

Регистрация и обработка сейсмических данных в арктических условиях

■ Шон Л. Райс (Shawn L. Rice), Тим Дадли (Tim Dudley), Кёрт Шнайдер (Curt Schneider), Рэй Дж. Пирс (Ray J. Pierce), Брайан Хорн (Brian Horn), Скотт Кэмерон (Scott Cameron), Роберт Блёр (Robert Bloor) и Чжен Чжен (Джо) Чжоу (Zheng-Zheng (Joe) Zhou), ION Geophysical

В связи с непрерывно растущим мировым спросом на энергоносители нефтегазовые предприятия разрабатывают новые технологии для разведки и добычи углеводородов в более сложных производственных и природных условиях (например, глубоководные площади или глубокозалегающие геологические объекты), а также технологии для освоения удаленных регионов, таких как Арктика, где геологоразведочные работы ранее не проводились. Попытки геологического изучения Арктики неоднократно предпринимались в течение всего прошлого века, однако отсутствие необходимых технологий сводило все начинания такого рода к исследованиям периферийных зон этого обширного региона, характеризующегося наличием многочисленных осадочных бассейнов. Несмотря на огромную ресурсную базу (рис. 1), объемы геологоразведочных работ и разработки месторождений в пределах региона и по сей день являются незначительными в связи с суровыми климатическими условиями и большой удаленностью от объектов действующей инфраструктуры.

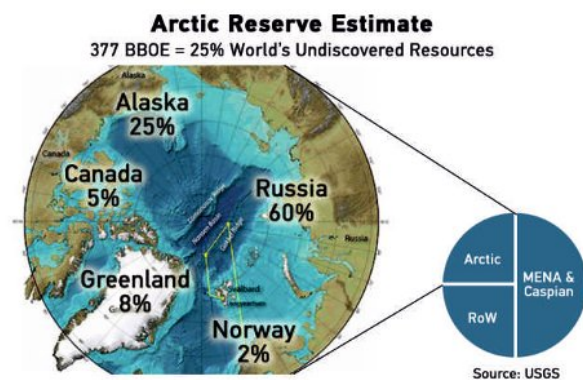
По последним оценкам Геологической службы США в Арктике сосредоточено до 25% мировых неразведанных ресурсов УВ. Предполагается, что 84% от общей доли неразведанных арктических ресурсов сосредоточено на морских площадях и относится к классу вероятных запасов (P50): нефть — 90 млрд баррелей, газ — 1667 трлн куб. футов, ШФЛУ — 44 млрд

баррелей (Bird et al., 2008). В настоящее время запасы открытых месторождений региона составляют 40 млн баррелей нефти и 1100 трлн куб. футов газа, что свидетельствует о наличии действующего нефтегазового комплекса. По оценкам специалистов, месторождения с запасами от 1 до 10 млрд баррелей нефтяного эквивалента распространены на территории рассматриваемого региона практически повсеместно, причем наибольшей нефтегазоносностью характеризуются секторы Чукотского моря в акватории Аляски и России. Оценки ресурсной базы региона варьируются в широком диапазоне, однако все специалисты сходятся во мнении, что рассматриваемый регион характеризуется довольно высокими показателями по объему неразведанных ресурсов УВ. В данной работе рассматриваются некоторые технологии, которые позволяют решать задачи, возникающие при работе в арктических условиях, причем основное внимание уделяется технологиям морской сейсморазведки с применением буксируемой сейсмической косы.

Основными препятствиями для регистрации сейсмических данных в арктических условиях являются суровые климатические условия и высокие требования к охране окружающей среды. Экстремальные условия производства работ, такие как ограниченная продолжительность светового дня, чрезвычайно низкие температуры воздуха и непредсказуемая динамика изменения характеристик

ледового покрова, сокращают полевой сезон для проведения сейсморазведочных работ с применением стандартных технологий, повышают риск повреждения погружного оборудования, а также приводят к появлению нежелательных помех в сейсмических данных. Более того, удаленность района от действующей инфраструктуры способствует возникновению дополнительных рисков в области охраны труда, техники безопасности и защиты окружающей среды, а также сопутствующих рисков в области логистики. Необходимость учитывать традиции и обычаи местного населения, которое во многом зависит от морского промысла, еще больше ограничивает производство сейсморазведочных работ, как по продолжительности полевого сезона, так по типу используемого оборудования. Все эти ограничения в совокупности с экологическими, социальными и политическими аспектами проведения работ на территории этого «последнего неосвоенного рубежа» стали основной причиной слабой изученности арктического региона сейсмикой и низкого качества имеющихся сейсмических данных.

Понимая необходимость получения новых данных морской сейсморазведки в акватории Арктики, корпорация ION Geophysical в 2006 г. начала выполнять регистрацию сейсмических данных 2D при больших удалениях (длина кабеля — 9 км, длина записи — 18 с) с применением стандартных методов в открытой воде и в непосредственной близости от кромки ледового покрова. За последующие три года компания расширила свои возможности, разработав технологии и оборудование для подледной регистрации.



▲ Рис. 1. Оценка ресурсной базы и нефтегазоносность Арктики.

Для эффективной сейсморазведки в арктических условиях было необходимо пересмотреть технологическую схему производственного процесса. В частности, погружное регистрационное оборудование, которое в стандартной технологии привязывалось к маркерам на поверхности воды, было перенесено в подледные условия. Разработкой специализированных технологий и инструкций по безопасному и эффективному производству сейсморазведочных работ занималось специально созданное для этих целей подразделение в составе специалистов по регистрации данных, геофизиков, капитанов судов, ледовых лоцманов и инженеров с опытом эксплуатации морских судов в ледовых условиях. Для адаптации существующих технологий и оптимизации технологического процесса были привлечены инженеры-механики, электрики, системотехники, специалисты по навигации и позиционированию судов и другие специалисты.

Для работы в суровых условиях Арктики были тщательно подобраны тип и класс морского судна, погружное оборудование для регистрации данных (с учетом надежности, мощности и рабочего диапазона температур окружающей среды), комплексные системы навигации и позиционирования, оборудо-

дование и системы для контроля, прогнозирования и управления ледовой обстановкой. Кроме того, были разработаны технологии развертывания и эксплуатации погружного оборудования с целью предотвращения столкновений с ледовыми блоками, приводящих к повреждению имущества. Накопленный опыт позволил нашим специалистам выявить целый ряд проблем, которые следовало учитывать при разработке окончательной схемы производственного процесса. По результатам анализа основных технических сложностей были разработаны интегрированные решения, обеспечивающие эффективную регистрацию сейсмических данных высокого качества при больших удалениях в ледовых условиях. Далее в статье будут подробнее рассмотрены некоторые из этих решений.

Совместная работа двух судов ледового класса.

С первыми трудностями специалисты столкнулись уже на этапе выбора подходящего морского судна ледового класса. Это кажется очевидным, но выбор судов, имеющих ледовый класс, требуемый для работы в арктических условиях, и оборудованных для проведения морской сейсморазведки, весьма ограничен.

Для сопровождения сейсмического судна необходимо использовать ледокол арктического класса, который будет не только прокладывать путь для прохода основного судна сквозь льды, но и обеспечивать безопасность производства сейсморазведочных работ. Привлечение ледокола для проводки сейсморазведочного судна, буксирующего длинную морскую косу с источниками, ставит новые задачи. В общем случае, при сопровождении судна ледоколом, именно экипаж ледокола принимает все

важные решения, такие как корректировка курса для прохода по траектории наименьшего сопротивления, определение безопасного расстояния между судами, а также указание сопровождаемому судну совершить остановку на время создания ледового прохода на наиболее сложных участках ледовых торосов или многолетнего льда.

Регистрация сейсмических данных в ледовых условиях требует разработки и выполнения особых требований по координации действий и маневрированию судов. В отличие от стандартной миссии сопровождения, упомянутой выше, уже ледокол должен выполнять команды, поступающие с сейсмического судна, непрерывно прокладывая в то же время путь, запланированный в программе сейсморазведочных работ. Дополнительная сложность состоит в том, что сейсморазведочное судно не может остановиться, если коса развернута в рабочее положение. Такая постановка задачи является непривычной для капитана и экипажа ледокольного судна. На международных рынках предложение ледоколов, как и сейсморазведочных судов ледового класса, ограничено, поэтому привлечение ледокольного судна соответствующего класса, подходящего для выполнения работ в конкретных ледовых условиях, также является проблематичным (рис. 2).



▲ Рис. 2. Суровые арктические условия.

Опытные морские специалисты

Когда подходящие суда зафрахтованы, нужно обеспечить их экипажем, состоящим из квалифицированных морских специалистов с опытом работы в ледовых условиях. Предложение морских специалистов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, как и предложение морских судов — весьма ограничено. Для успешного выполнения сейсморазведочных работ важен не только правильный выбор судна (с точки зрения класса и пригодности к конкретным ледовым условиям), но и наличие у экипажа достаточного опыта эксплуатации судов в ледовой обстановке. Новый порядок сопровождения сейсморазведочных судов, при котором отсутствует возможность остановки судна после размотки косы, является серьезным вызовом для экипажа ледокола.

Кроме того, для работы в интегрированной системе контроля ледовой обстановки нужны опытные ледовые лоцманы. Эти специалисты должны иметь высокую квалификацию, обширный опыт работы в ледовых условиях, обладать уверенными аналитическими навыками для анализа наиболее эффективных маршрутов движения перед началом сейсморазведочных работ, а также навыками оперативного анализа текущей ледовой обстановки и технических требований сейсмосъемки после выдвижения в район производства работ. Также ледовый лоцман должен быть способен к эффективному сотрудничеству, работе в коллективе и обладать коммуникационными навыками для продуктивной работы с капитанами судов и экипажами, а также другими специалистами, занятыми в проекте. Таких экспертов очень мало и в настоящее время назрела необходимость подготовки специалистов с нужными навыками для производства работ в



▲ Рис. 3. Использование двух судов для подледной регистрации данных.

будущем.

Особый подход к производству работ в ледовых условиях

В связи со специфическими рисками при производстве работ в ледовых условиях возникает необходимость пересмотра и корректировки рабочих процессов, а также разработки специального руководства по производству работ в ледовых условиях. Неблагоприятные погодные условия, в том числе низкие температуры, оледенение и снежный покров, а также укороченный световой день требуют изменения конструкции кормовой части и порядка выполнения производственных операций на корме. В частности, необходимо пересмотреть



Рис. 4. - Ледокол «Oden» сопровождает сейсморазведочное судно.

порядок развертывания и подъема погружного оборудования с помощью специальных приспособлений для организации работ в подледных условиях как для расстановки ПВ, так и для буксируемой косы. Требуется разработать специальные инструкции по аварийному подъему оборудования в случае внеплановой остановки судна. Удаленность района наблюдений от объектов действующей инфраструктуры требует корректировки плана ликвидации возможных аварий (ПЛВА) и медицинской эвакуации с целью обеспечения безопасности всех участников проекта.

Комплексная система контроля и управления

Для производства работ в составе флотилии необходима комплексная навигационная система. В отличие от систем, используемых при обычной сейсморазведке, навигационная система для работы в Арктике должна иметь возможность интеграции данных от различных источников, включая данные, полученные от системы управления ледовой обстановкой (показания радара, спутниковые снимки, характеристики ледового покрова, многодневные прогнозы и т. д.), а также возможность проработки вариантов курса сейсморазведочного судна. Для точного определения координат начала сейсмопрофилей в режиме реального времени навигационная система должна учитывать параметры направления и сноса ледовых блоков, а также положение и скорость ледокола относительно сейсмического судна. Кроме того, навигационная система должна рассчитать курс ледокола, который обеспечит своевременную постановку сейсмического судна и морской косы в начальную точку сейсмопрофиля в полном соответствии с запланирован-

ной схемой наблюдений. При работе в открытых водах сейсмическое судно просто следует назначенным курсом с незначительными корректировками на воздействие приливов и течений. При подледной регистрации сейсморазведочное судно должно следовать курсом, который прокладывает ледокол. Следовательно, требования к работе ледокола продиктованы необходимостью поддержания интервала (дистанция и время) между судами и учета параметров образования и дрейфа льда. Ледокол должен прокладывать курс в строгом соответствии с программой работ (дистанция и время), чтобы следующее за ним сейсморазведочное судно придерживалось курса, соответствующего направлению планового сейсмопрофиля. Движение судов показано на рис. 3.

Современные навигационные системы позволяют легко управлять сейсморазведкой, проводимой в составе флотилии. Обычно одно из судов назначается головным, а второе ложится на проложенный курс и поддерживает соответствующую дистанцию до головного судна. Тем не менее, при производстве работ в ледовых условиях необходимо учитывать и третью составляющую процесса — наличие движущегося льда вокруг сейсморазведочного судна и погружного оборудования.

Как правило, направление движения ледовых блоков не совпадает с направлением движения сейсморазведочного судна. Необходимо заблаговременно прогнозировать положение ледокола, чтобы свободная ото льда полоса находилась вдоль трассы планируемого сейсмопрофиля именно в тот момент, когда сейсморазведочное судно подходит к нужной точке. Также необходимо контролировать движение льдин в направлении сейсмопрофиля до тех пор,

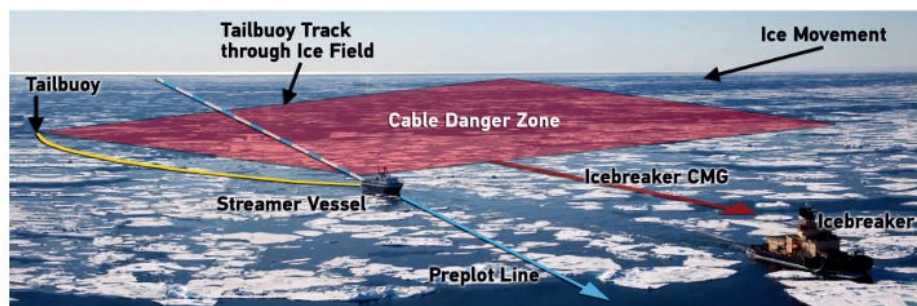


Рис. 5. Схема работы во льдах.

пока буксируемая морская коса не выйдет из опасной зоны с подводной грядой торосистых льдов.

На рисунке 5 схематично показан принцип работы во льдах. Требования по контролю за ледовой обстановкой упрощаются в случае отсутствия льдин с большой осадкой. Тем не менее, в условиях глетчерных и многолетних льдов глубина осадки льдин может превышать глубину буксировки морской косы, что приводит к необходимости аварийного погружения оборудования для предотвращения его повреждения.

Программный комплекс контроля и управления Orca полностью интегрирован в систему контроля ледовой обстановки, разработанной корпорацией ION, что помогает принимать ключевые производственные решения быстро и обоснованно.

Комплексная система контроля ледовой обстановки Narwhal

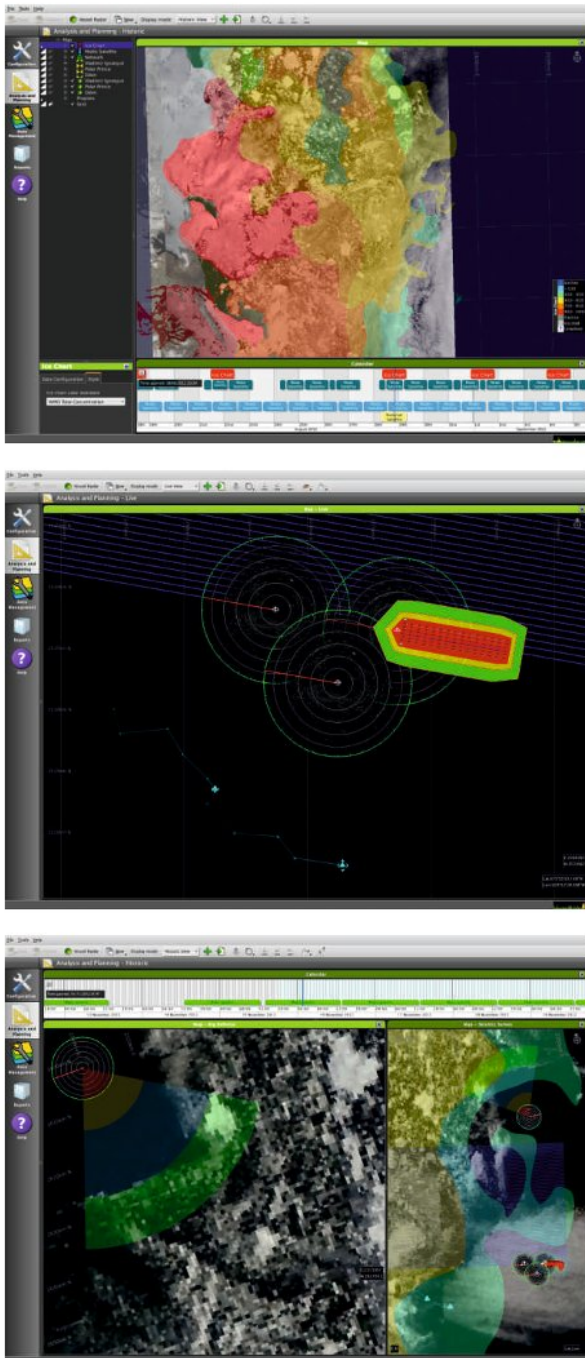
Для анализа и контроля состояния и движения льда при производстве подледной регистрации сейсмических данных необходим комплексный план управления ледовой обстановкой, навигации, позиционирования и связи для всех судов флотилии.

Традиционные системы управления ледовой обстановкой, характеризующиеся предоставлением отдельных данных и отсутствием интеграции, многие годы фактически не менялись. Столкнувшись с недостатками типовых систем, корпора-

ция ION разработала собственную комплексную систему контроля ледовой обстановки Narwhal, помогающую эффективнее выполнять сейсморазведку в Арктике. Хотя система Narwhal была разработана именно для проведения сейсморазведки в ледовых условиях, она с успехом может применяться при коммерческом судоходстве и при выполнении буровых работ.

Комплекс Narwhal представляет собой распределенную систему управления ледовой обстановкой, установленную на все суда, занятые в выполнении сейсморазведочных работ. Система позволяет ледовым лоцманам, экспертам и аналитикам визуализировать, анализировать и отслеживать ледовую обстановку, а также помогает снизить риски при проведении морских работ в арктическом регионе.

Интегрированная технология и протоколы связи разрабатывались на базе существующих ледовых навигационных установок, радиолокационных станций и технологии спутниковых снимков, которые комбинируются с собственным программным комплексом корпорации ION, предназначенным для навигации и позиционирования. Кроме того, система имеет встроенную адаптированную схему производства сейсморазведочных работ в ледовых условиях. Применяемый протокол обеспечивает эффективный обмен информацией и изображениями между судами флотилии для оперативной координации действий и плани-



▲ Рис. 6. Комплексная система контроля ледовой обстановки Narwhal.

рования дальнейших мероприятий с учетом различных вариантов ледовой обстановки на ближайшую и долгосрочную перспективы.

Разработанная на основе обширного опыта подразделения Concept Systems в области контроля и управления работами в составе флотилии, эта технология представляет собой гибкий, настраиваемый

и надежный инструмент для коммуникации между судами с максимальным использованием выделенных частот. Наличие надежной голосовой связи между ледоколом и сейсморазведочным судном имеет важнейшее значение для успешного производства работ. Ледовые лоцманы обоих судов в любой момент времени должны иметь возможность обсуждать ледовую обстановку и ледовые препятствия по курсу движения судов, для чего между судами устанавливается выделенная линия связи.

Традиционные системы управления ледовой обстановкой полагаются только на показания ледовых радаров. Комплекс Narwhal способен объединять различные данные, такие как спутниковые снимки, карты ледовых полей и прогнозы, метеорологические условия и состояние моря, сводки воздушных наблюдений и визуальные наблюдения с борта судна. В результате интеграции перечисленных данных капитанам судов предоставляется более полная информация о ледовых условиях, что позволяет принимать более обоснованные решения (рис. 6).

Инструменты визуализации и анализа поддерживаются комплексной многослойной технологией отображения ГИС. Слои данных включают оцифрованные показания радара ледовых опасностей, спутниковые снимки, карты ледовых полей, прогнозы, ледовые препятствия, показания маячков и буйков слежения, а также данные ГИС в стандартных форматах. В дополнение к технологии отображения ГИС, отвечающей за пространственную информацию, в системе используется календарь, который привносит временную составляющую, позволяя анализировать события в динамике. По мере перемещения по календарю система отображает все

сведения, касающиеся анализируемого периода. Комбинирование пространственных и временных характеристик является действенным инструментом для выполнения исторического анализа.

Ледовые препятствия и угрозы выявляются с помощью визуальных наблюдений или графической информации, например, показаний радара и спутниковых снимков. Все опасности и риски классифицируются и загружаются в центральную базу данных и в дальнейшем контролируются. Наблюдаемые риски и опасности используются для построения прогнозных моделей для каждого ледового риска.

Комплекс Narwhal оборудован системой аварийной сигнализации, которая осуществляет непрерывный мониторинг ледовых угроз и включает аварийную сигнализацию в случае, если ледовые образования пересекают границы установленных зон безопасности. При мониторинге зон безопасности принимается во внимание расчетное время до столкновения и время реакции на потенциальную угрозу. Определение ледовых угроз и уровней опасности используется для разработки стратегии снижения рисков при производстве работ и постановки задач для всех ледокольных судов и судов обеспечения.

Все полученные данные получают временную отметку и сохраняются в базе данных. Это обеспечивает полный контроль над данными, подготовку отчетов и проведение контроля качества, что необходимо при производстве работ в современных условиях.

Специализированное оборудование

Учитывая суровые климатические условия и высокую вероятность возникновения ледовых шумов (прохождение судов через льды, многократные волны,

дифрагированные волны и т. д.), которые ухудшают качество сейсмических данных, выбор регистрирующего оборудования требует тщательной проработки. Для успешного производства работ необходимо подобрать оборудование, которое не только рассчитано на работу при низких температурах воздуха и морской воды, но и обладает достаточной прочностью, чтобы выдерживать значительные нагрузки при случайных столкновениях с льдинами. Кроме того, регистрирующее оборудование должно обеспечивать непрерывную запись данных для головного ледокола при преодолении ледовых препятствий или столкновении с льдинами, причем запись будет инициирована за пределами обычного рабочего диапазона записи. Буксируемая коса также должна выдерживать буксировку на больших глубинах и должна сохранять работоспособность всех компонентов в случае аварийного погружения для предотвращения столкновения с ледяными глыбами с большой осадкой или внеплановой остановки судна во время регистрации.

Для подледной регистрации данных требуется погружение всего поверхностного оборудования на определенную глубину во избежание повреждения при столкновении с плавучими льдами. При производстве работ сейсмическая коса и источники буксируются на заданной глубине под ледовым покровом с помощью погружных поплавков, разработанных корпорацией ION. Специализированное оборудование для подледной регистрации сейсмических данных имеет огромные преимущества по сравнению со стандартным оборудованием. Характеристики ледового покрова (мощность, концентрация и давление) в совокупности с геометрией кормы сейсморазведочного судна способствуют либо образованию

свободной ото льда полосы, либо нагромождению плавающих льдин за кормой судна, что может привести к повреждению оборудования, находящегося на поверхности воды (рис. 7).



▲ Рис. 7. Специальные погружные поплавки.

Как правило, координаты буксируемой косы и источников отчасти определяются с помощью показаний приборов GPS, установленных на поплавках и хвостовом бую. Скопления ледяных глыб могут легко повредить поплавки или хвостовой буй. Обычно хвостовой буй демонтируется, а позиционирование кабелей осуществляется с помощью компасов, которыми оборудованы кабели. Тем не менее, в условиях тонкого льда можно предусмотреть подводный хвостовой буй, который по мере возможности будет всплывать на поверхность и определять координаты по GPS. В случае повреждения GPS положение определяется вычислением или инерциальной системой. Корпорация ION разработала прибор для передачи необработанных координат GPS хвостового бую на борт судна через телеметрическую систему усилителя с частотной модуляцией по свободному проводу в кабеле DigiSTREAMER, который специально проектировался для использования в сложных условиях. Показания GPS обрабатываются на борту судна с введением

дифференциальных поправок, в результате чего отпадает необходимость обеспечения радиосвязи с хвостовым буюм, как в большинстве конструкций хвостового бую с dGPS или rGPS.

Если применение хвостового бую невозможно вследствие неблагоприятных ледовых условий, то для позиционирования кабеля используются показания магнитного компаса. Необходимо учитывать, что в арктических широтах магнитное склонение может быстро меняться в пространственном или временном отношении. На сейсмопрофилях, длина которых не превышает нескольких сотен километров, пространственное изменение магнитного склонения может составить 10° , а изолированное временное изменение может также достигать 10° в течение небольшого промежутка времени. Хотя реализованное техническое решение с координатной привязкой позволяет устранять пространственные изменения, для одновременного устранения пространственных и временных отклонений требуется разработка иного технического решения. В корпорации ION разработали такое решение, предусматривающее использование деклинометра, который измеряет магнитное склонение с учетом времени и положения. Деклинометры, которыми сейчас комплектуется все арктическое оборудование корпорации ION, измеряют разницу между истинными координатами (GPS) и показаниями магнитометра. Это нелегкая задача, так как деклинометры калибруются для устранения помех мягкого и твердого железа стального судна, оказывающих негативное воздействие на измерения магнитометра. Деклинометры также обеспечивают ввод поправок за движение прибора в трех измерениях. Необработанные склонения загружаются в систему Orca и

используются при постобработке координат компаса и кабеля.

К оборудованию, которое может быть повреждено вследствие столкновения с льдинами, также относится поплавок воздушной пушки. Предпочтительно использование поплавков, буксируемых на глубине, превышающей максимальную глубину подошвы ледяных глыб. Корпорация ION разработала единую систему активных и пассивных поплавков для источников, которая обеспечивает поддержание заданной глубины буксировки воздушной пушки. В связи с многообразием используемых расстановок ПВ, схем монтажа и весов воздушных пушек, система пассивных поплавков должна регулироваться с учетом конкретных характеристик воздушных пушек. Данная проблема была решена за счет разбивки пассивной системы поплавков на пустые и заполненные секции. Конфигурирование системы выполняется на борту судна и обеспечивает нейтральную плавучесть каждой станции пневматических излучателей. В головной части подгруппы устанавливается регулируемый поплавок, который может всплывать или погружаться вместе с пушкой на заданную глубину и оперативно регулировать плавучесть в процессе наблюдений. Активный поплавок снабжается микропроцессором, который регулирует расход воздуха на входе и выходе из поплавка для поддержания заданной глубины в соответствии с командами бортового программного обеспечения.

К числу сложных технических проблем относится и разработка средств развертывания и буксировки морской косы и источников, обеспечивающих защиту последних от повреждения вследствие столкновения с льдинами. Для решения этой задачи была разработана система «skeg», которая оборудуется защитным

каналом и подводными узлами сцепки для начальной секции морской косы и кабелей источников. Данная система обеспечивает безопасное развертывание и буксировку сейсмического оборудования в проложенной ледоколом полосе, независимо от наличия льдин вокруг судна или под ним. Как и многие другие компоненты системы для подледной регистрации, конструкция системы «skeg» постоянно улучшалась для снижения веса и устранения недостатков, оказывающих неблагоприятное воздействие на маневренность судна и эффективность сейсморазведочных работ (рис. 8).



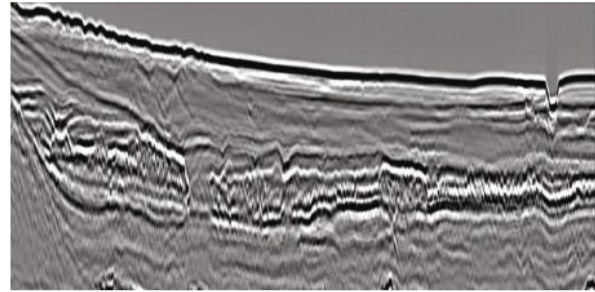
▲ Рис. 8. Система «skeg» для развертывания буксируемой косы подо льдом.

Обработка сейсмических данных, полученных в Арктике

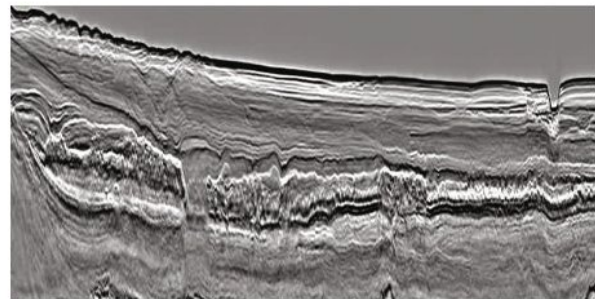
При производстве сейсморазведочных работ в Арктике технические сложности возникают не только на этапе регистрации. При обработке данных и построении изображений специалистам также приходится решать целый ряд специфических задач. Сложные производственные условия часто приводят к образованию нетипичных шумов, которые появляются в регистрируемых данных. Примером таких шумов являются дифрагированные волны, которые возникают вследствие отражения волн от плавающих льдин и айсбергов. При

столкновении льдин с бортами судна также образуются волны-помехи. Как правило, при выявлении таких шумов их подавление не представляет особых затруднений и выполняется с помощью стандартных методов подавления волн-помех.

К основным проблемам верхней части разреза относится сложность построения изображений вследствие неравномерного распределения ММП. Наиболее остро данная проблема стоит при обработке данных наземной сейсморазведки, и применительно к морским данным она менее актуальна. Тем не менее, деятельность полярных ледников и ледяных глыб приводит к образованию многочисленных неровностей на поверхности морского дна. В результате при регистрации данных возникают многократные волны, подавление которых представляется затруднительным, особенно при сейсморазведке 2D и редкой сетке сейсмопрофилей 3D. Применение стандартных методов подавления многократных волн на мелководных площадях, таких как деконволюция τ - ρ или метод SRME (поверхностно-согласованного моделирования), эффективно только в случае наличия плоского морского дна или при достаточно малых ближних удалениях, которые позволяют выделять докритические однократные отражения от морского дна. В последнее время в отрасли появились специальные методики подавления многократных волн для мелководных участков, которые позволяют повысить эффективность стандартных технологий. Корпорация ION разработала свою методику подавления многократных волн со смещением апекса для моделирования многократных волн 2D, которые характеризуются отклонением от плоскости распространения. В большинстве случаев эффектив-



▲ Рис. 9. Изображение PSTM до подавления волн-спутников (данные программы NE GreenlandSPAN). Глубина погружения источника — 18 м от поверхности моря, глубина погружения сейсмической косы — 20 м. Фильтрация с помощью фильтра низких частот на отметке 55 Гц. Вертикальная ось — двойное время пробега в секундах. Горизонтальная ось — расстояние, разделенное на 6,25 м.



▲ Рис. 10. Тот же участок, что и на рис. 9, после подавления волн-спутников с помощью технологии WiBand. Фильтрация с помощью фильтра низких частот на отметке 160 Гц.

ность подавления кратных волн обеспечивается за счет комплексного применения различных методов. Основной задачей комплексных методик является повышение качества отображения разреза при производстве работ в арктических условиях.

Как указывалось ранее, для эффективной регистрации сейсмических данных в ледовых условиях необходимо предусматривать буксирование морской косы и источников на глубинах в диапазоне от 18 до 20 м. При отсутствии эффективного подавления волн-спутников на ПВ и ПП в процессе глубинной буксировки проис-

ходит резкое уменьшение разрешения данных. В последние годы было разработано несколько новых технологий подавления волн-спутников (Posthumus, 1993; Carlson, 2007; Soubaras, 2010). Для повышения эффективности подавления волн-спутников корпорация ION разработала методику обработки (Zhou, 2012), которая позволяет компенсировать затухание амплитуд и искажение фаз в заданных диапазонах частот врез в амплитудно-частотной характеристике. При величине отношения сигнал-помеха, превышающей 6 дБ, качество данных в диапазонах частот врезов имеет большое значение. В результате применения этой технологии появляется возможность извлечения и использования полезных волн над частотами врезов в интервале первых 2 секунд от нижней границы воды. В противном случае эти данные отфильтровываются и не используются для построений. Данная методика подавления волн-спутников также обеспечивает расширение спектра частот нижнего диапазона. Применение новой технологии обеспечивает значительное повышение разрешения сейсмических построений (рис. 9 и 10).

Предварительные результаты

Корпорация ION провела первые полевые испытания новой технологии подледной регистрации сейсмических данных летом 2009 г. на северо-восточном побережье Гренландии. Поставленная задача — отработать около 4 000 км сейсмопрофилей при обеспечении высокой производительности и соблюдении всех требований по охране труда, технике безопасности и защите окружающей среды — была успешно выполнена. В процессе испытаний было отработано более 5 200 км сейсмопрофилей 2D на больших удалениях с получением данных 2D высокого качества и при высоких показателях по технике безопасности. Происшествия и аварий зарегистрировано не было, простои по техническим причинам составили 2%.

Поскольку испытание новой технологии проводилось у берегов Гренландии, корпорация ION дополнительно выполнила ряд подледных наблюдений в акватории моря Бофорта и Чукотского моря, а также в высоких широтах российской Арктики. Используя новые техноло-

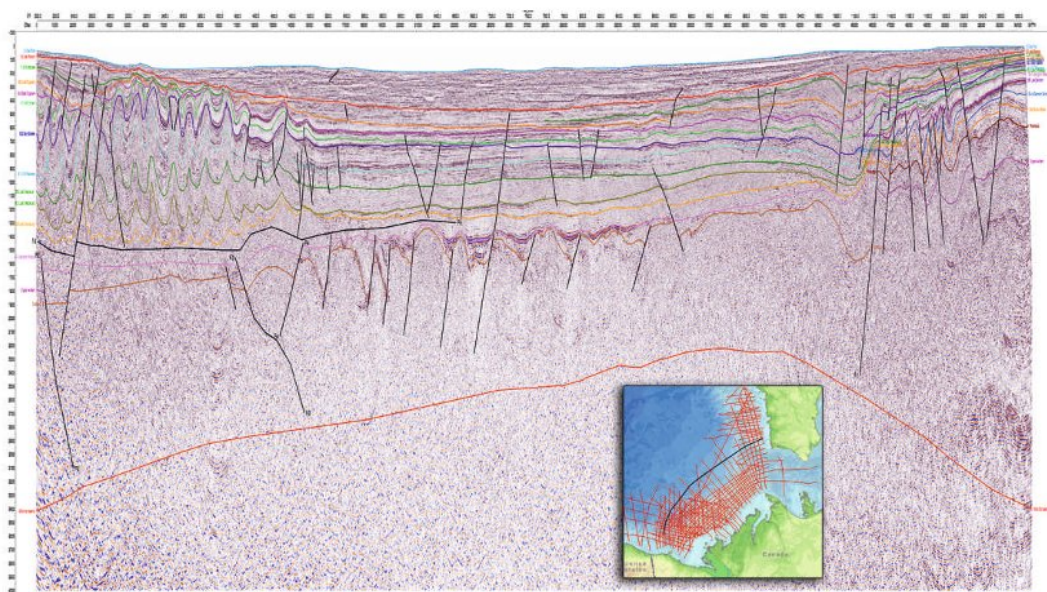


Рис. 11. Разрез в зоне смежных континентальных границ Арктики.

гии и методы, корпорация ION выполнила подледную регистрацию сейсмических данных в объеме более 30 000 км и отработала более 1 млн человеко-часов с коэффициентом регистрируемых происшествий 0,62, что гораздо ниже порога, допустимого в отрасли. Более того, не было зарегистрировано ни одного случая неблагоприятного воздействия на окружающую среду, а это одно из важнейших требований к производству работ в Арктике.

На представленном разрезе показаны результаты интерпретации и корреляция структурных и стратиграфических характеристик в переходной зоне между канадским сектором моря Бофорта и островом Бэнкс. Новые результаты интерпретации позволяют более достоверно охарактеризовать нефтегазоносность бывшей континентальной окраины. Столь детальная характеристика нефтегазового потенциала смежных границ в арктической зоне представляется невозможной без технологии подледной регистрации сейсмических данных (рис. 11).

Заключение

Технологии, рассмотренные в данной работе, являются действенным инструментом для безопасной и высокопроизводительной регистрации сейсмических данных в подледных условиях. Тем не менее, залогом успеха сейсмических наблюдений является эффективная интеграция этих технологий и комплектация проектных групп экспертами различных специальностей. Корпорация ION непрерывно совершенствует сейсмическое оборудование и технологии с целью повышения эффективности регистрации сейсмических данных в арктическом

регионе. В настоящее время проводятся работы по усовершенствованию технологических процессов и модернизации оборудования для регистрации морских сейсмических данных 3D на неосвоенных площадях Арктики.

Примечания редактора: Orca и Narwhal — зарегистрированные торговые знаки корпорации ION Geophysical.

Литература

Bird, K. J., R. R. Charpentier, D. L. Gautier, D.W. Houseknecht, T. R. Klett, J. K. Pitman, T. E. Moore, C. J. Schenk, M. E. Tennyson, and C. J. Wandrey, 2008, Circum-Arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-2008-3049, <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/>.

Carlson, D., W. Söllner, H. Tabli, E. Brox, and M. Widmaler, 2007, Increased resolution of seismic data from a dual sensor streamer cable: 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 994–998, <http://www.doi.org/10.1190/1.2792572>.

Posthumus, B. J., 1993, Deghosting using a twin streamer configuration: Geophysical Prospecting, 41, 267–286.

Soubaras, R., 2010, Deghosting by joint deconvolution of a migration and a mirror migration: 80th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3406–3410, <http://www.doi.org/10.1190/1.3513556>.

Zhou, Z., M. Cvetkovic, B. Xu, and P. Fontana, 2012, Analysis of a broadband processing technology applicable to conventional streamer data: First Break, 30, no. 10, 77–82.

Для связи с авторами:

Christine.Feimer@iongeo.com

Материал размещен с разрешения журнала «The Leading Edge»