

## Комплексный подход при разработке оптимальных технических условий выполнения 3D сейсморазведочных работ в мелководной части шельфа Печорского моря

■ Горбачев С.В., Титов А.Б., (ООО «РН-Шельф-Арктика»), г. Москва

*Аннотация. В работе представлен пример выбора технологии и методики сейсморазведочных работ для изучения шельфового участка в условиях арктического климата на примере конкретного участка. Показано, что детальный анализ природно-климатических особенностей района и реализация методики сейсмогеологического моделирования позволяют обосновать необходимость использования той или иной технологии и методики полевых работ, а также корректно оценить и спроектировать сейсморазведочные работы [1]. В статье выполнено сравнение технологий работ с буксируемым и донным оборудованием. Оценены преимущества и недостатки каждой из них для конкретных условий. Приводятся рекомендации по применению разных систем наблюдения для решения геологических задач.*

### Введение

Основная задача данной работы заключается в определении необходимых и достаточных для решения геологических задач, объемов сейсморазведочных работ 3D, а также выборе оптимальной технологии и методики выполнения полевых работ в короткий безледовый период на шельфе Печорского моря.

Существует две технологии выполнения морских сейсморазведочных работ: с буксируемым и донным оборудованием. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки, возможности и ограничения. При этом, применение той или иной методики зависит от ряда факторов (геологического строения объекта, сроков выполнения работ, глубины моря, бюджета и т.д.). Под методикой работ подразумевается использование технологии с определенным количеством, типом и параметрами оборудования: количество сейсмических кос, расстояние между ними, шаг пунктов приема и возбуждения, максимальное удаление и т.д.

### Природно-климатическая обстановка

Печорское море является юго-восточной частью Баренцева моря, ограниченной островами Вайгач и Колгуев. Район

планируемых геофизических исследований охватывает акваторию моря с глубинами от 18 до 30 м.

Климат района суровый, с продолжительной зимой и коротким безледовым периодом, что накладывает значительные ограничения на объемы работ, которые можно выполнить в полевой летне-осенний период, и, соответственно, на технологию и методику работ. На основании анализа ледовой обстановки за последние годы по данным различных источников можно сделать вывод о возможном периоде выполнения работ с конца июня-начала июля до конца октября-начала ноября (табл. 1).

Также, при оценке возможного периода и времени работ необходимо учитывать метеорологическую обстановку: температуру воздуха и воды, силу ветра, высоту волн, туманы и их периодичность и продолжительность. При неблагоприятных погодных условиях, например, высоте волны более двух метров, уровень шумов поднимается выше допустимых пределов и, соответственно, проводить работы невозможно. Так, например, по статистике: в июле количество нерабочих дней – 7%, августе – 10 %, сентябре – 15-25 %, октябре – 35-45% и ноябре – 50-60%.

► Табл. 1. Статистические данные по ледовой обстановке за последние 5 лет в районе планируемых работ.

| Год  | Освобождение района от льда | Начало ледообразования       |
|------|-----------------------------|------------------------------|
| 2010 | Конец июня- начало июля     | Конец октября- начало ноября |
| 2011 | Конец июня- начало июля     | Начало ноября                |
| 2012 | Начало июня                 | Конец октября- начало ноября |
| 2013 | Конец июня- начало июля     | Конец октября- начало ноября |
| 2014 | Начало июля                 | Начало ноября                |

Отрицательные температуры воздуха начинаются со второй половины сентября, что также сильно осложняет работы, вследствие чего происходит обледенение оборудования и ухудшение его характеристик. Использование специальных средств снижает и замедляет процессы ледообразования, но полностью защитить оборудование невозможно, так как оно постоянно находится в воде.

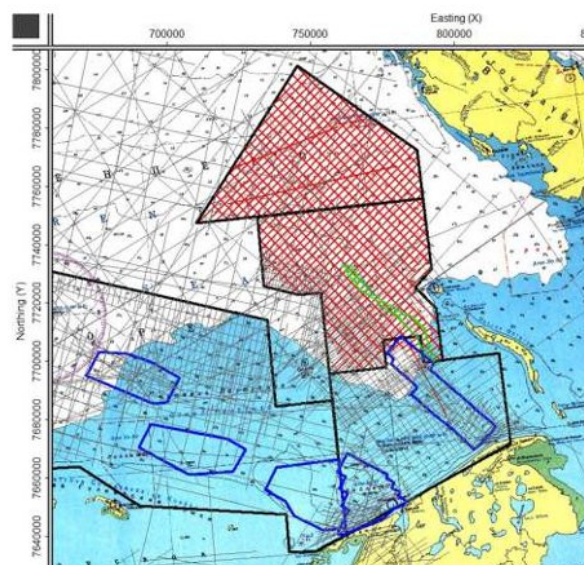
Важным фактором, ограничивающим и затрудняющим выполнение полевых работ, является продолжительность светового дня, которая зависит от географического положения участка работ. Из соображений безопасности в темное время суток нельзя выполнять спуско-подъемные операции с лодками, выполнять наладку, замену оборудования и т.д. Поэтому при поломке оборудования в темное время суток, его нельзя отремонтировать или заменить, что приводит к дополнительным простоям. Так, например, продолжительность светового дня в июне-июле составляет 24 часа, в конце августа - начале сентября 15-16 часов, а уже в ноябре до 4-6 часов за сутки.

### Изученность района работ

Участок работ изучен неравномерной сетью сейсмических профилей, которые были отработаны в 1980 – 2000-е года (коэффициент изученности 1.11). Важной особенностью работ прошлых лет, по сравнению с современными сейсморазведочными работами, является технология работ: использовались короткие сейсмические косы (2-2.5 км), регистрируемое и излучающее оборудование

имело менее стабильные характеристики (чувствительность, синхронизация и т.д.), шаг между пунктами приема и возбуждения составлял 50 и 100 м, соответственно. Все это приводило к низкой кратности наблюдений, недостаточной пространственной разрешенности данных и плохой освещенности глубоких горизонтов.

Для повышения изученности района работ и детализации геологического строения в пределах исследуемых участков в 2014 году были выполнены сейсморазведочные работы 2D (рис. 1) по сети сгущающих профилей 2х3 км. При этом коэффициент изученности стал – 1.9.



▲ Рис. 1. Район планируемых работ.  
 - **зеленый контур** – перспективные объекты;  
 - **красные линии** – сейсмические профили 2014 года;  
 - **черные контуры** – лицензионные участки;  
 - **синие контуры** – контуры 3D сейсмических работ.

С целью получения единой структурно-тектонической модели и динамически увязанных данных результаты предыдущих работ 1990х-2000х годов были переобработаны совместно с новыми данными по единому графу.

На рис. 2 представлены результаты переобработки сейсмических данных 1994 года, выполненной в 2003 году и сопоставление с переобработкой этих же данных в 2014 году. Применение современных технологий временной обработки сейсмических данных, а также алгоритмов построения сейсмических изображений, позволило улучшить качество геолого-геофизической информации за счет значительного улучшения прослеживаемости основных горизонтов, увеличения горизонтальной и вертикальной разрешенности данных, лучшего картирования разрывных нарушений и тд. Полученные результаты позволили переоценить геологическое строение участка, что дало возможность уточнить положение и размеры перспективных объектов.

Участок исследуемых работ находится рядом с уже открытыми месторождениями, перспективность которых доказана. По результатам проведенных 2D работ можно говорить о перспективности данного участка для бурения и разработки. Для уточнения строения, характеристик перспективных структур и определения точки бурения необходимо проведение сейсморазведочных работ 3D.

#### **Моделирование для оценки необходимых параметров работ**

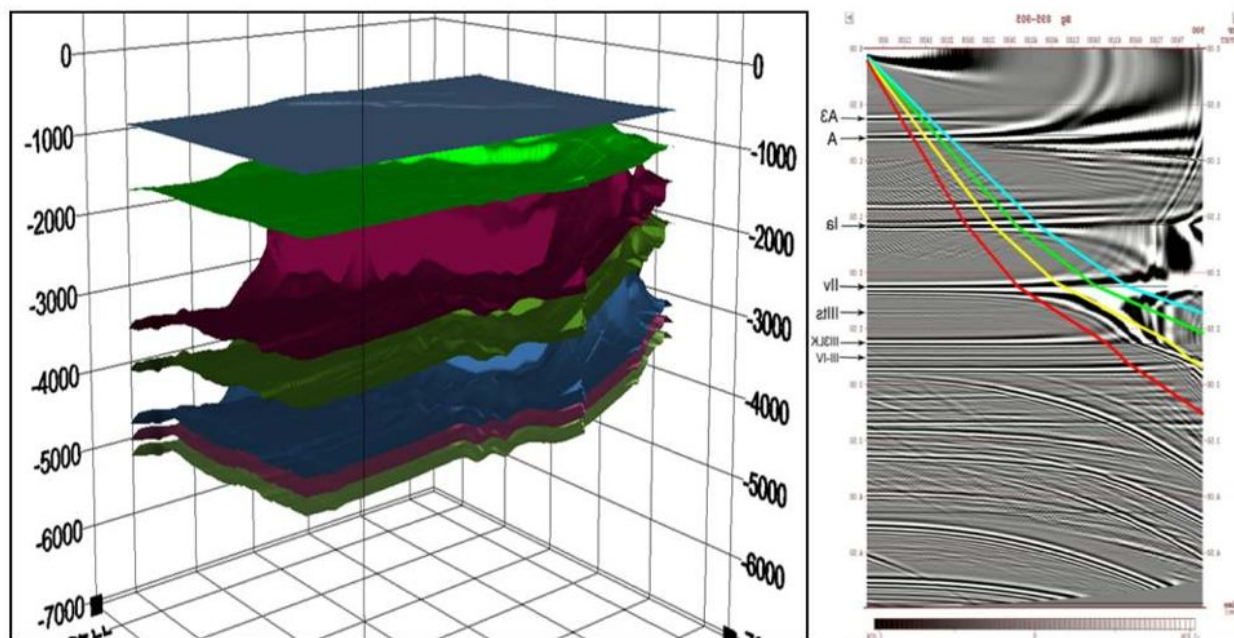
Для получения качественных данных сейсморазведки 3D большое значение имеет применяемая система наблюдения, так как конфигурация системы и ее параметры оказывают существенное влияние на результаты работ и возможности решения геологических задач [4,6].



▲ Рис. 2. Сравнение результатов обработки (2003 г.) и переобработки (2014 г.) сейсмических данных 2D.

Наиболее корректным способом оценки эффективности возможных систем наблюдения и выбора оптимальной для повышения результативности сейсморазведки является использование при проектировании полевых работ сейсмогеологического моделирования. По результатам анализа данных предыдущих работ было выполнено построение геолого-геофизической модели исследуемого участка (в варианте 2D и 3D), моделирование синтетических данных и детальный анализ параметров и атрибутов для выбора оптимальной технологии и методики полевых работ. На рис. 3 представлена построенная 3D модель исследуемого участка и приведена рассчитанная синтетическая сейсмограмма.

Важным параметром любой системы наблюдения является максимальное удаление источник-приемник. Это удаление, которое позволяет регистрировать отражения от глубокозалегающих и круто наклоненных границ, и впоследствии получать изображение необходимых объектов.



▲ Рис. 3. 3D модель участка планируемых работ и рассчитанная синтетическая сейсмограмма.

Определение необходимого максимального удаления выполнялось двумя способами: через оценку растяжения сейсмического импульса (в процентах) и анализ углов отражения сейсмической волны по сейсмограммам ОСТ. При обработке сейсмических данных зачастую используют мьютинг по растяжению импульса 30%-35%, что соответствует примерно 40-50 градусам углов отражения падающей волны. На основании анализа реальных и модельных данных было определено, что максимальное удаление системы наблюдения должно быть не менее 6000 м.

Далее оценивалась длина записи сейсмических данных - с учётом вертикального времени пробега волны до самой глубокой границы исследования и максимального выноса, необходимости регистрации полной волновой картины, включая дифрагированные волны. Расчетное время записи составило не менее 6 с.

Затем проводились работы по анализу разрешенности сейсмической записи - возможности распознавать объекты определённого размера. Вертикальная

разрешающая способность позволяет разделять объекты по глубине, она прямо зависит от частоты и скоростных характеристик разреза. Горизонтальная разрешающая способность позволяет распознавать объекты по латерали. Чаще всего она принимается от четверти до половины преобладающей длины волны. С точки зрения параметров системы наблюдений, горизонтальная разрешенность критична при выборе размеров бина. В таблице 2 представлен расчет размера бина для различных частот при угле наклона границ 30 градусов (максимальный угол).

Немаловажным фактором, влияющим на точность и качество построения сейсмического изображения, является апертура миграции. При проектировании контура съемки необходимо увеличить зону полной кратности относительно перспективного контура, чтобы сформировать правильную апертуру миграции для корректного учета сейсмического сноса. Размеры зоны, на которую необходимо увеличить площадь съемки (в отличие от перспективного объекта), зависят от глубины залегания объекта,

| Горизонт | Глубина, м | Размер бина для частоты 20 Гц, м | Размер бина для частоты 30 Гц, м | Размер бина для частоты 40 Гц, м | Размер бина для частоты 50 Гц, м | Размер бина для частоты 60 Гц, м |
|----------|------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1        | 800        | 61.25                            | 40.83                            | 30.63                            | 24.50                            | 20.42                            |
| 2        | 1000       | 61.52                            | 41.01                            | 30.76                            | 24.61                            | 20.51                            |
| 3        | 2700       | 67.49                            | 45.00                            | 33.75                            | 27.00                            | 22.50                            |
| 4        | 3200       | 73.11                            | 48.74                            | 36.56                            | 29.25                            | 24.37                            |
| 5        | 4000       | 79.60                            | 53.07                            | 39.80                            | 31.84                            | 26.53                            |
| 6        | 4200       | 79.62                            | 53.08                            | 39.81                            | 31.85                            | 26.54                            |
| 7        | 4400       | 80.43                            | 53.62                            | 40.21                            | 32.17                            | 26.81                            |

▲ Табл. 2. Расчет размера бина по горизонтам для различных доминантных частот сигнала, глубин для углов наклона границы до 30°.

скоростей и углов наклона. Увеличение площади необязательно должно быть одинаковым во всех направлениях, она может изменяться в зависимости от наклона границ.

Для оценки апертуры миграции было выполнено 3D моделирование по построенной глубинно-скоростной модели участка. По результатам анализа рассчитанных атрибутов (карт) апертура миграции составила не менее 5 км (для углов до 50 градусов). Однако по результатам тестирования, во время выполнения обработки реальных данных, в качестве оптимальной выбрана апертура 6 км. При проектировании контур съемки был увеличен в поперечном направлении на 6 км, в продольном - на 4 км относительно перспективного объекта. В данном случае неравномерность увеличения контура обусловлена геологическим строением, то есть разными углами наклона структуры в продольном и поперечном направлениях. Примерная площадь геологического объекта составляет около 250 кв.км.. С учетом апертуры миграций контур исследования должен быть не менее 800 кв.км.

#### Выбор технологии и методики работ

Глубины моря в пределах участка планируемых работ позволяют использовать технологию как с буксируемым, так и с донным оборудованием. При выборе методик с буксируемым оборудованием

важно понимать, что для покрытия контура исследований полной кратностью необходимо учитывать заход (длина сейсмической косы) и выход (половина длины косы) судна с профиля. Большое количество сейсмических кос увеличивает радиус разворота судна, а также приводит к большему провисанию оборудования на поворотах и повышает риск зацепления оборудования за дно. Поскольку рядом с перспективным объектом (около 10 км) находятся острова и глубины моря значительно меньше 18 м, выполнение работ вкост структуры возможно не более, чем с 8-ю косами.

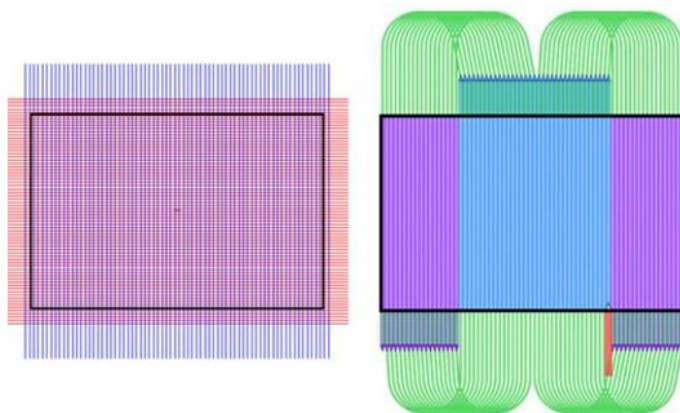
При выборе методик с донным оборудованием основополагающими являются производительность и необходимое количество сейсмического оборудования. На основании эмпирических критериев, установленных эффективностью работ прошлых лет в данном регионе, для анализа были выбрана методика с 8-ю активными линиями приема и ортогональным расположением линий возбуждения.

Были проанализированы следующие методики для каждой из технологий работ:

- с буксируемым оборудованием (4-х, 6-ти, 8-косовые суда, сепарация 100 м, 480 каналов, шагом ПП – 12.5 м, и шагом ПВ - 25 м (флип-флоп – 50 м));
- с донным оборудованием (шаг

ЛПП/ЛПВ 300/400, 400/300, 400/400, и 300/300 с 8-ю активными линиями приема по – 132 ПП, через 50 м, шагом ПВ – 25 м).

Для анализа производительности рассматриваемых технологий был выбран произвольный контур объемом 800 кв.км. На рис. 4 представлены схемы отработки данного контура с донным и буксируемым оборудованием.



◀ Рис. 4. Схема отработки участка 800 кв.км. с использованием донного (слева) и буксируемого (справа) оборудования.

Для расчета времени отработки участка с буксируемым оборудованием скорость сейсмического судна была принята равной 4,5 узла при работе на профиле, и 4 узла при разворотах.

Для расчета времени с донным оборудованием скорость отстрела судном-источником была установлена в 4,5 узла, для раскладки/сбора сейсмического оборудования скорость раскладки/сбора равнялась 3 узлам (средняя, с

учетом захода на линию и разворотов). При активном шаблоне в 1056 каналов наличие 2-3х комплектов регистрирующего оборудования позволяет выполнять работы конвейерным способом, фактически без остановки.

Как уже говорилось выше, при планировании работ в северных морях необходимо закладывать дополнительный

процент простоев по погодным условиям. От года к году они изменчивы и могут значительно повлиять на сроки выполнения работ. Также важным фактором, определяющим простои, являются причины технического характера: выход из строя сейсмического и пневматического оборудования (обмерзание буюв, обмерзание пневмопушек и т.д.), а также самих судов.

В таблице 3 представлено сравнение

▼ Табл. 3. Сравнение производительности технологий с буксируемым и донным оборудованием.

| Параметры                                      | Донное оборудование |           |           |           | Буксируемое оборудование |         |         |
|------------------------------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|---------|---------|
| Количество приемных кос                        | 8                   | 8         | 8         | 8         | 4                        | 6       | 8       |
| Расстояние между косами                        | 300                 | 300       | 400       | 400       | 100 м                    |         |         |
| Расстояние между ЛПВ                           | 300                 | 400       | 300       | 400       | -                        |         |         |
| Шаг ПП                                         | 50                  | 50        | 50        | 50        | 12.5 м                   |         |         |
| Шаг ПВ                                         | 25 м                | 25 м      | 25 м      | 25 м      | 25 м (флип-флоп 50 м)    |         |         |
| Кратность                                      | 88                  | 80        | 88        | 64        | 60                       |         |         |
| Размер бина                                    | 25x12.5 м           | 25x12.5 м | 25x12.5 м | 25x12.5 м | 6.25x25 м                |         |         |
| Время с учетом погодных и технических простоев | 173 дня             | 156 дней  | 153 дня   | 133 дня   | 54 дня                   | 37 дней | 28 дней |

время работы на участке контура 800 кв.км. с буксируемым и донным оборудованием. По результатам анализа расчетов можно сделать вывод, что работы с донным оборудованием будут более времяёмкими, чем работы с буксируемым оборудованием.

Наиболее существенным отличием систем наблюдений с донным оборудованием от систем наблюдений с буксируемым оборудованием являются их азимутальные характеристики. На рис. 5 представлены диаграммы распределения трасс по удалениям и азимутам для двух выбранных технологий. Представленные системы наблюдения с донным оборудованием считаются широкоазимутальными или среднеазимутальными [2]. При этом использование систем с буксируемым оборудованием (при условии использования одного судна и одного прохода) позволяет получить данные только в очень узком диапазоне азимутов. Фактически получается неполное 3D, а 2D методом широкого профиля. Очень часто азимутальность получаемых сейсмических данных является критичным фактором при изучении сложнопостроенных сред, где необходимо всесторонне осветить геологический объект, оценить анизотропию и т.д. [2, 3]. Поэтому, при проектировании сейсморазведочных работ необходимо всесторонне оценивать параметры освещенности геологи-

ческих объектов и принимать решения о целесообразности использования той или иной системы наблюдений на этом этапе геологоразведочных работ.

Одной из важных характеристик систем наблюдений в сейсморазведке, которая может повлиять на качество получаемого результата от работ, является кратность. На рис. 6 представлены графики распределения эффективной кратности в зависимости от удаления для технологий с донным и буксируемым оборудованием для разных размеров бина. Стандартно, размер бина определяется шагом между пунктами приёма и возбуждения, но в связи возможностью установки регистрирующего оборудования в буксируемой косе с более мелким шагом (12.5 м), шаг ОСТ получается 6.25 м. То есть для анализируемых выше технологий с буксируемым оборудованием расчетный размер бина составляет 6.25x25м, а для технологий с донным оборудованием 25x12.5 м.

Для обоснованного сравнения кратности различных систем наблюдения необходимо привести бины к одинаковому размеру во всех направлениях (объединить бины), в данном случае к 25x25 м. На рис. 6 представлено сравнение графиков набора кратности для технологий с донным и буксируемым оборудованием. Можно видеть, что для расчетного размера бина система наблюдения с дон-

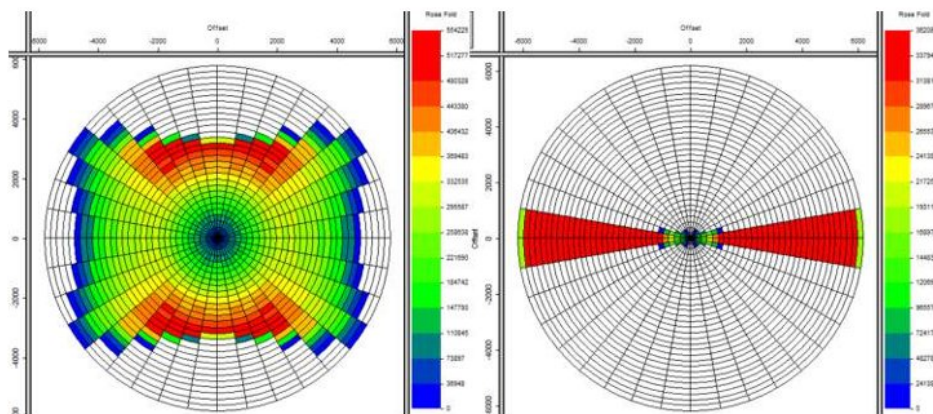
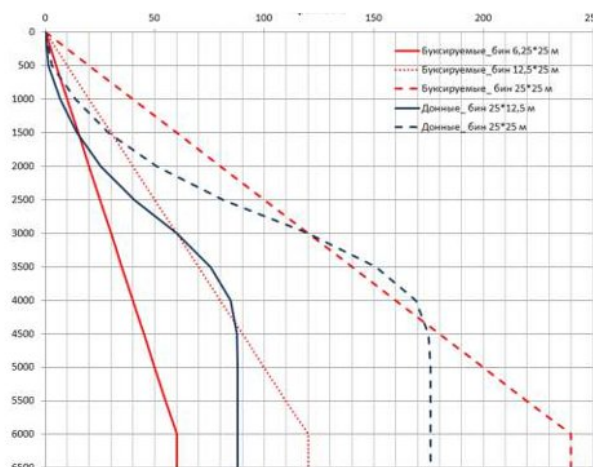


Рис. 5. Диаграммы распределение трасс по удалениям и азимутам донной (слева) и буксируемой (справа) технологий.

ным оборудованием обладает более высокой кратностью, но после приведения к одинаковому размеру бина видно, что наоборот, технология с буксируемым оборудованием при такой методике работ имеет на ближних и дальних удалениях большую кратность, а на средних они сравнимы.



▲ Рис. 6. Графики набора кратности по удалению для технологий с донным и буксируемым оборудованием.

Для дальнейшего анализа и проектирования будет использоваться технология с буксируемым оборудованием (4 косы, сепарация 100 м, длина кос 6000 м), что позволит максимально близко подойти к береговой линии и покрыть большую зону, тем самым максимально осветив целевые объекты со стороны суши.

Для работ с донным оборудованием будет использоваться методика с 8 активными линиями по 132 канала в каждой, шагом между линиями приема 400 м и линиями возбуждения 300 м. При данных параметрах методики мы сможем получить достаточно хорошую кратность и производительность работ.

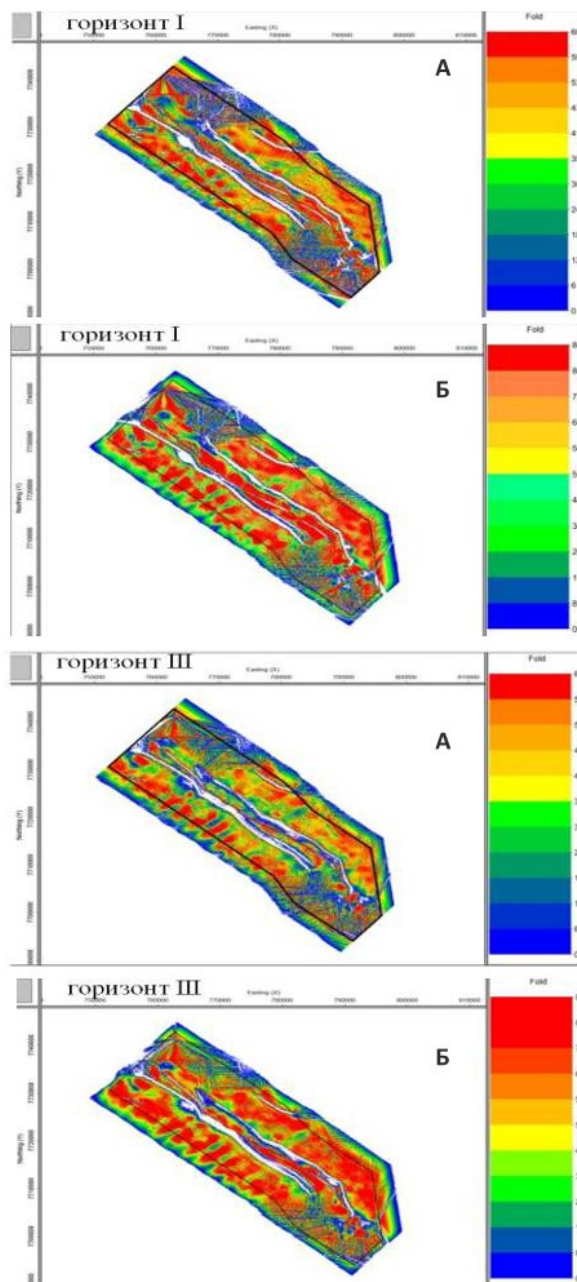
### Проектирование

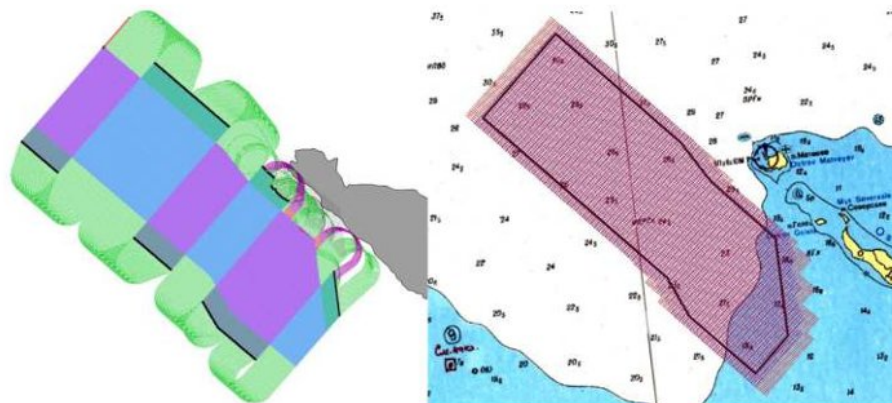
На основании выполненных расчетов с учетом апертуры миграции, общий объем контура составляет 800 кв. км.

Классический подход к выбору азиму-

та обработки основан на форме перспективного объекта, простирающему разломных зон и т.д. В данной работе определение оптимального азимута отстрела выполнялось на основании 3D моделирования. Расчеты и анализ карт освещенности по основным горизонтам (рис. 7) показали более надежное прослеживание перспективных объектов и разлом-

▼ Рис. 7. Карты освещенности для методик с буксируемым (А) и донным (Б) оборудованием для азимута отработки вкрест перспективных объектов.





◀ Рис. 8. Отработка площади с буксируемым (слева) и донным (справа) оборудованием.

ных зон при отработке участка вкрест структуры для методик как с буксируемым, так и с донным оборудованием.

На рис. 8 представлены схемы отработки контура сейсморазведочных работ 3D с буксируемым и донным оборудованием.

В таблице 4 представлено сравнение морских технологий сейсморазведочных работ анализируемых в данной работе.

▶ Табл. 4. Сравнение технологий с буксируемым и донным оборудованием.

|                                | Буксируемое оборудование<br>4 косы | Донное оборудование<br>8 линий приема |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Производительность, кв.км/день | 10-15                              | 4-5                                   |
| Азимутальность                 | 0.1                                | 0.7-1.0                               |
| Стоимость, млн. руб.           | 0.5-0.8 кв.км                      | 1.2-1.5 кв.км                         |

На основании результатов моделирования, анализа карт освещенности перспективных горизонтов, возможных сроков выполнения полевых работ в короткий сезон, производительности технологий, глубин моря в пределах участка работ, а также анализа стоимости работ можно обоснованно рекомендовать использование технологии с буксируемым оборудованием и параметрами методики - 4 косы с длиной 6000 м и сепарацией 100 м.

### Выводы

Выполнение геолого-геофизических исследований на Арктическом шельфе включает в себя множество рисков различного характера, начиная со сложных природно-климатических условий

региона, короткого безледового периода и заканчивая отсутствием развитой береговой инфраструктуры в регионе для оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации. На этапе планирования и подготовки полевых работ необходим тщательный анализ всех возможных рисков и путей их минимизации. Только такой подход позволяет выполнить все запланированные работы

на высоком уровне в максимально сжатые сроки.

В рамках данной работы, на примере участка в Печорском море, представлен комплексный методический подход к проектированию морских сейсморазведочных съемок 3D на шельфе, который позволил проанализировать и учесть географические и климатические особенности региона, сравнить возможности технологий с буксируемым и донным оборудованием, а также различных вариантов методик (количество кос, шаг ПП и ПВ и т.д.) сейсмических работ.

Для обоснованного выбора наиболее оптимальной технологии и методики проведения полевых работ было выполнено сейсмогеологическое моделирова-

ние, включающее в себя построение глубинно-скоростной модели среды, расчет синтетических данных и карт атрибутов. На основе построенной модели участка работ были оценены преимущества и недостатки различных технологий полевых работ с точки зрения «освещенности» целевых объектов.

Применение выбранной технологии и методики работ позволит выполнить весь объем запланированных работ в течение одного полевого сезона, получить качественные данные и решить геологические задачи.

Четкое понимание геологических задач, стоящих перед сейсморазведочными работами, и всесторонний анализ всех факторов, влияющих на выполнение работ, позволяют минимизировать возможные риски при выполнении полевых работ на этапе их проектирования и подготовки.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам за помощь в подготовке данной работы.

#### Литература

1. Горбачев С.В.// Современные технологии морских сейсморазведочных работ и их применение для разведки на Арктическом шельфе России//Научно-практическая конференция«Сейсмические технологии», Москва, 21-23 апреля 2014г.
  2. Горбачев С.В. Особенности анализа и проектирования широкоазимутальных систем наблюдения // Tyumen 2013 - New Geotechnology for the Old Oil Provinces, Russia, Tyumen, 25-29 March 2013.
  3. Горбачев С.В., Яковлев А.П. Моделирование сейсмосьемок - инструмент повышения эффективности сейсморазведки // Oil & Gas Journal Russia. №10 (54), октябрь 2011.
  4. Brown G. The Why and How of Marine Wide Azimuth Technology. 2009.
  5. Cordsen A., Galbraith M., Preice J.W.//Planning Land 3D Seismic Surveys. 2000.
- Vermeer G.O. 3-D Seismic Survey Design. SEG. // Geophysical reference series No.12. 2002.

#### Подробнее об авторах



Горбачев  
Сергей Викторович

к.т.н., начальник отдела  
геофизики ООО  
«РН-Шельф-Арктика».



Титов  
Антон Борисович

главный специалист  
отдела геофизики ООО  
«РН-Шельф-Арктика».