

Система для трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях – технология работ и обработки данных

■ Бирюков Е.А., Понимаскин А.И., Маев П.А., ООО "СПЛИТ", г. Москва.

■ Гайнанов В.Г., д.т.н., Токарев М.Ю., к.т.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Аннотация

В работе излагаются принципы конструирования систем трехмерных сейсмоакустических наблюдений, расчет их параметров и оценка возможностей. Представлены некоторые примеры применения как зарубежных, так и разработанных авторами систем.

Ключевые слова: *трехмерная сейсморазведка, инженерные изыскания на акваториях, морские трехмерные сейсмоакустические наблюдения.*

Введение

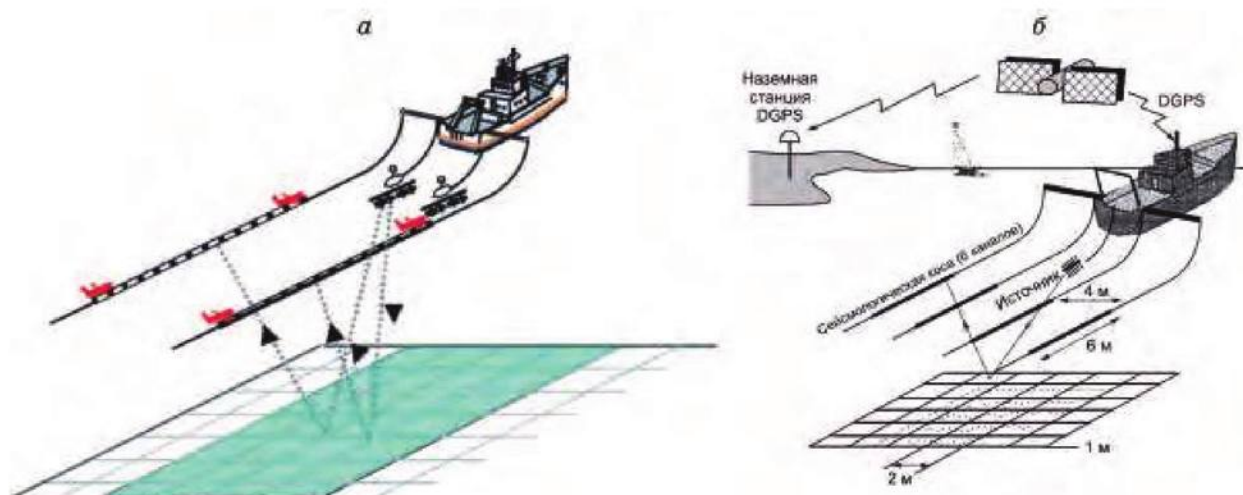
Разработки систем трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях для изучения самой верхней части разреза для инженерных и других целей начались более 20 лет назад. Однако первоначально отсутствие технологий и соответствующей аппаратуры для определения координат источников и приемников с достаточной точностью, а также сложность обработки данных не позволяли получить достаточно качественные данные. Тем не менее за этот период разные научные организации опробовали самые разные конструкции для проведения трехмерных сейсмоакустических наблюдений (Гайнанов и др., 2017).

Системы для морских трехмерных сейсмоакустических наблюдений

В целом такие конструкции можно разделить на две группы: 1) системы для работы в диапазоне частот выше 1–2 кГц, имеющие конструкцию в виде жесткой рамы или решетки, в узлах которой располагаются приемники, так как иначе обеспечить с достаточной точностью требуемые расстояния между ними не удастся; 2) системы для работы в более низком частотном диапазоне колебаний, в которых для задания взаимного положения источников и приемников применяется способ буксировки приемных кос с выстрелов по бортам судна или для

разведки кос используются параваны (Шматков, 2014).

Системы первой группы могут использоваться для исследования геологического разреза лишь до небольших глубин, поэтому для целей инженерных изысканий не представляют большого интереса, а вот относительно низкочастотные системы второй группы, позволяющие исследовать разрез до глубин 50–100 метров с вертикальным разрешением не хуже 1 м, выглядят востребованными для этих целей. Поэтому мы в своей разработке ориентировались именно на такие системы, наиболее ранней из которых является разработка института IFREMER (Франция). Авторы разработки позиционируют систему как средство для проведения инженерных изысканий на небольших площадях с глубинами моря до 100 м, предназначенную для получения сейсмического изображения геологической среды с вертикальным разрешением 1 м (Thomas et al., 2012; Marsset et al., 2002). Авторы опробовали несколько вариантов системы наблюдений – начиная от двух кос и двух источников до четырех кос и одного источника (рис. 1). Для возбуждения упругих колебаний использовался источник типа “спаркер” с центральной частотой 600 Гц. Для регистрации использовались сейсмические косы по шесть каналов (с шагом 1 м между каналами).



▲ Рис. 1. Схемы системы института IFREMER: а - по (Thomas et al., 2012); б - по (Marsset et al., 2002).

Проект P-Cable 3D начал развиваться еще с 2000-х годов, сначала как научно-исследовательская разработка, которая потом завоевала и коммерческий успех (Шматков, 2014).

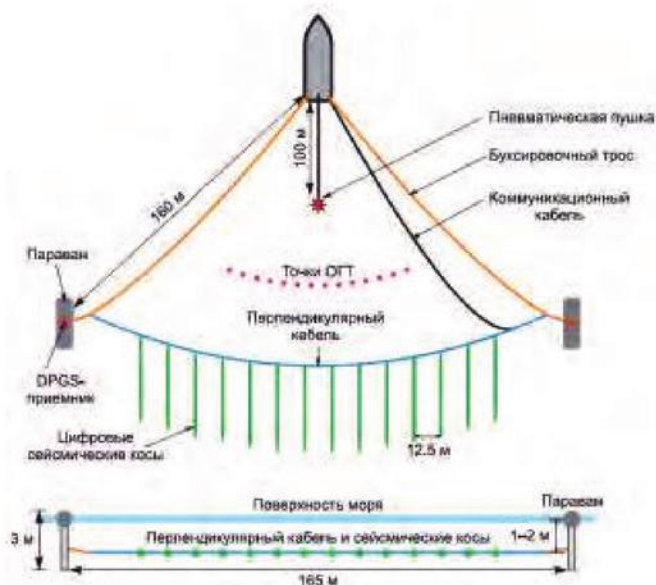
Успех системы P-Cable обусловлен тем, что в его разработке участвовали сразу несколько известных компаний: твердотельные косы – производства “Geometrics”, пневматический источник – производства “Sercel”. Да и сама конструкция P-Cable оказалась очень удачной во многих отношениях. В настоя-

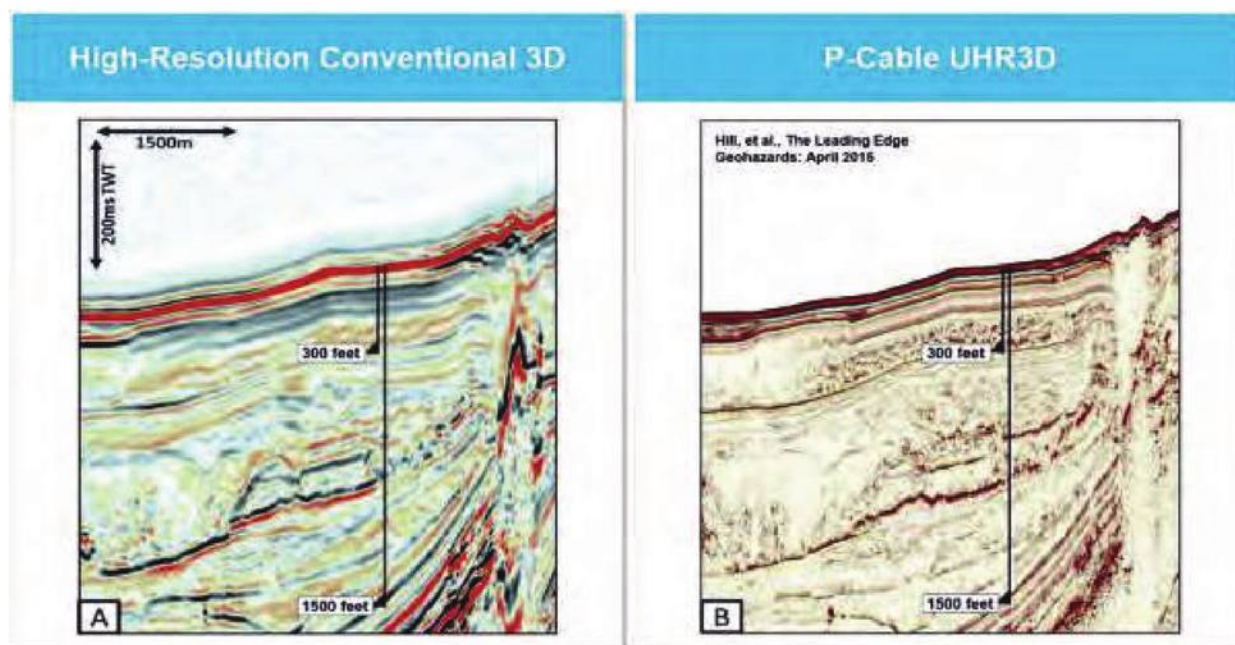
щее время она принадлежит компании Ocean Floor Geophysics (OFG), которая приобрела проект в партнерстве с PGS в марте 2022 года (<https://www.oceanfloorgeophysics.com>).

Однако нужно отметить высокую стоимость системы и некоторую громоздкость для малоглубинных исследований. Поэтому в качестве прототипов нам больше подходит разработка компании Geomarine Survey Systems (<https://ww2.geosys.nl>).

В системе используются 4 или 6 буксируемых кос и 3 источника. Косы буксируются на одинаковом удалении от среза кормы на расстоянии 4 м друг от друга, закреплены они так, что глубина от начала к концу косы постепенно возрастает. Две рамы электроискровых излучателей буксируются по краям приемной расстановки на расстоянии 2 м от крайних кос, третий источник буксируется по центру расстановки. Возбуждение акустического сигнала производится тремя одинаковыми электроискровыми источниками в режиме Flip-Flap-Flor. Количество электродов, общая энергия и шаг ПВ подбираются в зависимости от требуемой глубинности и разрешающей способности.

▲ Рис. 2. Система P-Cable 3D (вид сверху и вид сзади) (<https://ncs-subsea.com>).





▲ Рис. 3. Сравнение временных разрезов высокоразрешающей 3D сейсморазведки и ультравысокоразрешающей P-Cable UHR3D (<https://ncs-subsea.com>).

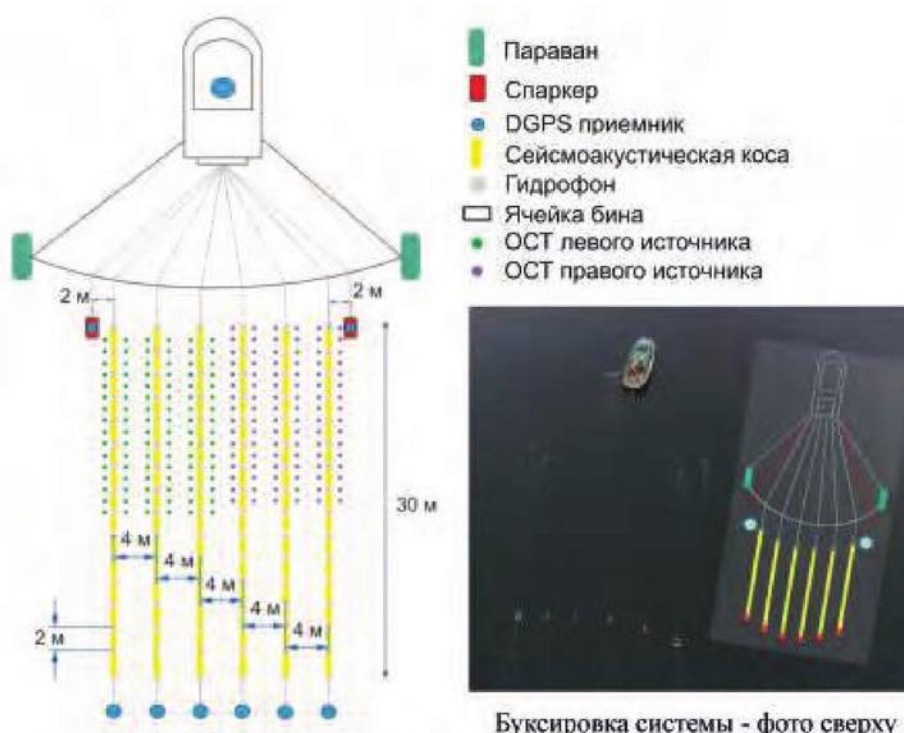
Проектирование системы трехмерных сейсмоакустических наблюдений

На основании детального анализа конструктивных особенностей и рабочих параметров рассмотренных систем, мы выбрали в качестве прототипа систему компании GeomarineSurveySystems (<https://ww2.geosys.nl>), позаимствовав

некоторые конструктивные особенности и системы P-Cable 3D (<https://ncs-subsea.com>), и сконструировали следующую систему наблюдений (Рис. 4).

Далее, исходя из требований к сейсмическим материалам для инженерных изысканий и конструктивных особенностей выбранной конфигурации системы

► Рис. 4. Система для морских трехмерных сейсмоакустических наблюдений – схема с параметрами и вид сверху в процессе наблюдений.



Буксировка системы - фото сверху

наблюдений, мы провели соответствующие расчеты и моделирование волнового поля.

Проектирование систем наблюдения 3D предусматривает определение следующих базовых параметров: размер бина, кратность наблюдений, максимальное и минимальное удаление, шаг наблюдений по осям x и y .

Определение размеров бина основывается на следующих условиях (Cordson et al., 2000):

1. Соответствие протяженности сторон бина размерам изучаемого объекта. Исходя из требования, что 3 трассы должны пересекать разведываемый объект, выбираем размеры бина:

$$S_{x,y} \leq R_{x,y}/3$$

где R_x, y – линейные размеры изучаемого объекта, в нашем случае 1–3 м.

2. Оптимальное суммирование целевых отражённых волн на базе бина. При наличии в разрезе наклонных целевых границ раздела сложение отражённых волн с нулевыми выносами на стороне бина будет происходить с временными задержками. Их значения по осям X и Y определяются простым соотношением:

$$\Delta T_{x,y} = \frac{\sin \theta_{x,y} * S_{x,y}}{V}$$

где $\vartheta_{x,y}$ – угол наклона отражающей границы по осям X и Y ;

$S_{x,y}$ – протяженность бина вдоль соответствующей оси;

V – средняя скорость распространения волн над наиболее глубоким целевым горизонтом.

Достаточно строгая оценка дает размеры бина не более 1 м.

Далее оценивались значения минимального и максимального удаления.

Поскольку наша технология трехмерных наблюдений разрабатывалась для

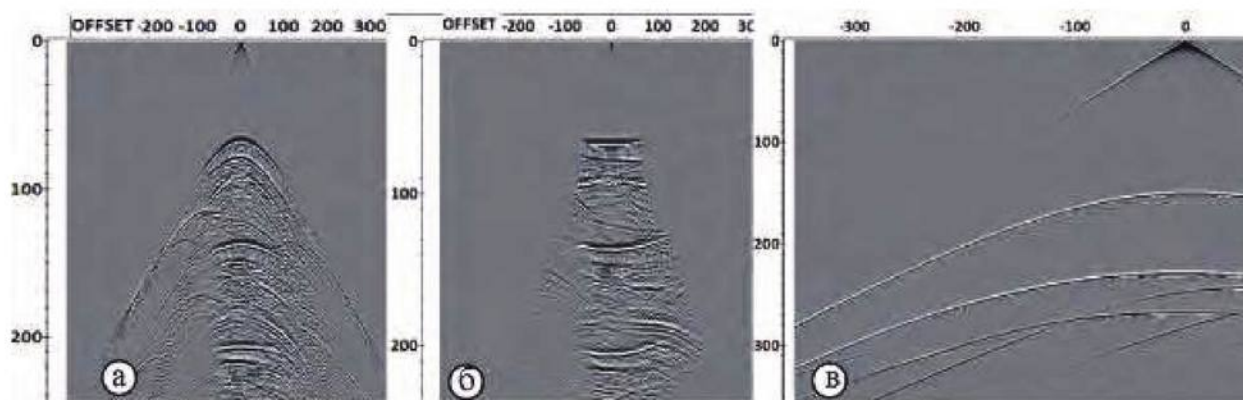
высокочастотной сейсмоакустики на мелководных акваториях, то минимальное удаление должно быть не более 10 м.

Величина максимального удаления при грубой оценке укладывается в промежуток от $0,8 H_{\max}$ до $1,5 H_{\max}$, где $H_{\max}$ – глубина наиболее погруженного целевого горизонта. Однако следование таким размерам привело бы к неоправданному увеличению размеров системы трехмерных наблюдений. Поэтому мы предусмотрели возможность проведения одновременных двухмерных наблюдений с дополнительной кривой большой длины специально для определения скоростных характеристик среды, и при проектировании 3D системы не стремимся увеличивать размеры системы до упомянутых выше.

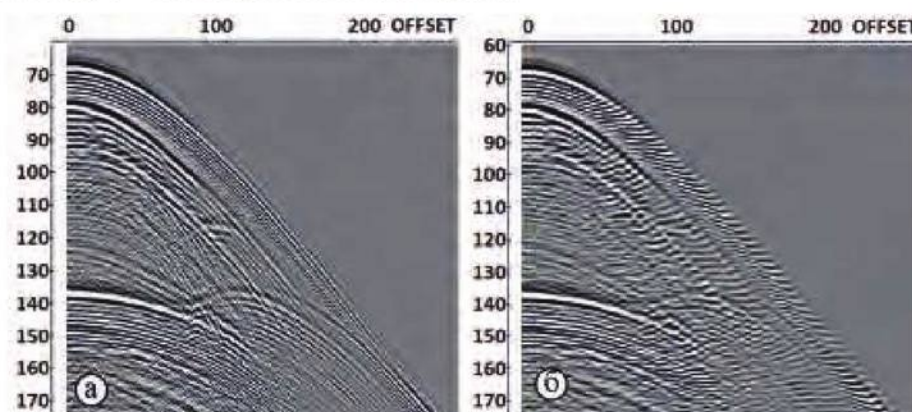
Моделирование

Для более обоснованной оценки минимального и максимального удалений, шага наблюдений, нами было проведено 2D моделирование с использованием двух моделей: одной мелководной, типичной для Белого моря, и другой, относительно глубоководной, на базе разреза в Восточно-Сибирском море.

Расчитывалось волновое поле в различные моменты времени и сейсмограммы ОПВ, на которых можно увидеть, что для мелководной модели слияние прямой и отраженной волн происходит на удалении 250 м (Рис. 5, а). Однако применение мьютинга при вводе кинематических поправок (20%) ограничивает интервалы полезной записи для донного отражения – 60 м, для первой границы – 105, а для нижней – 160 м (Рис. 5, б). Для глубоководной модели слияние волн не происходит даже на удалениях более 400 м (Рис. 5, в), хотя для высокоразрешающей сейсмоакустической системы такие удаления не нужны.



▲ Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ: а – для мелководной модели, б – для мелководной модели после мьютинга, в – для глубоководной модели.



▲ Рис. 6. Модельные сейсмограммы при шаге наблюдений: а – 1 м; б – 4 м.

С помощью моделирования выбирался также оптимальный шаг между приемниками в косе. Например, для мелководной модели рассчитывались сейсмограммы ОПВ при различном шаге наблюдений – от 1 м до 5 м. Если при шаге наблюдений от 1 до 3 м корреляция фаз волн вполне надежная, то при шаге 4 м проявляется пространственный алиасинг и корреляция фаз волн становится затруднительной (Рис. 6.).

Особенности обработки данных

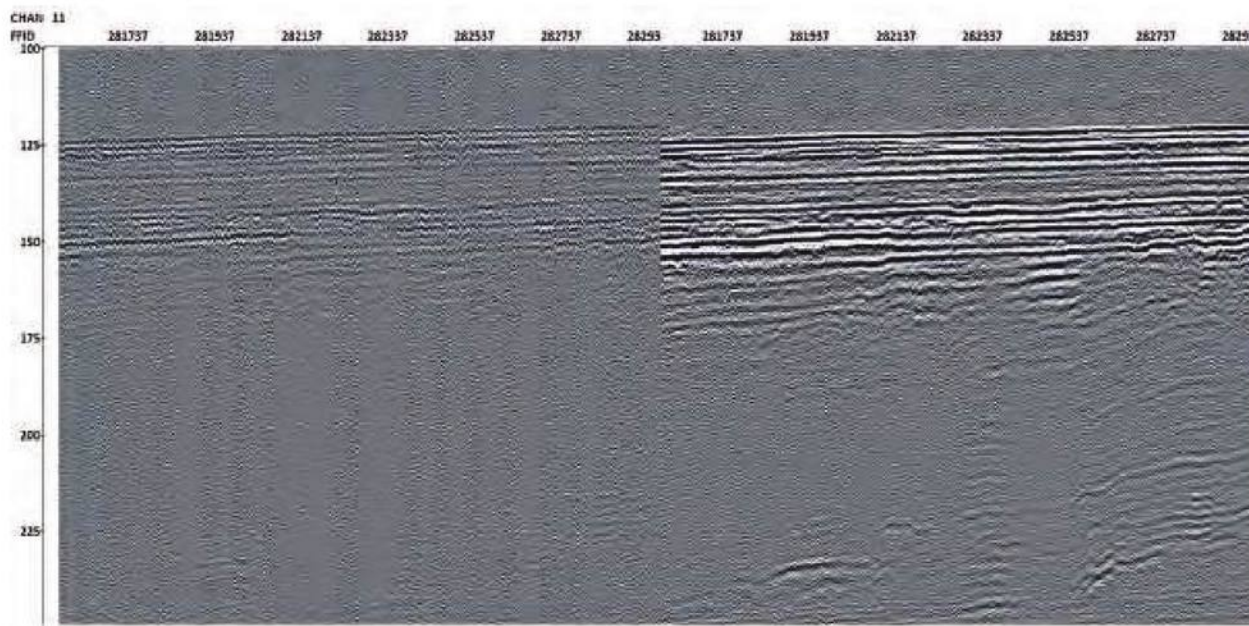
Обработка данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений в целом подчиняется такому же графу, как и данных любых трехмерных наблюдений, однако в связи с высокой разрешающей способностью данных повышенные требования предъявляются к процедурам контроля геометрии расстановки, вводу и коррек-

ции статических поправок, а также трехмерной миграции. Ниже представлены несколько примеров обработки реальных данных.

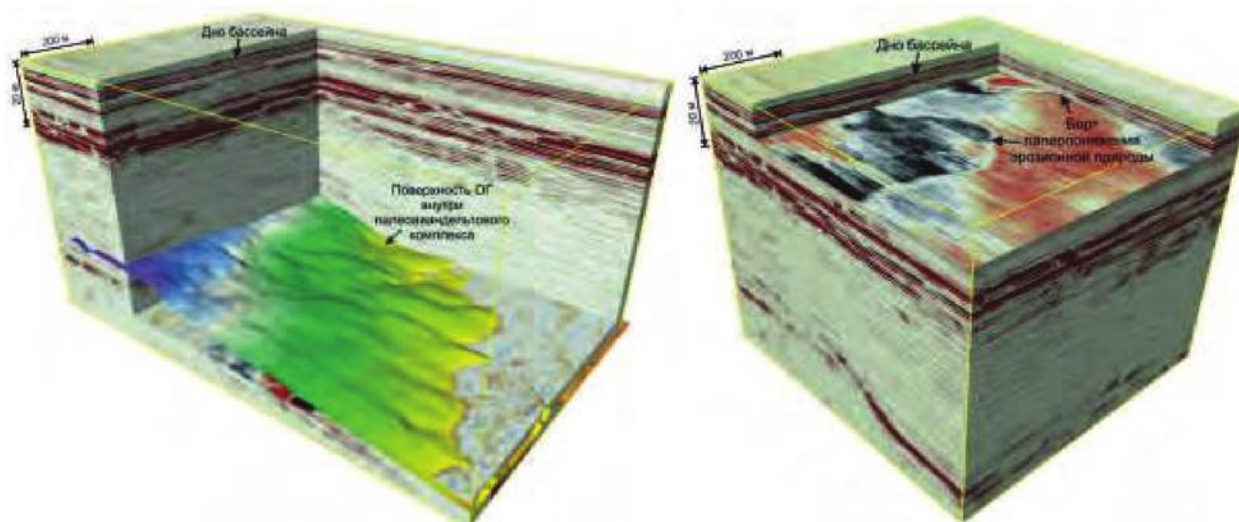
Достоинства трехмерных систем наблюдений заключаются не только в получении трехмерных изображений исследуемых отложений, но и в том, что трехмерная миграция часто позволяет существенно увеличить разрешенность изображения как по вертикали, так и по горизонтали, избавляя сейсмические изображения от ложных структур, типа дифракционных гипербола и боковых отражений (Рис.9).

Заключение

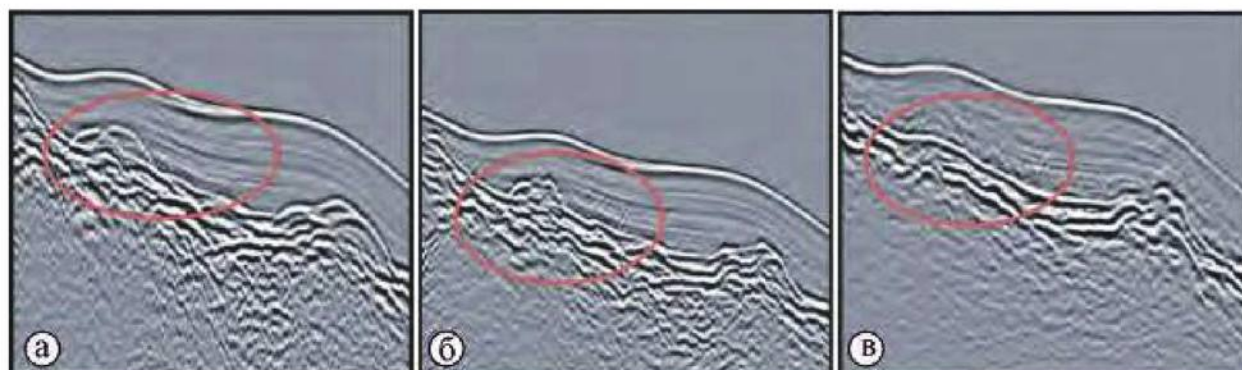
Разработана система для морских трехмерных сейсмоакустических наблюдений, позволяющая получить объемные изображения верхней части геологи-



▲ Рис. 7. Суммированные разрезы: слева – исходные данные; справа – после подавления шумов и ввода статических поправок.



▲ Рис. 8. Пример сейсмического куба, полученный с разработанной системой.



▲ Рис. 9. Фрагмент сейсмоакустического разреза, полученный с разработанной системой: а) исходный разрез ОГТ; б) разрез после 2D миграции; в) разрез после 3D миграции. Ложная структура внутри обведенного красным цветом фрагмента полностью исчезла только после 3D миграции.

ческой среды с детальностью около 1 м. Параметры системы обоснованы теоретическими расчетами и моделированием волновой картины. Система опробована при проведении исследований в инженерно-геологических целях в нескольких регионах и показала возможность получения достаточно качественных результатов.

Литература:

1. Гайнанов В.Г., Верхняцкий А.А., Токарев М.Ю., Шматков А.А. Трехмерные сейсмоакустические наблюдения на акваториях: обзор современных технологий // Деловой журнал Neftegaz. RU. 2017. № 1, с. 56-68.
2. Шматков А.А. Разработка методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014, 139 с.
3. Cordsen A., Galbraith M., Peirce J. Planning Land 3-D Seismic Surveys. 2000. P. 214.
4. Marsset T., Marsset B., Thomas Y. and Didailier S. 2002. Sismique treshaute resolution 3D; une nouvelle methode d'imagerie des sols superficiels. Geoscience 334, 403–408.
5. Thomas Y., Marsset B., Westbrook G.K., Grall C. et al. 2012. Contribution of high-resolution 3D seismic near-seafloor imaging to reservoir-scale studies: application to the active North Anatolian Fault, Sea of Marmara. Near Surface Geophysics 10, 291–301.
6. <https://ncs-subsea.com/media/ofg-acquires-ncs/>
7. <https://www.oceanfloorgeophysics.com/>
8. <https://ww2.geosys.nl/>

Подробнее об авторах



Бирюков
Евгений Алексеевич

Генеральный директор,
ООО "Сплит".



Понимаскин
Алексей Игоревич

главный геофизик,
ООО "Сплит".



Маев
Петр Андреевич

начальник полевого
отдела, ООО "Сплит".



Гайнанов
Валерий Гарифьянович

д. т. н., профессор
кафедры сейсмометрии
и геоакустики геологического
факультета МГУ.



Токарев
Михаил Юрьевич

к. т. н., ведущий научный
сотрудник геологического
факультета МГУ.