

Сейсморазведочные работы 2D-4С в среднем течении реки Лена с использованием автономных донных станций «Краб»

■ Казанин А.Г., Базилевич С.О., Зимовский А.В., Щедров В.А., Куома Д.Г., Прилипко С.А.,
 ■ Литвачук А.В., Казанин Г.А., АО «МАГЭ», г. Москва.

Аннотация. Наиболее обеспеченной ресурсами углеводородного сырья на юге Восточно-Сибирской платформы является Непско-Ботуобинская антиклинальная зона, где за период с 2008 по 2017 г. было поставлено на баланс 13 крупных и средних нефтяных месторождений. Тем не менее юго-восточная часть платформы в составе Предпатомского регионального прогиба, Березовской впадины и Алданской антеклизы на востоке района пока что слабо изучена сейсморазведкой. Для создания единой геологической модели восточной части сочленения Хатангско-Вилуйской и Лено-Тунгусской нефтегазовых провинций летом 2021 г. компания АО «МАГЭ» выполнила сейсморазведочные работы 2D МОВ-ОГТ на трансрегиональном профиле вдоль среднего течения р. Лена от устья р. Чуя до устья р. Алдан, имеющем общую протяженность 1462 км. Работы были выполнены с применением в качестве регистрирующей аппаратуры многокомпонентных автономных донных станций системы «Краб» российского производства [1]. Этот опыт производства сейсморазведки на быстрой реке с 4-х компонентными донными станциями оказался весьма успешным, несмотря на все методические и технические сложности в организации сейсмической съемки на реках.

Введение

В период с июня по октябрь 2021 г. Морская арктическая геологоразведочная экспедиция (АО «МАГЭ») выполнила сейсморазведочные работы в рамках государственного контракта ФГБУ «ВНИГНИ» по объекту «Проведение комплексных региональных полевых геофизических работ в акватории среднего течения реки Лена с целью изучения геологического строения и перспектив нефтегазоносности Алданской антеклизы и Предпатомского перикратонного прогиба».

Сейсмические исследования выполнялись методом 2D МОВ-ОГТ на участке от устья реки Чуя до устья реки Алдан. Объем работ составил 1462 погонных км (по полной кратности).

Работы проводились с использованием в качестве регистрирующего оборудования отечественной системы автономных донных станций «Краб», разработанной в 2016-2018 гг. совместно АО «МАГЭ»,

ООО «МТЦ», при участии АО «АКИН», ООО «МГК» и ООО «Р-сенсорс»¹⁾.

Обзор выполненных ранее сейсморазведочных работ

Специфика сейсморазведочных работ на реках по природным условиям, методике работ и применяемой аппаратуре сходна с работой в транзитных зонах – на стыке суши и моря. Используется как сухопутная приемная аппаратура (геофоны), так и морская (гидрофоны). Сейсмический сигнал возбуждается в большинстве случаев на воде морскими пневмоисточниками, гораздо реже возбуждение сигнала производится на суше взрывными или вибрационными источниками.

Работы МОВ-ОГТ в производственных масштабах в России начали выполняться в транзитных зонах, включая реки и водохранилища, еще в 90-е годы. Исследования проводились как в региональных 2D, так и в поисковых детальных

модификациях 2D, 3D(2C) преимущественно с использованием радиотелеметрических модулей (BOX Fairfield ind., ARAM-Aries X-Geo) и коротких мелководных кос (Sercel, TZ).

Например, в 2008 г. ООО «Донгеофизика» выполнило экспериментальные работы 3D на реке Вятка. Использованием раскладки косы «змейкой» авторы получили куб 3D сейсмических данных по руслу реки. [4]. При этом в качестве регистрирующего комплекса использовались кабели для транзитной зоны X-Zone Marsh line компании «СИ Технологии», а отстрел производился по реке с многократным вертикальным накоплением.

За период с 1998 г. по 2012 г. было выполнено более 10 тыс. км 2D и 3.5 тыс. кв.км 3D исследований на реках и водохранилищах средней полосы России и юга (Волга, Каспийская транзитная зона), а также в Южно-Карской транзитной зоне [2]. Использование автономных донных станций на реках в то время не практиковалось. Авторам известен один такой эпизод - в 2015 г. ОАО «Севморгео» проводило «Региональные геолого-геофизические работы на Усть-Обской площади» с применением станций Z700 производства компании «Fairfield Nodal» (США).

Сейсморазведка в модификации МОВ-ОГТ на реках Восточной Сибири стала производиться в небольших объемах с середины нулевых годов на реках Лена, Витим, Енисей, Нижняя Тунгуска, Вах. Работы выполнялись на отдельных судоходных участках рек свободных от перекатов, болотистых берегов и кряжей с использованием сухопутных системы регистрации (например, «Байкал 5 -7», разработки ФИЦ ЕГС РАН) и возбуждения сейсмического сигнала с применением мелководного источника «Малыш» [4].

Расстановка приемников на берегу позволяла избегать снижения соотношения сигнал/помеха на участках с сильным течением.

Что касается непосредственно прилегающих к заданному району исследований территорий, то в 2019 г. ОАО «Луч», подрядной организацией АО «Росгеология» был получен информативный сейсмический разрез по речному профилю по реке Витим от пос. Мама до пос. Пеледуй на реке Лена. Также в 2018 г. от устья реки Алдан до поселка Чекуровка в нижней части реки Лена были выполнены работы по региональному сейсмическому речному профилю. К сожалению, полученный сейсмический материал оказался достаточно низкого качества.

Таким образом, полевой партии АО «МАГЭ» предстояло впервые выполнить сейсморазведочные работы с применением автономных донных станций на реке в условиях быстрого течения и связанных с этим шумов.

Методические особенности выполненных работ

Главным негативным фактором при выполнении сейсмических работ на реках является течение. При постановке регистраторов на дно, как для геофонов, так и для гидрофонов, течение создает избыточный шум среды, зачастую превышающий полезный сигнал. Установка автономных регистраторов на берегу позволяет значительно снизить уровень шума для компоненты геофона (Z), но по очевидным причинам неприемлема для компоненты гидрофона. Использование гидрофонов в качестве датчиков регистрации сигнала крайне желательно, так как позволяет регистрировать низкочастотную часть спектра (ниже 10Гц), чего сложно добиться для записи геофонов. Река Лена в верхнем своем течении

изобилует перекатами, на которых скорость течения может достигать до 4 узлов. Учитывая, что объем пневмоисточников ограничен, заранее нельзя было сказать, удастся ли получить приемлемое соотношение сигнал/помеха при постановке датчиков на дно. Потребовались обширные опытно-методические работы для выбора оптимальной методики наблюдений и оптимальной конфигурации источника сигнала.

Вторым по значимости негативным фактором является недостаток глубины воды для работы судов, как источника, так и расстановщиков. В районе работ на участке Ленск-Чуя глубина реки на перекатах осенью становится менее 1.5 м, что недостаточно для работы судов экспедиции. В связи с этим сезон был спланирован так, чтобы начать работу в верхнем течении реки и в июне-июле по высокой воде отработать все мелководные участки. На реке все рабочие операции с донными станциями и пневмоисточниками выполняются при движении судов против течения, иначе невозможно выдержать необходимую скорость движения судна, поэтому продвижение полевой партии вниз по течению требовало больших затрат ресурсов и времени.

С другой стороны, в нижнем по течению, северном конце проектного профиля ледостав начинается примерно на месяц раньше, чем в южной части района работ. Чтобы избежать риска не успеть закончить работы до ледостава, пришлось в середине сезона прервать профиль, перейти на устье реки Алдан и возобновить работу в противоположном направлении, с севера на юг.

Немалые трудности для выполнения работ создает судоходство на реке. Помимо дополнительного шума от проходящих судов существует значительный риск повреждения и потери донного

оборудования вследствие наматывания на винты или зацепления якорем троса, к которому крепятся донные станции при постановке на дно. Размещение линии сейсмоприемников исключительно за пределами судового хода позволило снизить риски, тем не менее имел место инцидент, когда посторонний танкер, ставший на якорь у берега, зацепил линию, оторвал 7 донных станций и снес на несколько километров. Станции удалось найти благодаря установленным на них датчикам гидроакустической навигационной системы и, несмотря на механические повреждения (Рис. 1), успешно считать сейсмические данные.

Проектом предусматривалась центрально-симметричная система наблюдений 2D МОВ-ОГТ с максимальным офсетом (расстоянием источник-приемник) 8 км. Оптимальная схема работы предполагает, что выставляется линия приемников из максимального количества донных станций, источник производит отстрел до тех пор, пока не приблизится к концу линии приемников на 8 км, после чего приемники, находящиеся позади источника более чем на 8 км, снимаются и переставляются вперед. Полная кратность наблюдений при этом составит 320. По такой схеме «перекрытия по приему», когда в воде находится 32 км линии приема, источник отстреливает 16 км и 16 км отстрелянной линии приема снимаются и переставляются вперед, была отработана большая часть объекта - от устья р. Чуи до поселка Мохсоголох в 100 км выше Якутска. Далее возникли трудности, потребовавшие изменения схемы перекрытия. Характер дна реки по мере продвижения вниз по течению сменился с гальки на мелкий песок. На участках с сильным течением донные станции стало «замывать» в песок до такой степени, что при

попытке их поднять происходил обрыв троса. Во избежание массовой потери оборудования был осуществлен переход на схему работы с перекрытием по отстрелу, когда расставляется линия приема 16 км, источник начинает отстрел за 8 км до первого приемника и заканчивает через 8 км после последнего приемника, после чего линия приема переставляется целиком. При таком перекрытии также достигается полная кратность 320, но удваивается количество возбуждений. Выигрыш заключается в том, что приемники находятся на дне минимальное время и не успевают полностью «замыться» песком.

Используемая аппаратура

Автономные донные станции

Регистрирующий комплекс «Краб» состоит из набора автономных донных станций и контейнеров-лабораторий для их обслуживания.

Станции комплекса предназначены для регистрации сейсмических данных при проведении сейсморазведочных работ. Станции обладают отрицательной плавучестью, при производстве работ крепятся к тросу и опускаются на дно

исследуемой акватории с борта судна-расстановщика, производящего раскладку станций с шагом, заданным геометрией системы наблюдений (Рис. 1).

Конструктивно каждая донная станция представляет собой прочную герметичную капсулу, в которую установлены элементы системы электропитания, блок сенсоров и регистрирующая электронная аппаратура.

Станция оснащена четырьмя сейсмическими датчиками – ортогональной тройкой геофонов (могут использоваться сенсоры разной конструкции и модели), а также гидрофоном. На описываемом проекте использовались отечественные геофоны ВН20-МТ чувствительностью 15 В/м/с и отечественные же гидрофоны МПФМТЦ19 чувствительностью 10 В/бар.

Для определения ориентации станции в пространстве имеется цифровой компас-инклинометр, способный фиксировать азимут с точностью $\pm 5^\circ$ и углы наклона вертикальной оси станции (pitch, roll) с точностью $\pm 2^\circ$.

Привязка зарегистрированных данных к абсолютному значению времени обеспечивается высокоточным термостатированным генератором, который до

▼ Рис. 1. Донная станция «Краб» перед спуском в воду (слева) и поднятая из воды после волочения несколько километров по дну (справа).



Параметр	Значение
Число сейсмических каналов записи	3 ортогонально ориентированных геофона и 1 гидрофон
Разрядность АЦП	24 бита
Чувствительность гидрофона МПФМТЦ19	10+/-2 В/Бар
Чувствительность геофонов ВН20 -МТ	15 В/м/с
Полный динамический диапазон, не менее	120 дБ
Диапазон уровня собственных шумов	от 0,08 до 3 мкВ
Время автономной работы, не менее	45 суток
Глубина погружения, не более	500 м
Масса на воздухе	12.3 кг
Габаритные размеры	273x245x132 мм

▲ Табл. 1. Характеристики автономной донной сейсмической станции «Краб».

начала и после окончания регистрации сейсмосигнала проходит сверку с точным временем, получаемым от спутниковой навигационной системы GPS. Стабильность частоты генератора составляет 10^{-9} , что дает уход времени генератора за сутки автономной работы не более 0.1 мс.

Питание станции осуществляется от литиевых аккумуляторов, подзарядка которых производится на борту судна одновременно со считыванием данных. Емкость аккумуляторов рассчитана так, чтобы обеспечивалось время непрерывной работы 45 суток. Для описываемых 2D работ такая автономность более чем избыточна, время между подзарядками составляло от 1 до 3 суток.

Основные технические характеристики автономной донной сейсмической станции «Краб» представлены в Табл. 1.

Синхронизация времени, тестирова-

ние, считывание полученных данных, подзарядка аккумуляторов выполняются в контейнерах-лабораториях, изготовленных на базе стандартных 20-ти футовых морских контейнеров. В каждом контейнере может храниться, транспортироваться и обслуживаться 380 донных станций. Большим преимуществом комплекса «Краб» является гибкая модульная архитектура, когда контейнеры-лаборатории независимы друг от друга и могут размещаться на различных судах в произвольном количестве.

Всего на объекте использовалось 1200 станций и 4 контейнера-лаборатории.

Гидроакустическая система

При работах в море на глубокой воде для определения местоположения станций на дне используется система гидроакустического позиционирования, состоящая из устанавливаемой на судне



▲ Рис. 2. Система гидроакустического позиционирования «Пикет». Антенна (слева) и набор маяков-ответчиков (справа).

гидроакустической антенны и прикрепляемых к станциям маяков-ответчиков. Совместно с комплексом «Краб» АО «МАГЭ» использует систему позиционирования отечественного производства «Пикет» (Рис. 2). В нашем случае, на реке, определение позиции невозможно в силу малой глубины и сложного рельефа дна, тем не менее использование маяков оказывается полезным при поиске донных станций, по каким-то причинам сместившихся со своих мест, например, зацепленных, оторванных и утащенных проходящим судном.

Источник сейсмического сигнала

В качестве источника сейсмического сигнала при проведении работ использовался массив пневмопушек «Sleeve Gun

II». Групповой пневмоисточник состоял из двух линий по 6 пушек объемами от 70 до 150 куб. дюймов. Для возможности работ на разных глубинах было сделано два идентичных источника: «мелководный» для глубин менее 2-х метров и «стандартный» для глубин 2 м и более.

Мелководный источник был собран на двух плотках (Рис. 3), буксировка которых осуществлялась паромом СПЖ-77 с малой осадкой с установленным на нем компрессором высокого давления.

Стандартный источник представлял из себя речной плотовод проекта Р-33Л (Рис. 4), на котором были смонтированы две линии пушек, спускаемых с кормы и буксируемых на поплавках. Для питания источников сжатым воздухом на палубу были установлены два компрессора «SB-7».

▼ Рис. 3. Мелководный источник с буксируемыми плотками.





▲ Рис. 4. Судно-источник на базе речного плотовода.

Суда для производства работ

Всего в проведении работ на объекте было задействовано 9 судов.

Кроме упомянутых двух источников использовались судно-база с буксиром, два судна-расстановщика, судно снабжения, промерный катер и танкер (Рис. 5-7).

Большой объем оборудования комплекса донных станций требует судна-базы с большой грузоподъемностью и пассажировместимостью для размеще-

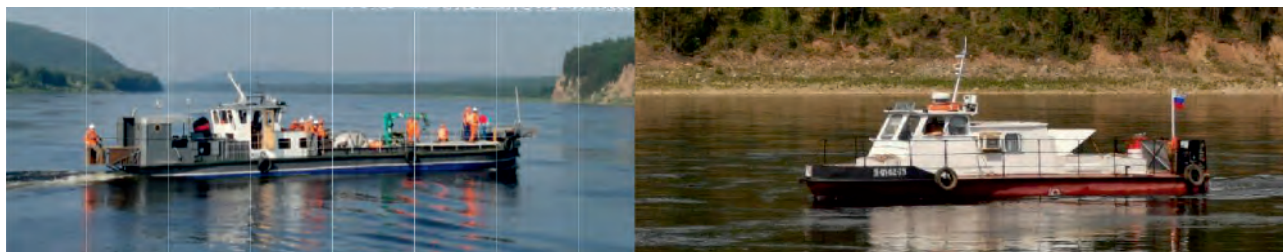
ния личного состава полевой партии. На реке найти такое судно практически невозможно, поэтому база была оборудована на барже грузоподъемностью 1000 т. В соответствии с нормами речного регистра был создан и реализован проект установки на палубу контейнеров-лабораторий комплекса «Краб» жилых, санитарных и хозяйственных модулей, электрогенераторов, систем пожаротушения, связи и пр. (Рис. 5)

▼ Рис. 5. Судно-база на базе баржи МП-1331.



▼ Рис. 6. Суда-расстановщики донных станций РТ-474 и РП-490.





▲ Рис. 7. Судно снабжения «Квант» и промерный катер «Беркут».

Опытно-методические работы

В ходе опытно-методических работ выполнялся стандартный набор проверок и тестов, на основе которых подтверждается рабочее состояние оборудования, и формируется Задание на регистрацию:

- тест на идентичность каналов;
- выбор коэффициентов (КУ) усиления каналов;
- выбор рабочего объема пневмоисточника;
- выбор заглубления пневмоисточника;

Помимо выбора вышеперечисленных параметров, основной задачей опытно-методических работ следует считать подтверждение состоятельности предложенной методики выполнения работ – регистрации с использованием донной регистрирующей системы. Как было сказано ранее, к моменту проведения описываемых работ в исследуемом регионе уже был накоплен некоторый опыт речной сейсморазведки. Однако все предыдущие работы проводились в варианте возбуждения сейсмического сигнала на реке и регистрации на суше. Перенос регистрирующей системы (в варианте 4-х компонент регистрации) на речное дно, очевидно, увеличивает шум среды, но и обладает некоторыми преимуществами:

- приближение геометрии съемки к двумерному варианту (за счет минимизации перпендикулярного выноса линии пунктов возбуждения относительно

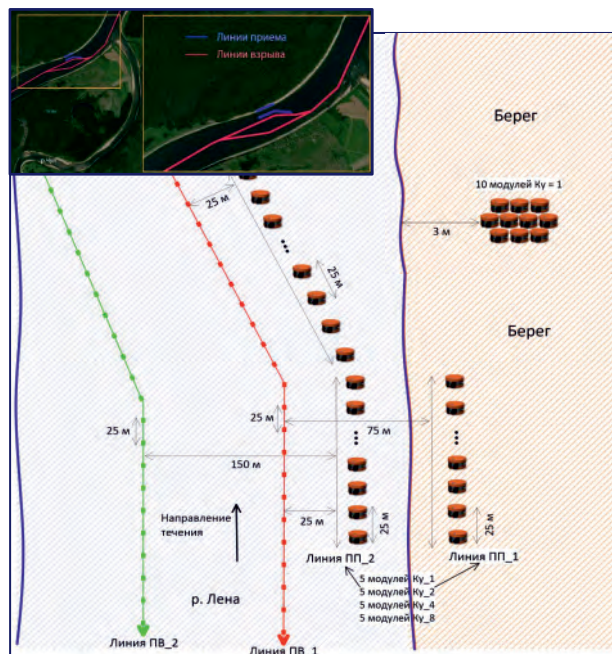
пунктов приема);

- регистрация Н-компоненты (гидрофон), АЧХ которой по сравнению с геофоном расширена в область низких частот и не зависит от сцепления с грунтом;
- регистрация поля обменных волн (PS), что может стать ценнейшим источником дополнительной геологической информации, особенно в условиях высокоскоростного разреза Восточной Сибири;

Если вопрос преимущества совмещения ЛПВ и ЛПП в рамках 2D работ принципиально понятен и не требует дополнительного обоснования, а регистрация обменного поля не являлась предметом данных работ, то вопрос выбора «рабочей» компоненты для дальнейшей обработки требовал тщательного изучения.

Опытно-методические работы были выполнены в несколько этапов. Первый этап проводился вблизи устья р. Чуя. Была разложена линия приема длиной 1000 м в воде, линия приема длиной 500 м на берегу, еще 10 донных станций были расположены компактной группой на берегу для теста на идентичность (Рис. 8). Возбуждение сигнала проводилось по линии длиной 16 км объемами 570 и 1440 куб. дюймов на заглублениях источника на 1 и 2 м.

Результатом первого этапа опытных работ стало подтверждение идентичности каналов, выбор коэффициентов усиления и, ожидаемо, подтверждение неэффективности использования источника



▲ Рис. 8. Схема организации первого этапа ОМР.

половинного объема (570 куб. дюймов) и возбуждения с заглублением 1 м.

Также был получен прогнозируемый результат зависимости амплитуды внешнего шума среды на приемниках в воде от глубины установки донного модуля. С увеличением глубины (соответственно и скорости течения) шум возрастал до неприемлемого для производства работ уровня (Рис. 9).

Второй этап опытных работ решено было провести в иных сейсмогеологических условиях - в среднем течении р. Лена, 40 км выше города Ленск. На данном этапе приемники были расставлены

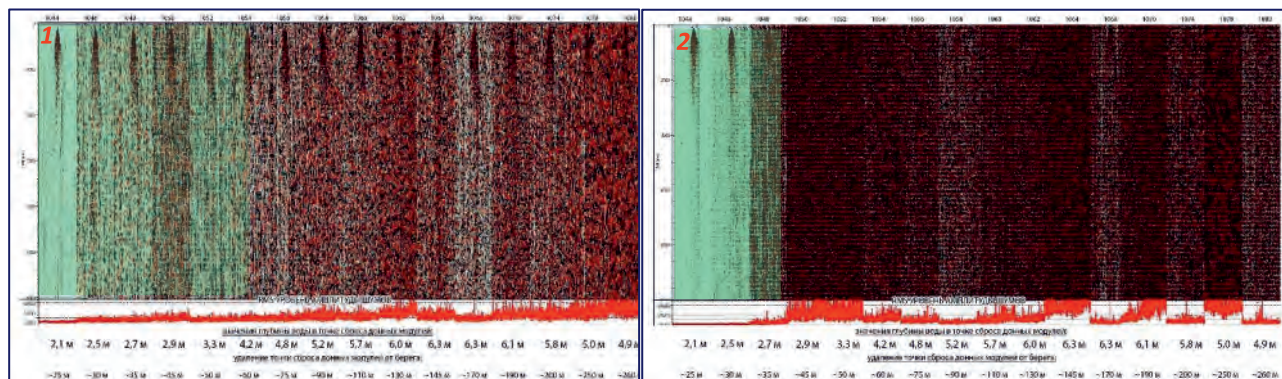
двумя параллельными линиями длиной 500 м на суше и в воде, отстрел проводился по линии длиной 16 км двумя конфигурациями источника (1440 и 1280 куб. дюймов) на двух заглублениях (2 и 3 м).

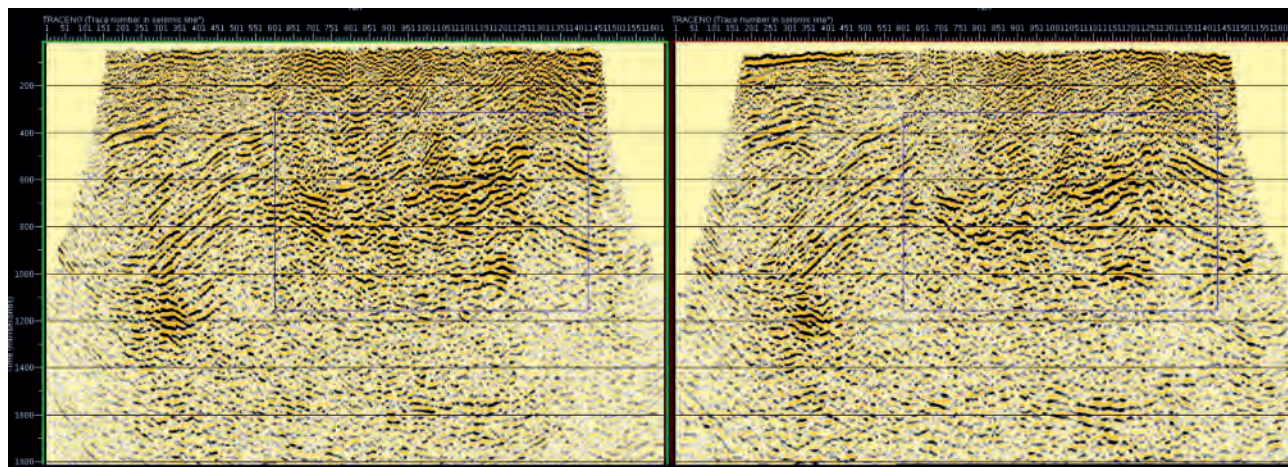
В результате было установлено следующее:

- предпочтительной конфигурацией источника является объем 1280 куб. дюймов и буксировка на заглублении 3 м;
- при расположении приемников в воде сигнал гидрофона значительно информативнее геофона;
- отношение сигнал/шум для геофонов на берегу значительно выше (до 10 раз), чем для геофонов в воде;
- не смотря на то, что согласно стандартному атрибутному анализу качество первичных данных на суше значительно выше, на первичных сейсмограммах отсутствуют коррелируемые отражения как для данных полученных на акватории, так и для данных на берегу, что обусловлено сложнейшими сейсмогеологическими условиями участка, выбранного для производства опытных работ.

Для окончательного решения вопроса, что предпочтительнее с точки зрения качества регистрируемого сигнала - гидрофон в воде или геофон на берегу, был проведен третий этап ОМР. Тестовый профиль в воде представлял собой

▼ Рис. 9. Зависимость уровня шума от глубины установки регистратора. Зеленым подсвечены участки оптимальной глубины установки донной станции.





▲ Рис. 10. Сравнение временного разреза по N-компоненте в реке (слева) с временным разрезом по Z-компоненте геофона на берегу (справа).

линию приема из 640 станций с шагом 25 м (длина 16 км) и полностью дублировался аналогичной береговой расстановкой. Так как задачей опыта являлось определение влияния характера регистрации на итоговый геолого-геофизический результат, анализировать полученный материал предполагалось на уровне сейсмического разреза. Одновременно решено было проанализировать влияние дальнейшего увеличения объема пневмоисточников на качество данных, для чего увеличили количество пушек в массиве до 16.

Для соблюдения требований на максимальный офсет отстрел провели по линии длиной 32 км. Для возбуждения сейсмического сигнала использовали объемы 1140, 1620 и 1880 куб. дюймов. Для последующего анализа была выполнена полевая экспресс-обработка данных, полученных в варианте «река» и «берег». В варианте «река» обработка велась как для компоненты вертикального геофона (Z), так и гидрофона (Н). Обработка всех наборов данных выполнена в едином графе и в рамках единой кинематической модели. (Рис. 10).

На максимальном объеме пневмоисточника 1880 куб. дюймов отмечено снижение энергии сейсмосигнала как на гидрофоне, так и на вертикальном геофо-

не. Увеличение объема с 1140 до 1620 куб. дюймов привело к повышению значения сигнал/шум и улучшению прослеживаемости горизонтов, однако значимого прироста сейсмогеологической информации при этом не наблюдалось. В рамках камеральной обработки предполагается получение сопоставимых результатов при любом из этих объемов источника.

Анализ полученных разрезов позволил сделать вывод, что прослеживаемость полезного сигнала на «берегу» и в «реке», в целом, сопоставима. Если сравнивать результаты по Z-компоненте геофона, наблюдается некоторое преимущество при регистрации на берегу, что вызвано, в первую очередь, низким значением внешнего шума. При этом динамика сейсмических событий на разрезе компоненты гидрофона в «реке» несколько выше (за счет регистрации энергии в области низких частот). Учитывая сказанное, а так же независимость регистрации Н-компоненты от ориентации модуля и его сцепления с грунтом, было принято решение использовать компоненту гидрофона как основную для дальнейшей обработки. При этом качество итогового геологического результата, следует ожидать, будет выше предыдущих аналогичных работ в данном регионе.

Геологические результаты работ

В результате описанных работ впервые в отечественной практике успешно выполнены речные сейсморазведочные наблюдения в варианте четырехкомпонентной регистрации. По итогам обработки данных была получена новая геолого-геофизическая информация, позволяющая уточнить геологическое строение осадочного чехла и фундамента Северо-Алданской и Предпатомской НГО, обновить глубинно-скоростные модели осадочного чехла, уточнить зоны нефтегазоаккумуляции ниже-среднекембрийских доманикоидных отложений среднего течения р. Лена, построить схемы нефтегазогеологического районирования Северо-Алданской и Предпатомской НГО.

На итоговых временных разрезах прослеживаются основные отражающие горизонты, представленные преимущественно структурными комплексами среднего палеозоя и верхнего кембрия, а также нижнего палеозоя и протерозоя, а именно отложения вендского и рифейского возраста.

Заключение

АО «МАГЭ» успешно выполнило региональные сейсморазведочные работы в среднем течении р. Лена.

Анализ результатов показал высокий потенциал подобных исследований, в первую очередь, для изучения труднодоступных регионов, из которых одним из наиболее перспективных является Восточно-Сибирский. Методика проведения сейсморазведочных работ на акватории без необходимости выхода на береговую часть несет в себе значительный экономический потенциал за счет упрощения логистики, при этом получаемый сейсмический материал не только не уступает данным, полученным при береговой регистрации, но и по ряду важных параметров его превосходит.

Помимо решения задач данного проекта, при соответствующей обработке 4х-компонентная регистрация в случае речных наблюдений позволит:

- расширить спектр регистрируемого сигнала в область низких частот за счет использования Н-компоненты (гидрофон);
- выполнить совместную обработку Н-Z компонент как для классического подавления волн-спутников путем суммирования полей, так и для подавления поля кратных волн при выполнении up/down – down/down деконволюции;
- выполнить обработку поля обменных волн (PS).

Литература:

1. Казанин А.Г., Базилевич С.О., Куома Д.Г., Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Кошелев Е.А., Ерофеев Ю.Г., Агафонов В.М., Гладилин А.В., Петров Б.Е. Инновационный цифровой сейсмический комплекс морской сейсморазведки "Краб". Разработка, внедрение и перспективы развития отечественных донных станций // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 12(253). – С. 28-35.
2. Казанин Г.С., Нечхаев С.А., Щедров В.А., Зимовский А.В. Многокомпонентные морские сейсмические исследования на Арктическом шельфе на базе технологии Geospace //Разведка и охрана недр - 2014. - №4., С. 40-44
3. Жгенти С.А. Исследование и развитие технико-методических приемов сейсморазведки на предельном мелководье акваторий //Краснодар, 2009.- 148 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/1897
4. Гуленко В.И., Шумский Б.В. Особенности возбуждения упругих волн в условиях мелководья и переходной зоны суша-море Н Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов 7-х геофизических чтений им. В.В. Федынского — М.: Научный мир, 2006. С.355— 365.
5. Верба М.Л., Герман Е.В., Григоренко Ю.Н. и др. Транзитные зоны акваторий России. СПб Недр 2005г. 140с

¹⁾ Разработчики системы автономных донных станций «Краб» удостоены премии Правительства Российской Федерации 2022 года в области науки и техники.