этапе планирования работ, отсутствие должного контроля на этапе полевых работ, обработки и интерпретации данных. В данной работе представлен опыт планирования и реализации проекта ВСП на примере работы в одной из скважин.

Район исследований расположен в северной части Тимано-Печорской нефтегазовой провинции в прибрежной зоне. В непосредственной близости на суше разрабатываются нефтяные месторождения с большим количеством скважин. С целью подтверждения геологической модели исследуемого района, ее распространения в сторону шельфа, а также оценки продуктивных отложений планировалось бурение наклонно направленной скважины с территории суши и расположением забоя в прибрежной части моря.

Перед работами ВСП первоначально были поставлены все возможные, для



▲ Рис. 1. Обзорная схема (слева) и поверхностные условия (справа) района работ.

данного метода, геолого-геофизические задачи: уточнение скоростной модели; увязка скважинной геолого-геофизической и сейсмической информации; получение разреза в сторону суши; уточнение наличия предполагаемых разрывных нарушений; прогноз кратных волн по данным ВСП и 2D/3D МОГТ; оценка поглощения; оценка анизотропных характеристик; прогноз зон трещиноватости, а также прогноз характеристик разреза ниже забоя скважины.

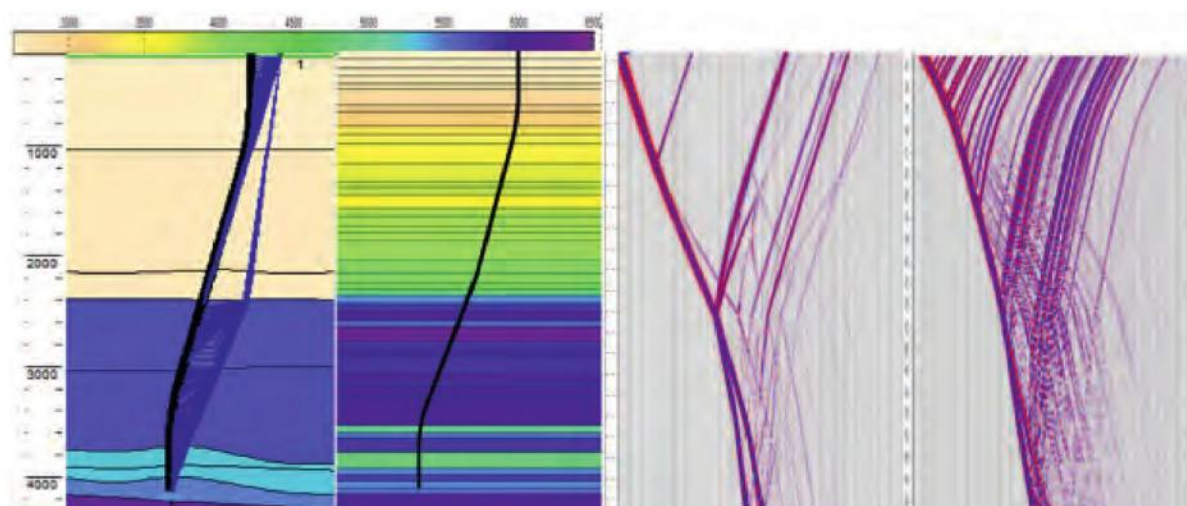
Осложняющими факторами проведения работ ВСП являлась S-образная траектория ствола скважины, сложные поверхностные условия (болота, ручьи и реки) и экологические ограничения, которые препятствовали свободному передвижению и размещению пунктов возбуждения на суше в летний период. Отработка пунктов возбуждения со стороны акватории приводила к необходимости привлечения морского судна с пневмоисточником, осложнялась мелкими глубинами моря, что существенно увеличивало стоимость работ. Все эти ограничения требовали детальной и основательной проработки методики и технологии работ для оценки возможностей решения поставленных геолого-геофизических задач.

Планирование и проектирование работ ВСП

Наиболее корректным способом оценки эффективности применения и получения необходимых геолого-геофизических результатов, а также оценки оптимальности методик и технологий полевых работ для конкретных условий является применение сейсмогеологического моделирования на этапе планирования работ [3].

На первом этапе работ была подготовлена программа исследований, включающая построение толсто- и тонкослоистой моделей (рис.2), анализ методик ВСП, расчет и обработка синтетических данных. Исходными данными для построения глубинно скоростных моделей являлись результаты интерпретации данных МОГТ, ГИС и ВСП ближайших сухопутных скважин. Использование толстослоистой модели на начальном этапе позволило оценить возможные варианты методики полевых работ, особенности распространения волн и их регистрации в S-образной скважине, а также уточнить программу для полномасштабного моделирования по тонкослоистой модели.

Основной геологической особенностью данного региона является контрастный переход терригенных и карбонат-



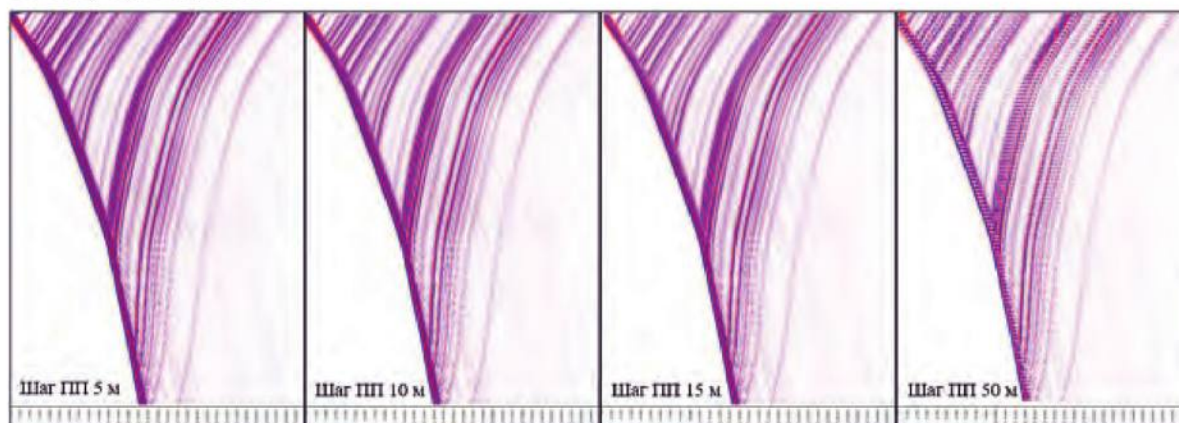
▲ Рис. 2. Пример толсто и тонкослоистой глубинно-скоростных моделей (слева) и синтетические данные (справа).

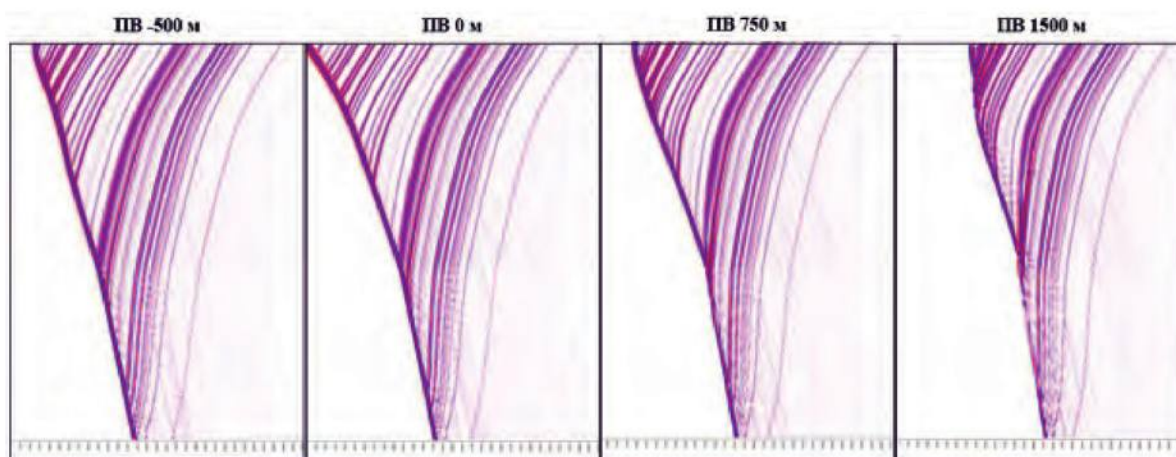
ных пород на глубинах около 2,2 км. Значительный перепад сейсмических скоростей приводит к образованию интенсивных преломленных волн на границе. Данное условие накладывает существенные ограничения на выбор максимального удаления пунктов возбуждения и требует специального подхода при обработке и оценке скоростей.

Еще одной особенностью геологического строения, которая была выявлена на этапе строительства буровой площадки и бурения инженерных скважин, является распространения островной мерзлоты в районе работ, которая может приводит к существенными изменениям скоростей в верхней части разреза и которую необходимо учитывать в процессе обработки данных [9].

Сейсмический импульс для моделирования синтетических данных был выбран на основании оценки частотного состава морских и сухопутных данных работ прошлых лет. Для выбора оптимального шага наблюдений в скважине был выполнен теоретический расчет вертикальной разрешающей способности, а также оценка пространственного аляйсинга для продольных и обменных волн. На рисунке 3 представлены сейсмограммы с разным шагом пунктов приема по стволу скважины, четко видно, что при большем шаге сейсмические данные находятся в аляйсинге, что приведет к существенным проблемам при разделении полей и формировании изображения на этапе обработки данных. В результате прове-

▼ Рис. 3. Примеры синтетических сейсмограмм продольных волн с разным шагом между приборами.





▲ Рис. 4. Пример синтетических данных ВСП тонкослоистой модели для разных пунктов возбуждения.

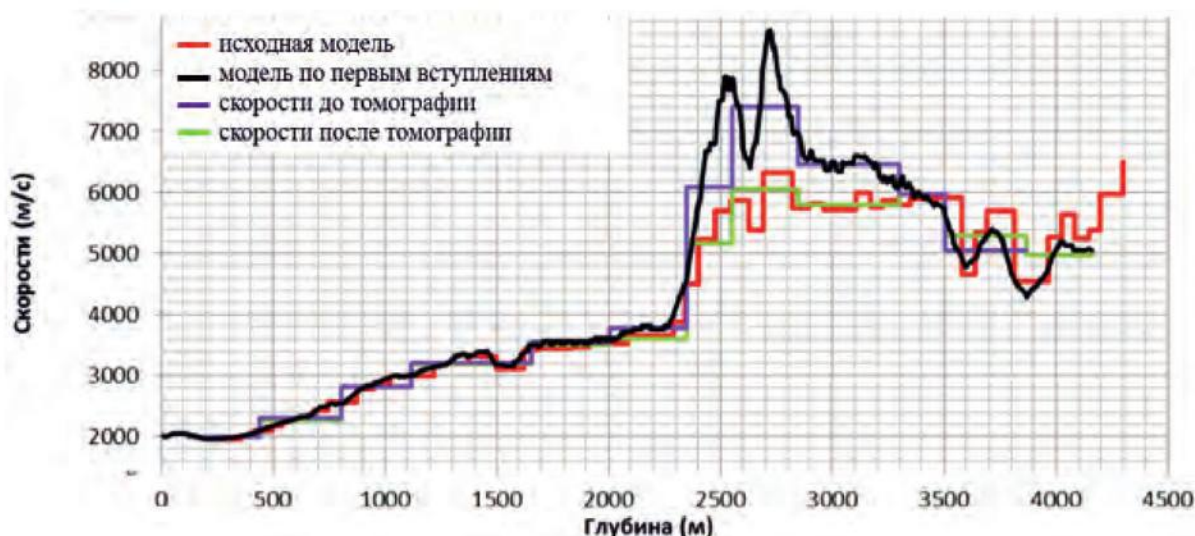
дённного анализа был определен оптимальный шаг между регистрирующими приборами 10 м.

Для реализации работ ВСП рассматривалось несколько возможных методик НВСП, МОГ и их модификации [4, 5, 7, 8]. Для анализа были смоделированы синтетические данные НВСП на разных удалениях вдоль профиля скважины (вынос ПВ -750м, -500м, -350м, -100м, 100м, 300м, 500м, 750м, 1000м, 1500м, 2000м, 2500м, 3000м 3500м), профиль МОГ ВСП с расположением приборов в разных интервалах по скважине и удалением ПВ -750 от устья и до 3500 м в сторону суши. Дополнительно были проанали-

зированы синтетические данные с пунктов возбуждения, расположенных на определенном расстоянии в обе стороны от проекции профиля скважины, с целью оценки возможности оценки скоростей, построения изображения и азимутального анализа. На рисунке 4 показаны примеры сейсмограмм, полученных по толстослоистой модели, с различными выносами пунктов возбуждения от устья скважины.

Одной из основных задач ВСП является уточнение скоростной характеристики разреза. Корректное определение скоростей в S-образных скважинах, с учетом контрастных перепадов свойств

▼ Рис. 5. Пример сопоставления модельных скоростей и скоростей оцененных разными способами.



разреза, задача достаточно непростая. Погрешность определения зависит от применения определённых подходов и навыков. Необходимо учитывать влияние кривизны ствола скважины, а также же эффекты преломления. На рисунке 5 представлено сравнение исходной тонкослоистой скоростной модели, модели построенной по первым вступлениям рассчитанной сейсмограммы, скоростей полученных до и после томографии. Для верхней (вертикальной) части скважины значения скоростей близки друг к другу, а начиная с 2200м (сильно преломляющая лучи граница терригенных и карбонатных слоев) имеются отличия до 15%. В результате выполненного анализа можно сделать вывод о необходимости детального подхода к процессу оценки скоростей по данным ВСП для текущих геологических условий и конструкции скважины.

Еще одной особенностью волновой картины, которую выявили в результате анализа и обработки синтетических данных, является интерференция осей синфазности отраженных продольных и обменных волн для глубоких горизонтов. В результате при неполном разделении разных типов волн на финальных разрезах возникает искривление горизонтов, а также ложные разрывные нарушения, что в итоге приводит к получению недостоверной информации и может сказаться на конечном геологическом результате.

Первоначальная схема полевых работ ВСП предполагала отстрел 5 пунктов возбуждения НВСП, два из которых располагались перпендикулярно проекции ствола скважины на равном расстоянии от устья в разные стороны (для изучения анизотропных свойств), ближний пункт возбуждения и два пункта возбуждения в сторону суши с удалением до 3000м. На этапе проектирования

была детально проработана возможность изучения анизотропных свойств среды в условиях S-образной траектории ствола скважины, в результате были сделаны выводы о сложности оценки скоростей в зависимости от азимута и построения корректного сейсмического изображения. Фактически задача свелась к анализу параметров Томпсона, что было подтверждено на реальных данных.

Благодаря выполненному проектированию и моделирования удалось своевременно скорректировать схему работ, отказаться от азимутальных пунктов возбуждения, уменьшить выносы дальних пунктов возбуждения, отказаться от одной точки наблюдений по причине неполучения дополнительной геолого-геофизической информации.

Помимо получения качественных данных ВСП и решения геолого-геофизических задач немаловажным показателем эффективности работ ВСП является оптимальная технология полевых работ, в том числе с точки зрения времени выполнения работ (минимизация времени задействования скважины), количества спускоподъёмных операций. Для оптимизации технологии отработки, на этапе планирования, был выполнен расчет времени выполнения работ ВСП с учетом различного количества регистрирующих приборов (от 4-х до 20-ти), учитывались основные этапы работ: монтаж/сборка, проверка и тестирование оборудования, спуск, контрольные измерения, привязка по глубине, регистрация данных, подъем оборудования и демонтаж. Общий объем работ НВСП составил 4 пункта возбуждения. Необходимо было проработать и выбрать оптимальное количество спускоподъёмных операций с учетом допустимого времени стоянки зондов в скважине, привлечения

необходимого количества взрывных отрядов. На основании выполненных расчетов выбрано оптимальное количество приборов - не менее 12 шт и выполнение работ за две спускоподъёмные операции.

По результатам выполнения этапа планирования и проектирования, с использованием методики сейсмогеологического моделирования, удалось:

- Уточнить возможности решения геолого-геофизических задач с учетом методик и технологий работ ВСП для текущих условий (сложные поверхностные условия, экологические ограничения).
- Исключить нереализуемые геолого-геофизические задачи в текущих условиях.
- Оптимизировать методику и объемы работ ВСП.
- Определить критерии к процедурам обработки и интерпретации данных ВСП.

Полевые работы и технико-методический контроль

Успешность реализации полевых работ ВСП зависит, в том числе от полноты и качества проведенных подготовительных мероприятий непосредственно перед самими полевыми работами.

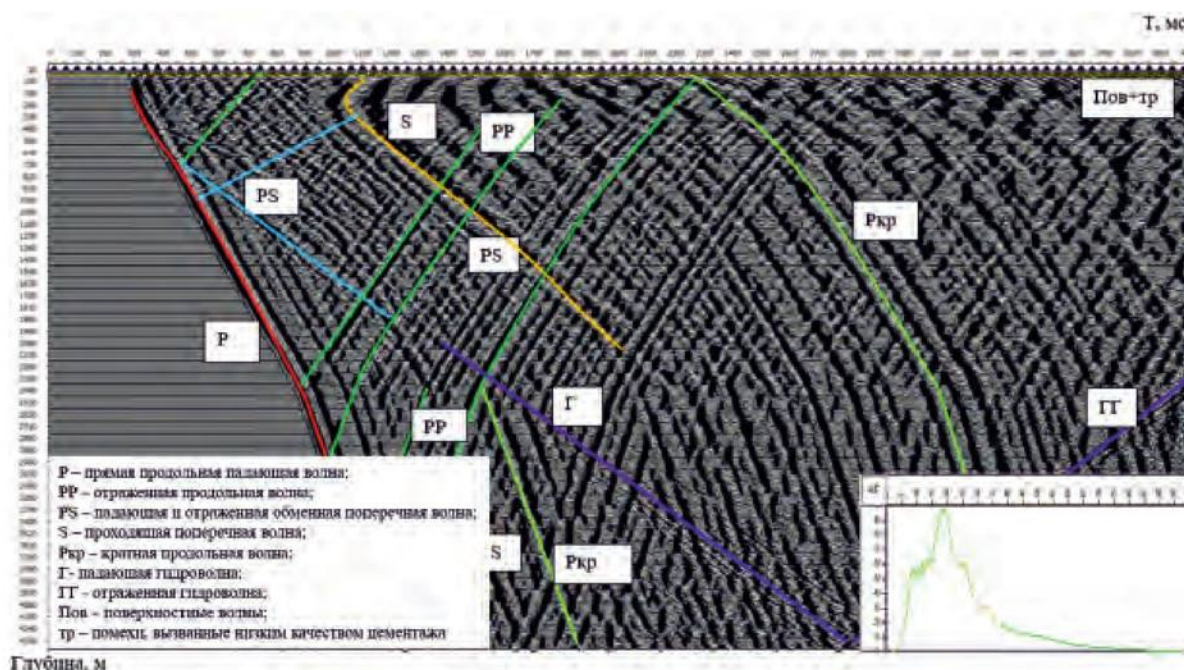
В связи с задержками сроков строительства скважины плановые сроки выполнения работ ВСП неоднократно смещались с осеннего на зимний и в конечном итоге летний период. Такое кардинальное изменение сроков накладывало существенные ограничения к процессу подготовки, применяемому оборудованию и технике в зависимости от сезонности и поверхностных условий работ. В результате все задействованное оборудование и техника прошла необходимый объем тестирования и подготовки в соответствии со стандартами и требованиями.

На подготовительном этапе работ была выполнена детальная проработка вопроса контроля качества данных, объем и порядок передачи информации для принятия решений. Контроль качества в процессе полевых работ состоял из двухэтапов:

- в режиме реального времени (тесты регистрирующего оборудования, контроль прижима, контроль работ источника сигнала и т.д), осуществлялся оператором станции и супервайзером;
- оффлайн контроль (расчет атрибутов, получение смонтированных сейсмограмм, анализ волновых полей и т.д), выполнялся в специальном программном обеспечении удаленно из офиса.

Транспортная доступность в район скважины в летний период была ограничена по причине отсутствия автодорог (работа зимника прекращается в апреле). В связи с этим необходимо отметить сложную логистику отряда ВСП на скважину в процессе мобилизации. Все задействованное оборудование, техника, а также взрывчатые вещества и электродетонаторы доставлялись автотранспортом до г. Усинск и далее вертолетами до буровой площадки. Заблаговременное планирование и проработка данного вопроса позволили успешно и безопасно выполнить весь объем операций по мобилизации отряда ВСП в необходимые сроки.

Благодаря качественной и заблаговременной проработке большинства проблемных вопросов и моментов удалось выполнить весь объем работ ВСП с опережением планового графика, минимизировать время задействования скважины. Общее время производственных работ составило 65,5 часов. Всего было отработано 4 пункта возбуждения в рамках 2-х спускоподъёмных операций. По результатам выполненного контроля



▲ Рис. 6. Пример сейсмограммы ВСП ПВ1 Z компонента с анализом типов волн.

качества подтверждено высокое качество полученных данных ВСП. На рисунке 6 представлен пример сейсмограммы ВСП с описанием характерных типов волн.

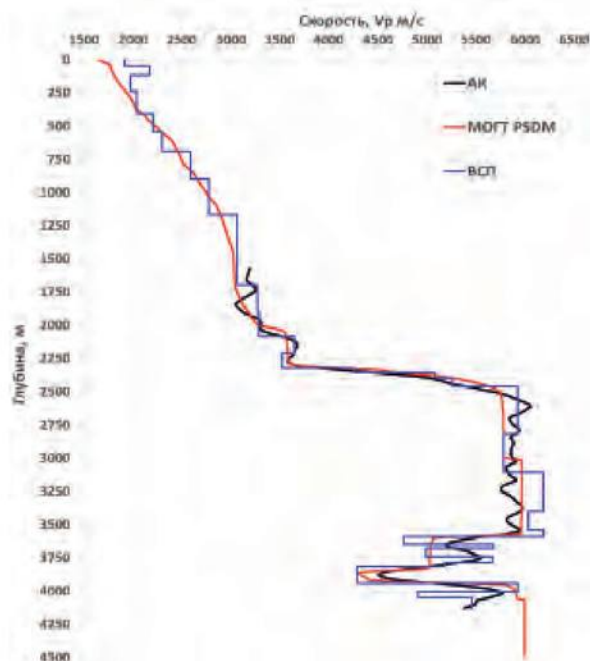
Обработка и интерпретация

Граф обработки и интерпретации данных ВСП состоял из базовых процедур, при этом основные сложности данных были связаны именно с особенностями геометрии ствола скважины и геологией.

Регистрации полевых данных осуществлялась приборами с неориентируемыми сейсмоприёмниками (Z компонента ориентирована вертикально вдоль оси прибора, X и Y компоненты взаимно перпендикулярны в горизонтальной плоскости). Во время спускоподъёмных операций в скважине происходит неконтролируемый поворот зондов относительно друг друга, а также в различных частях скважины приборы расположены под разными углами относительно вертикали. Все эти особенности конструкции скважины и технология

полевых работ приводят к записи сложной волновой картины, продольные, поперечные и обменные волны регистрируются на разных компонентах, что требует внимательного подхода к процедуре ориентации записи. С учетом имеющегося программного обеспечения в результате проведённого тестирования было выполнена процедура ориентация записи ВСП на пункт возбуждения.

Дальнейшие ожидаемые трудности возникли на этапе определения скоростей. На первоначальном этапе были определены скорости без учета преломления, которые плохо коррелировались со скоростями, полученными по АК и модельными данными и, как следствие, влияли на точность привязки данных ГИС, ВСП и МОГТ. Только после учета преломления получена наиболее адекватная скоростная модель ВСП, которая была использована для калибровки общей глубинно-скоростной модели. На рисунке 7 показаны итоговая скоростная модель по данным ВСП, скорости АК, а также обобщенная скоростная модель МОГТ по морским и сухопутным данным.

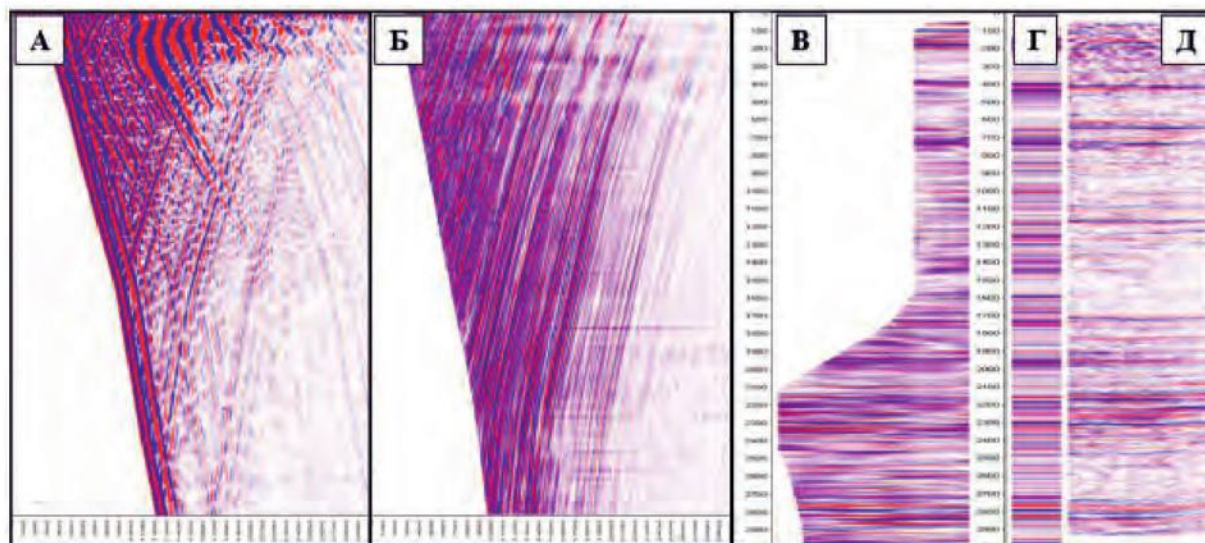


▲ Рис. 7. Сравнение скоростей ВСП, АК и МОГТ.

На рисунке 8 показан пример полевой сейсмограммы, поле отраженных волн после деконволюции, разреза ВСП, трассы однократных отражений и фрагмента 3D куба МОГТ.

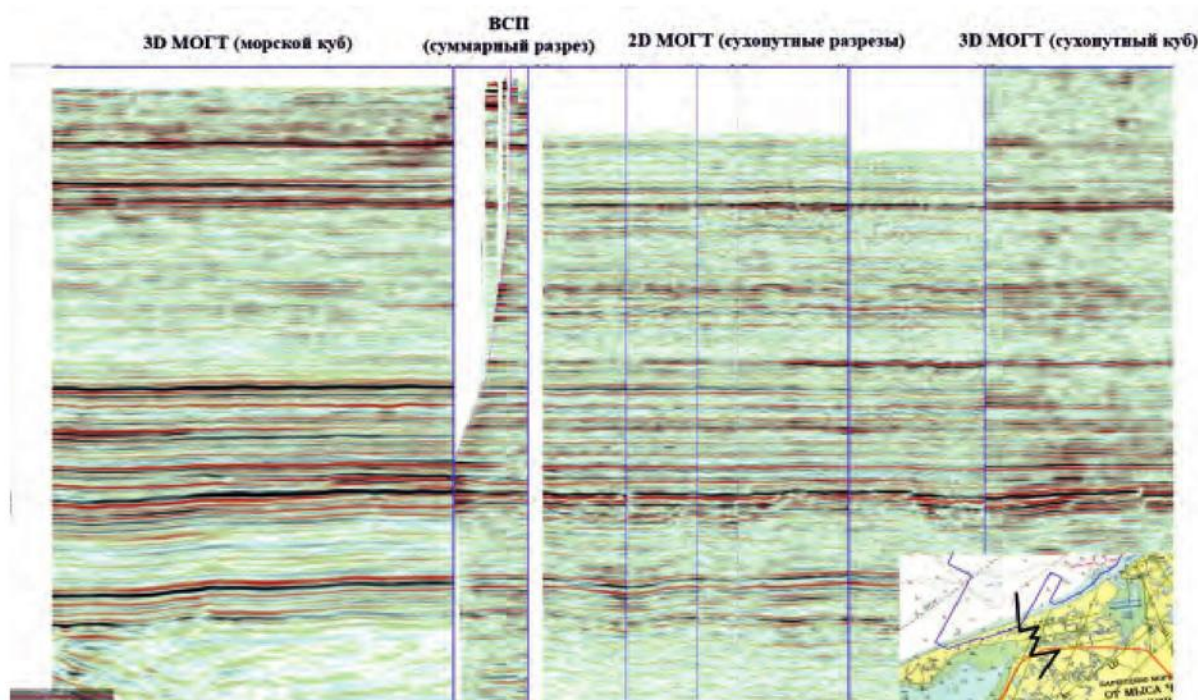
По результатам увязки данных ГИС, ВСП и МОГТ получен довольно высокий коэффициент корреляции как в целевом интервале (0,96), так и более широком окне.

▼ Рис. 8. Сопоставление данных ВСП и МОГТ (А- полевая сейсмограмма, Б – поле отраженных волн после деконволюции, В - разрез ВСП, Г – трасса коридорного суммирования, Д – фрагмент куба 3D МОГТ).



Прогноз анизотропных свойств [1] и оценка зон трещиноватости в настоящий момент является наиболее интересной и актуальной задачей для карбонатных объектов и данного региона. Как и ожидалось, для текущих условий удалось лишь частично решить данную задачу, в нашем случае была выполнена оценки VTI анизотропии. Наиболее достоверное значение параметров Томпсона ϵ получены в интервале до 850м для дальнего пункта возбуждения. Для более глубоких горизонтов, из-за влияния геометрии скважины, получились аномальные отрицательные значения. В связи с ухудшением прослеживания падающей поперечной волны в верхней части разреза и невозможностью идентифицировать одну и ту же волну в интервале до 800 м получены некорректные значения параметра γ , которые не могут быть использованы для дальнейшей работы.

Одним из преимуществ данных ВСП является возможность идентификации кратнообразующих границ и распространения кратных волн. В результате обработки данных ВСП кратные волны достаточно эффективно даются процедурой



▲ Рис. 9. Композитный сейсмический профиль.

деконволюции и при совместном анализе с МОГТ позволяют их идентифицировать. Сравнение трассы коридорного суммирования ВСП и результатов обработки МОГТ показали визуальную сходимость волновых полей. Идентичные отражения отличаются, в основном, интенсивностью, что может говорить об эффективном подавлении кратных волн по результатам обработки данных МОГТ.

Для оценки характеристик разреза ниже забоя скважины и прогноза АВПД была выполнена акустическая инверсия трассы однократных отражений ВСП. В результате полученных расчетов удалось получить необходимую информацию и характеристиках нижезалегающих пород.

Наиболее важной задачей ВСП было получение сейсмического изображения между морским и сухопутными съемками МОГТ, для получения единой геологической модели исследуемого района. Для данных целей были отработаны выносные пункты возбуждения по азимуту проекции ствола скважины (удаление 270м и 781м). В результате обработ-

ки данных ВСП получен единый разрез (рис. 9), который позволил значительно закрыть зону отсутствия сейсмических данных.

На протяжении всего проекта особое внимание уделялось вопросам соблюдения требований промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды. Работы выполнялись в соответствии с Планом ПБОТОС, применялась система карт-наблюдений (фиксация и контроль устранения нарушений), на каждом этапе работ осуществлялась оценка рисков проекта. На подготовительном этапе и процессе полевых работ проводились регулярные аудиты задействованного оборудования и техники. Благодаря реализованным мероприятиям удалось выполнить весь объем работ без происшествий.

На рисунке 10 показана концептуальная схема выполнения проектов ВСП, которая была реализована на текущем проекте и позволила получить качественные данные ВСП, а также решить ключе-



▲ Рис. 10. Концептуальная схема реализации проектов по ВСП.

вые геологические задачи с учетом всех сложностей и ограничений.

Выводы

Выполненный проект можно считать эффективным, так как по результатам работ удалось решить ключевые геолого-геофизические задачи с учетом оптимальной методики и объемов работ в текущих условиях.

ВСП может быть эффективным инструментом для решения различных геолого-геофизических задач, на разных этапах геологоразведочных работ и разработки месторождений нефти и газа, при выполнении следующих условий:

- четкая постановка геолого-геофизических задач;
- выполнение сейсмогеологического моделирования для выбора и обоснования методики и технологии работ с учетом особенностей скважины, региона и оборудования;
- квалифицированный контроль полевых работ;
- детальный контроль обработки и интерпретационное сопровождение;

- анализ результатов работ с объективными выводами о качестве данных, решениях геолого-геофизических задач.

Благодаря комплексному подходу к реализации работ на данном проекте удалось успешно запланировать и выполнить работы ВСП с получением качественных данных, что позволило решить поставленные геолого-геофизические задачи и доказать эффективность работ ВСП.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность всем участникам, задействованным в процессе реализации проекта, особенно сотрудникам компаний АО «Башнефтегеофизика»/ООО «НПЦ Геостра».

Литература

1. Андреев А.Ю., Керусов И.Н., Бляс Э. А., Митин А.В., Черкашнев С.А., Моделирование и дизайн полевых работ ВСП МОГ для оценки VTI/TTI анизотропии, EAGE-2019, г. Тюмень, Россия.

2. Горбачев С.В., Титов А.Б., Обметко В.В., Рейдик Ю.В. Особенности планирования и выполнения 3D сейсморазведочного проекта в условиях предельного мелководья шельфа Печорского моря // Нефтяное хозяйство, №06, 2021.

3. Горбачев С.В., Яковлев А.П. Моделирование сейсмостъемок - инструмент повышения эффективности сейсморазведки // Seismic modelling – a tool to enhance seismic surveying // Oil & Gas Journal Russia. №10 (54), октябрь 2011.

4. Жужель А.С., Ленский В.А., Иркабаев Д.Р., Шарова Т.Н. Выбор модификации скважинной сейсморазведки при изучении околоскважинного пространства // Бурение и нефть, 2018. №9. С. 56-61.

5. Ленский В.А., Р.Я. Адиев, А.Я. Адиев «Скважинная сейсморазведка». – Уфа, 2012г-348с.

6. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Горбачев С.В., Жуков А.П. Решение методических и геологических задач методом ВСП в условиях вечной мерзлоты // Геофизика, 6, 2019.

7. Шехтман Г.А. «Вертикальное сейсмическое профилирование» -М: ООО «ЕАГЭ Геомодель», 2017г-286с.

8. Шевченко А.А. «Скважинная сейсморазведка». – М: РГУ нефти и газа, 2002г- 129с.

9. Черкашнев С.А. Обучающий курс по ВСП «Основы и теория метода ВСП. Методики и технологии полевых работ, обработка и интерпретация данных ВСП».



Горбачев
Сергей Викторович

к.т.н., начальник
управления реализации
ГРП ООО «РН-Шельф-
-Арктика»



Титов
Антон Борисович

главный специалист
управления реализации
ГРП ООО «РН-Шельф-
-Арктика»



Черкашнев
Сергей Алексеевич

к.т.н.,
эксперт-консультант
по ВСП
ИП Черкашнев С.А.,