

Оценка точности измерений инклинометра донного модуля «Краб» на основе сейсмического волнового поля

- Казанин А.Г., Базилевич С.О., Демонов А.П., Литвачук А.В., Казанин Г.А., Луковников Г.Г., Шепелев А.А., АО «МАГЭ», г. Москва
- Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

Аннотация. Для достижения технологического суверенитета в области геологоразведочных работ на протяжении последних лет в нашей стране разрабатывается и планомерно внедряется в производство ряд образцов автономных донных модулей (ДМ), предназначенных для выполнения многокомпонентных сейсмических исследований на шельфе. При этом, как непосредственные эксплуатанты оборудования, так и Заказчики работ заинтересованы во всесторонней верификации всей получаемой информации, что в итоге гарантирует высокий уровень получаемой итоговой геологической информации. В рамках данной статьи выполнена независимая оценка точности измерений инклинометра ДМ «Краб» на основе сейсмической информации, показано как соответствие исследуемого прибора заявленным производителем характеристикам, так и общемировым отраслевым стандартам.

Ключевые слова: геофизическое оборудование для геологоразведочных работ на шельфе, сейсморазведка 3D (4C), инновационные донные сейсмические регистраторы «Краб», инклинометр.

Введение

Нодальная сейсморазведка с каждым годом завоевывает все большую популярность в мире в первую очередь за счет того, что позволяет регистрировать полное волновое поле — продольные и обменные поперечные волны. Помимо этого, использование донных систем дает возможность реализовать ранее малодоступные на акваториях широкоазимутальные наблюдения. Заглубление регистрирующей системы на уровень морского дна способствует расширению погодного окна для производства работ [1]. При этом скорость производства работ на современном этапе развития технологий может не уступать классической сейсморазведке с буксируемыми косами. Отдельно стоит отметить, что прибрежные шельфовые части, характеризующиеся минимальными глубинами, в обычном случае недоступны для проведения 3D съемок с буксируемыми косами, нодальные же системы подобных

ограничений не имеют, что позволяет реализовывать в рамках одной съемки работы на глубоководье, транзитной зоне, и, при необходимости, обеспечить выход на сухопутную часть без замены регистрирующей системы, что значительно упрощает дальнейшую увязку данных в рамках единого массива геофизической информации [2, 3].

Отечественный рынок геофизических услуг следует за общемировыми тенденциями и в последние годы в России был реализован ряд промышленных съемок ОВН как с привлечением иностранного оборудования, так и на основе собственных разработок [4, 5]. На данный момент парк российского оборудования представлен, в первую очередь, донными модулями «КРАБ» (ООО «Морской Технический Центр», г. Санкт-Петербург), основным эксплуатантом которого является АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция».

Характеристики инклинометра автономного донного модуля «КРАБ»

При проведении сейсморазведочных работ ЗС на суше по понятным причинам удается соблюсти требования по вертикальной установке Z - компоненты (обычно, с допуском в $\pm 5^\circ$) и строгой ориентации горизонтальных (X, Y) компонент – обычно вдоль линий ПП и ПВ. При этом отдельные огрехи установки сейсмоприёмников определяются на этапе наладки активной расстановки путем tilt – теста геофонов.

В практике морских сейсморазведочных работ с автономными донными модулями (ДМ) конечное положение прибора на дне неизвестно, что требует либо установки группы геофонов в карданный самовыравнивающийся привод, либо комплектации регистратора дополнительным измерительным устройством – компас-инклинометром, позволяющим определить набор углов, характеризующим наклон корпуса донного модуля – дифферент (pitch), крен (roll), а также азимут (yaw) – угол, характеризующий ориентацию горизонтальных компонент регистрации.

Донный модуль «КРАБ» оснащен трехосевым МЕМС-инклинометром (СМР-53-2) [1], ось которого ориентирована параллельно оси компоненты X и соответствующие углы определены следующим образом:

- ось X наклоняется вниз – минус дифферент (pitch);
- ось X наклоняется вверх – плюс дифферент (pitch);
- наклон на левый борт относительно X – плюс крен (roll);
- наклон на правый борт относительно X – минус крен (roll);

Согласно паспортным характеристикам, инклинометр ДМ «КРАБ» определяет углы крена и тангажа с погрешностью

$\pm 1^\circ$, азимута $\pm 5^\circ$ (в широтах до 50°). Диапазон измерения крена $\pm 90^\circ$, дифферента $\pm 180^\circ$, азимута $0-360^\circ$. Период опроса инклинометра задается пользователем при подготовке модуля к работе, но не может быть менее 10 секунд. Память обеспечивает хранение не менее 8000 измерений. [6]

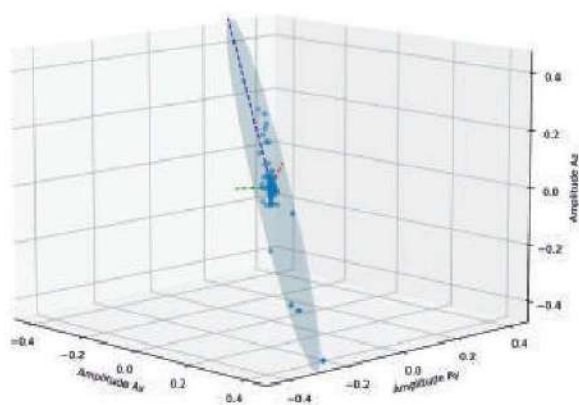
Заявленная производителем точность определения углов аналогична наиболее популярным образцам соответствующего оборудования. Так, например, для донных модулей z700 (Magseis-Fairfield, Норвегия) для углов крена и тангажа заявляется погрешность $\pm 1.5^\circ$, азимута $\pm 5^\circ$.

Отсутствие корректной информации об ориентации компонент существенно усложняет процесс обработки сейсмических данных, а в некоторых случаях и вовсе делает ее невозможной. Однако в ряде случаев есть способы получения оценки углов непосредственно из волнового поля. Строго говоря, определение ориентации донного модуля по волновому полю является стандартной процедурой в практике контроля качества и обработки данных OBN. Однако, когда речь заходит о вводе в эксплуатацию новых образцов оборудования, требуется верификация всех систем регистратора, в том числе таких важных, как инклинометр.

Определение ориентации донного модуля на основе волнового поля

В рамках данной работы авторами ставилась задача получения независимых оценок углов для донных модулей «КРАБ» на основе волнового поля и сравнение их с реальными наблюдаемыми значениями, полученными с помощью инклинометра.

Работа выполнена на промышленных сейсмических данных, полученных в акватории Охотского моря.



▲ Рис. 1. Синий вектор – главная ось эллипсоида, зеленый – вектор с наименьшим собственным значением (увеличен в 5 раз для удобства визуализации).

В отличие от гидрофона, геофон имеет характеристику направленности, что позволяет путем анализа амплитуд первых вступлений, соответствующих прямой волне, произвести необходимые расчеты для определения поляризации смещения частиц.

Когда прямая волна от источника достигает морского дна в месте нахождения донного модуля, геофоны регистрируют результирующее относительное смещение частиц (скорость смещения) в виде трех временных последовательностей по трем направлениям X, Y и Z. Исходя из этого, возможно сформировать поле значений, состоящее из значений ампли-

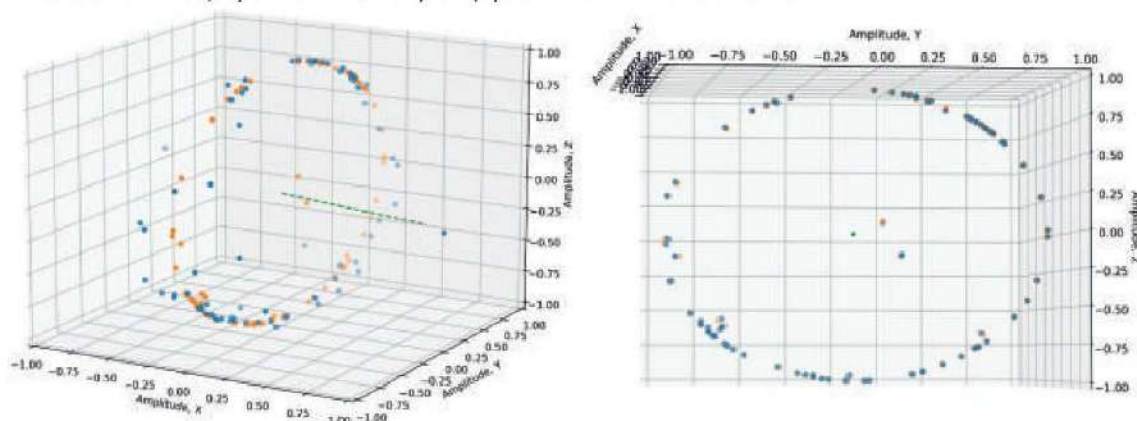
туд компонент X-Y-Z для каждого отсчета сейсмических трасс в области прямой волны.

Данное поле значений амплитуд (рис. 1) в общем случае является квазиэллипсоидальным и, соответственно, можно с помощью метода главных компонент (РСА) рассчитать оси эллипсоида, которые, в свою очередь, связаны с собственными значениями и собственными векторами ковариационной матрицы. Главная ось эллипсоида определяет основное направление поляризации сейсмической волны, т. е. соответствует направлению прихода волны и, приближенно, углу между источником и приемником. Для дальнейшего нахождения углов, соответствующих значениям pitch и roll инклинометра, нам необходим вектор эллипса, имеющий наименьшее собственное значение. [7]

Требуемый вектор может быть найден и иными способом - для каждого временного отсчета рассчитывается энергия, отношение значения амплитуды к энергии формирует поле точек в пространстве (рис. 2). Данные точки можно аппроксимировать плоскостью, нормаль которой и будет искомым вектором.

Имея вектор эллипса с наименьшим собственным значением, можно рассчи-

▼ Рис. 2. Зеленый вектор – нормальный вектор плоскости. Синие точки - исходное поле значений, оранжевые - спроецированные на плоскость.



тать угол между ним и его проекцией на горизонтальную плоскость для каждой пары источник-приемник. Уменьшая итерационным путем сумму углов для каждой пары ПВ-ПП определяется дифферент (pitch).

Имея значения pitch, выполняется поворот исходных сейсмических данных на рассчитанный угол (формула 1).

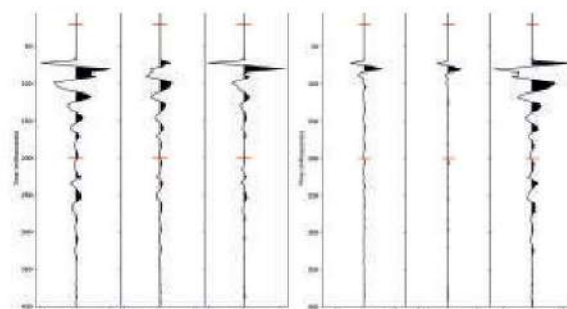
$$\begin{bmatrix} X'(t) \\ Y'(t) \\ Z'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

где $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ - сейсмические трассы, а P - дифферент (pitch)

Далее аналогичным образом вычисляется крен (roll), но в качестве входных данных используются развернутые на предыдущем этапе сейсмические трассы - $X'(t)$, $Y'(t)$, $Z'(t)$.

Таким образом, определяется требуемая пара углов - крен и дифферент.

Рассмотрим предложенный алгоритм на примере реальной сейсмической записи, соответствующей донному модулю, установленному (по показаниям инклинометра) с значительным отклонением от нормального. Значения

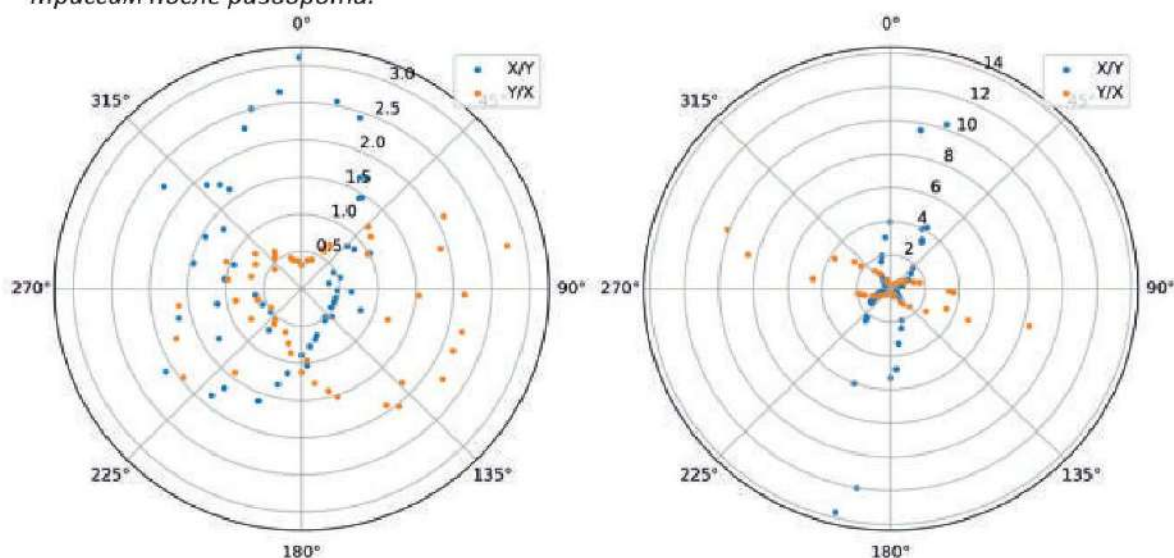


▲ Рис. 3. Исходные сейсмические трассы X , Y , Z компонент (слева), сейсмические трассы X , Y , Z компонент после разворота (справа).

анализируемых углов для данного случая: pitch = 115°, roll = -26°. Соответствующие расчетные значения - 113° и -28°. Разворот сейсмических трасс путем умножения вектора смещения на матрицу поворота приводит к компенсации наклона корпуса донного модуля - вся энергия, соответствующая полю продольных волн «перекачивается» с горизонтальных компонент на вертикальную - т.е. происходит вертикализация поля компоненты Z (рис.3).

В свою очередь, поле горизонтальных компонент высвобождается от вертикальной составляющей сигнала, что является одним из этапов подготовки

▼ Рис. 4. Слева - исходное отношение среднеквадратичных амплитуд X, Y компонент, справа - отношение среднеквадратичных амплитуд X, Y компонент по сейсмическим трассам после разворота.



поперечного волнового поля к дальнейшей обработке.

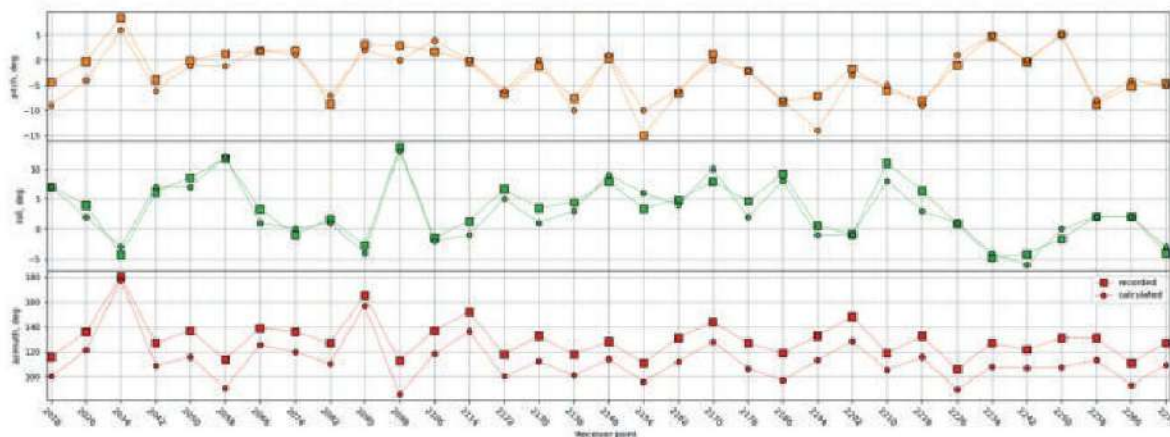
Для дополнительного контроля корректности разворота сейсмической записи могут быть использованы круговые диаграммы отношений среднеквадратичных (RMS) амплитуд компонент X и Y (Рис. 4) для каждой пары отсчетов.

Данная диаграмма, полученная по исходному волновому полю (Рис. 4, слева), имеет квазиэллиптическое распределение значений. Однако после компенсации наклона модуля распределение принимает вид вытянутого вдоль осей горизонтальных компонент поля эллипса (Рис. 4, справа) – угол между множествами значений X/Y, Y/X на диаграмме принимает значение 90° , что указывает на корректность рассчитанных углов.

На основе предложенного алгоритма был выполнен расчет углов pitch, roll, yaw для набора реальных данных – линии приёма, состоящей из 32 донных модулей. Полученные значения вынесены на графики в сравнении с реальными измеренными инклинометром значениями (рис. 5).

Для анализируемого профиля средние отклонения между наблюдаемыми и рассчитанными значениями составили для углов pitch и roll - 0.5° , что лежит вне точности измерения прибора (менее 1°).

▼ Рис. 5. Сравнение углов, рассчитанных по сейсмическим данным (круглые марки), с показаниями инклинометров (квадратные марки).



Средняя разница по азимуту - 17° связанная, в первую очередь, разницей магнитного и истинного азимутов для конкретного региона работ.

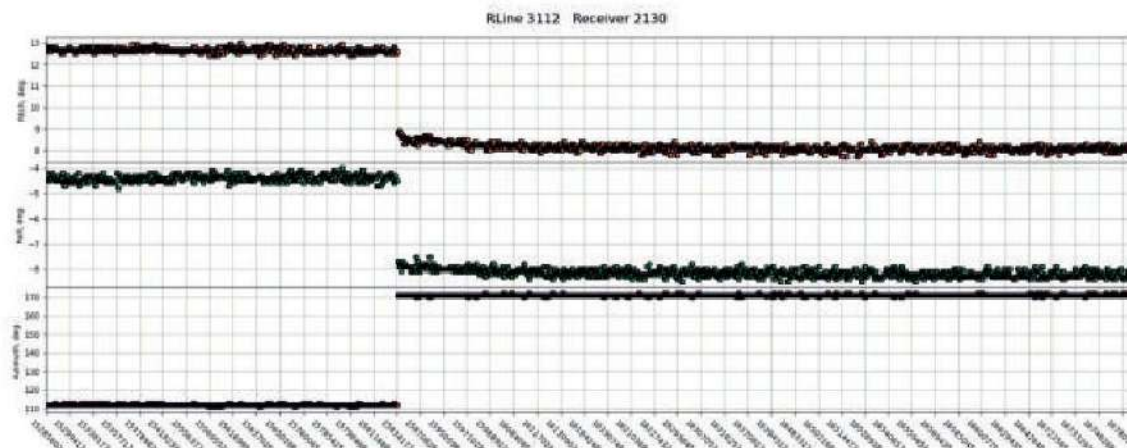
Практика использования донных модулей такова, что приборы могут находиться на морском дне вплоть до месяца и более и, в зависимости от конкретных внешних условий (погода, рельеф дна, придонные течения), менять свою ориентацию в процессе работ (рис. 6).

В подобной ситуации отследить поведение модуля во времени иначе, как на основе качественных показаний инклинометра, невозможно.

Выводы

В результате данной работы получены расчетные оценки в достаточной мере согласующиеся с показаниями инклинометров ДМ «Краб», что, с одной стороны, подтверждает корректность выбранного алгоритма расчета, с другой - подтверждает полное соответствие инклинометра заявленным техническим характеристикам. Расчеты выполнены на для статистически значимой выборки полевых данных.

Единичные отклонения могут быть вызваны как проблемами с отдельно взятым инклинометром, так и с ошибкой вычисления, связанной с качеством



▲ Рис. 6. Пример записи углов для ДМ, сменившего ориентацию в процессе работы.

сейсмических данных.

Стоит отметить, что определение ориентации ДМ по сейсмическим данным не может являться альтернативой показаниям инклинометра – в условиях мелководья прямая волна не регистрируется в явном виде и для подобного анализа непригодна. Дополнительные ограничения на рассматриваемую методику накладывает использование для расчета только ближних удалений – мы, по сути, выполняем расчет в узких временных окнах, соответствующих работе судна-источника в непосредственной близости от конкретного ДМ. Добавим, что в полной мере методика применима только для данных, полученных в рамках площадных съемок, где обеспечивается достаточно равномерное азимутальное распределение трасс в области ближних удалений.

Литература:

1. Казанин А.Г. Инновационный цифровой сейсмический комплекс морской сейсморазведки "Краб". Разработка, внедрение и перспективы развития отечественных донных станций / А.Г. Казанин, С.О. Базилевич, Д.Г. Куома и др. // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 12(253). – С. 28-35.
2. Казанин А.Г. Многоволновые сейсморазведочные работы 3D(4C) на континентальном шельфе о. Сахалин с использованием системы автономной донной регистрации Краб / А.Г.

Казанин, С.О. Базилевич, А.В. Зимовский и др. // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 8. – С. 14-18.

3. Казанин А.Г. Применение инновационного комплекса сейсмических регистраторов «Краб» на действующих месторождениях шельфа России / А.Г. Казанин, С.О. Базилевич, Д.Г. Куома и др. // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 4(257). – С. 34-39.

4. Казанин Г.С. Многокомпонентные морские сейсмические исследования на арктическом шельфе на базе технологии Geospace / Г.С. Казанин, С.А. Нечхаев, В.А. Щедров, А.В. Зимовский / Разведка и охрана недр. – 2014. – № 4. – С. 40-44.

5. Казанин Г.С. Результаты испытаний отечественных 4-компонентных автономных донных станций «КМС» в юго-восточной части Баренцева моря в сравнении с донными станциями ОВХ компании Geospace / Г.С. Казанин, С.О. Базилевич, А.В. Зимовский, И.А. Матвеев, Д.Г. Куома, Д.А. Ильинский., К.А. Рогинский, О.Ю. Ганжа // Сборник материалов 8-й международной конференции «Геосочи - 2018». – 2018. Тверь: Полипресс.

6. ООО «Морской Технический Центр», Автономная донная сейсмическая станция аппаратно-программного комплекса морской сейсморазведки и мониторинга в транзитных зонах и на шельфе «Краб». Техническое описание и руководство по эксплуатации. – 2021.

7. Шевченко А. А. Сейсмические исследования в скважинах // М.: МГУ, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики. – 2007.