

Влияние допусков контроля качества на возможные изменения характеристик регистрируемого сигнала при морских сейсмических работах 3D

■ Горбачев С. В.¹, Лопаткина Э.В.²,

¹ Высшая школа инновационного бизнеса МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва.

² РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.

Аннотация. Морские сейсморазведочные работы 3D являются сложным технологическим процессом, в котором задействовано специализированное судно с большим комплексом сейсмического и вспомогательного оборудования. Важным условием получения качественных данных является соблюдение проектных параметров: глубины буксировки пневмоисточников и сейсмоприемников, сепарации между косами и линиями пневмоисточников, номинального рабочего давления компрессоров и других параметров. Помимо технических факторов, влияющих непосредственно на сейсмический сигнал, существенное воздействие на соблюдение проектной геометрии и стабильности работы оборудования оказывают поверхностно-гидрологические условия.

В работе представлен анализ изменения характеристик сейсмического сигнала на модельных данных в пределах заданных допусков, указанных в Геолого-Технических заданиях, выделены ключевые отклонения, которые влияют на сигнал, а также подготовлены рекомендации по повышению контроля за стабильностью сейсмического оборудования в процессе выполнения полевых работ.

Ключевые слова: морские сейсморазведочные работы, пневмоисточник, моделирование, контроль качества, характеристики сейсмического сигнала, сигнатура.

Введение

Во время проведения морских сейсморазведочных работ осуществляется постоянный контроль качества получаемых данных на основании параметров и диапазонов, указанных в Геолого-Техническом задании (ГТЗ). Как уже было представлено в работе [Горбачев С.В., 2023] многие из этих величин подобраны исходя из опыта предыдущих проектов. У специалистов, отвечающих за полевые работы, как правило, нет детального анализа всех параметров и их влияния на качество получаемых сейсмических данных. Поэтому целью представленной работы является показать на модельных данных углубленный анализ влияния возможных изменений работы оборудования в установленных допусках и за их

рамками. Рассмотрены параметры, связанные с изменениями работы пневмоисточника (ПИ): давление, синхронизация пневмопушек и задержка возбуждения импульса, а также связанные с влиянием гидрологической обстановки (морские течения и волнения) на характеристики регистрируемого сигнала.

Исходные данные

Для выполнения работы было выбрано специализированное программное обеспечение (ПО) для моделирования конфигурации морских пневмоисточников – Gundalf. Перед основными расчетами были проведены дополнительные исследования существующих иностранных программных пакетов, которые

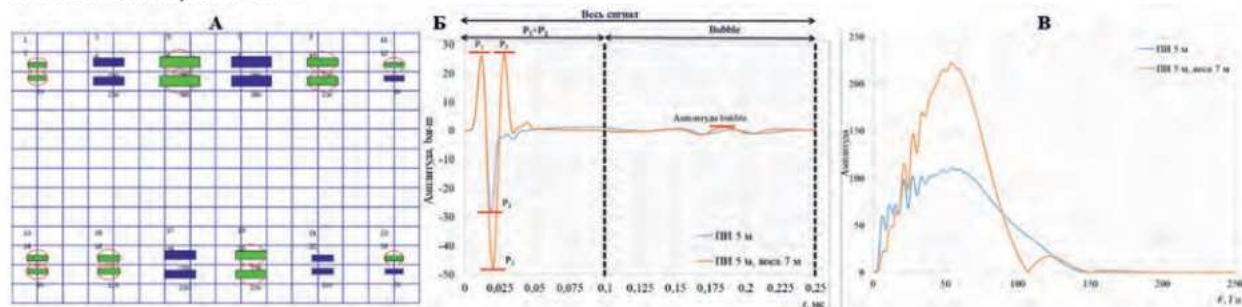
используются в отрасли: Gundalf и Nucleus. Анализ показал, что существуют различия в результатах моделирования характеристик источников (сигнатур) в разных ПО и даже их разных версий, но общий тренд и величины изменений схожи. К сожалению, российских аналогов работоспособного софта на текущий момент на рынке нет.

Анализ был выполнен на примере реальной конфигурации пневмоисточников, применяемой при проведении морских сейсморазведочных работ 3D (Рисунок 1). Она представляет собой две параллельные пневмолинии, каждая из которых состоит из 6 кластеров пневмопушек, по 2 пушки в каждом, объединенные между собой общей штангой и образующих конфигурацию из 14 основных и 10 запасных источников. Общий объем источника (без учета запасных пушек) – 2380 куб. дюйм (39 л). Основными параметрами являются: пиковые амплитуды (положительные (P1) и отрицательные (P2), при учете кратной волны (волны-спутника) со стороны приемника (P3)); отношение P1 к максимальной амплитуде энергии вторичной пульсации (bubble), а также энергии и отклонения функции взаимной корреляции (ФВК) между базовым модельным значением и характеристикой, рассчитанной при изменении условий.

Различия в форме сигнала и амплитудного спектра являются следствием исходных условий моделирования. В одном случае рассчитывается сигнатура только с учетом влияния волны-спутника со стороны источника, в другом с учетом влияния обоих волн-спутников и за источник, и за приемник, то есть накладывается второе кратное отражение от поверхности вода/воздух [Dundurur, 2018]. В работе представлены расчеты с учетом волны-спутника за источник, а при анализе изменения влияния глубины буксировки сейсмокос сигнатура представлена с обеими волнами-спутниками.

При анализе источника и его изменений чаще всего используют оценки всей формы сигнала. С учетом того, что характеристики основной энергии и вторичных пульсаций меняются нелинейно, лучше анализировать как весь сигнал, так и по зонам (Зона 1 – сигнал с волнами-спутниками, зона 2- зона вторичных пульсаций, зона 3 – весь сигнал). На рисунке 1Б и таблице 1 представлены основные характеристики базовых сигнатур.

Рассмотрим ключевые параметры, влияющие на характеристику сигнала, которые контролируются в процессе полевых работ и оцениваются моделированием. В таблице 2 представлены параметры и допуски в соответствии с ГТЗ.



▲ Рис. 1. Характеристики пневмоисточника: А – схема, Б – сигнатура источника (рассчитанная с волной-спутником за источник (синий) и источника и приемника (красный)), В – амплитудно-частотный спектр сигнала.

Параметры	При отсутствии волны-спутника, связанной с ПП	При наличии волны-спутника, связанной с ПП
P1, бар*м	26,1	
P2, бар*м	-28,2	-48,0
P3, бар*м	-	26,7
Bubble period (B), с	1,2	1,5
P/B	22,5	17,3
P/P	54,3	74,1
Энергия, Дж	170609,6	

▲ Табл. 1. Базовые характеристики анализируемого сигнала.

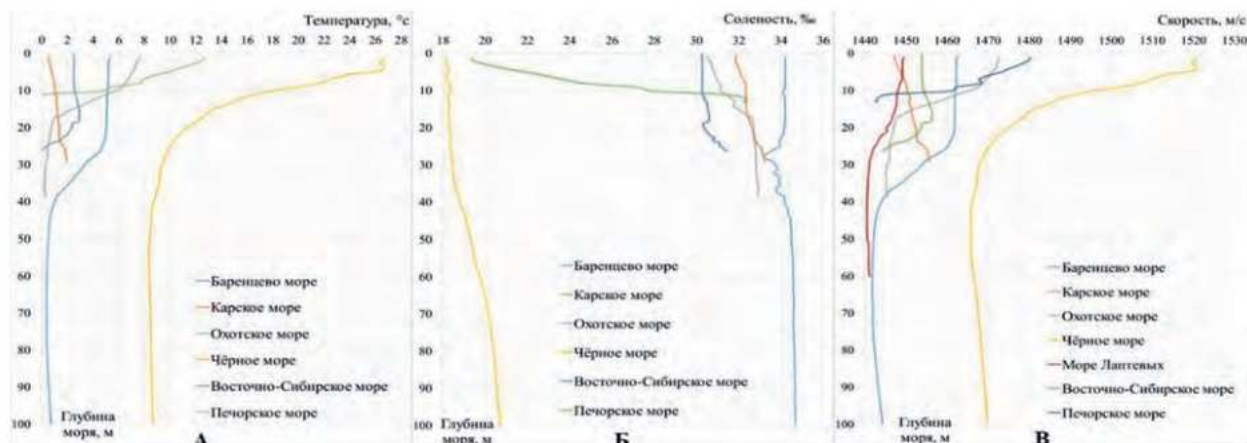
Параметры возбуждения и регистрации		Допуски по ГТЗ
Глубина буксировки ПИ	5 м	+/-0,5 м
Сепарация между линиями ПИ	10 м	+/-1,25 м
Рабочее давление ПИ	2000 psi	+/-5_%
Синхронизация элементов ПИ	0 мс	<1 мс
Глубина буксировки кос	7 м	+/-1 м
P1	-	не более 10%
P\B	-	не более 15%
ФВК	-	0,9985 или 0,998 (в разных ГТЗ по-разному)

▲ Табл. 2. Проектные параметры оборудования и допуски по ГТЗ.

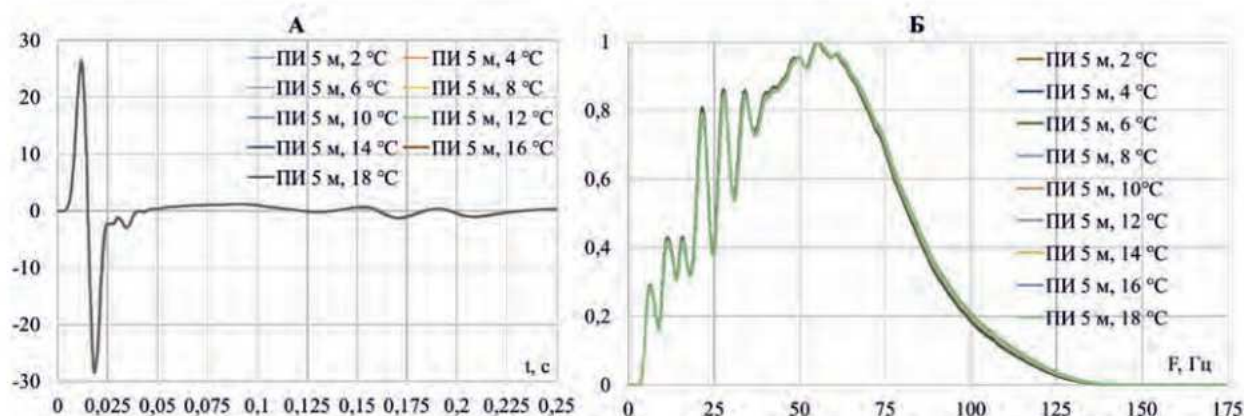
Условия среды

Одним из параметров моделирования является характеристика водного слоя, которая меняется в зависимости от региона, сезона и глубины. Поэтому на начальном этапе были проанализированы реальные результаты наблюдений при проведении морских сейсмических

работ 2D, 3D и инженерных изысканий в Баренцевом, Печорском, Карском, Восточно-Сибирском, Охотском и Чёрном морях. Было определено их влияние на модельные сигнатуры. На рисунке 2 представлены графики изменения температуры, солёности и скорости распространения упругих волн в водном



▲ Рис. 2. Тренды изменения для различных морей: А – температуры, Б – солёности, В – скорости в водном слое.



▲ Рис. 3. Сигнатуры при изменении температуры (скорости распространения волн) водного слоя: А – во временной области, Б – в частотной области.

слое для анализируемых регионов.

Результаты наглядно показывают, что для северных и южных морей есть существенные отличия, которые необходимо учитывать при работе.

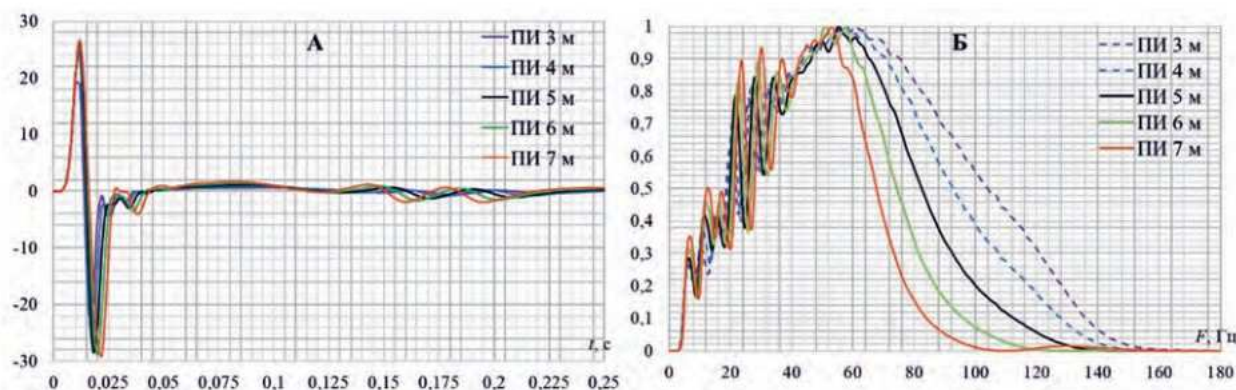
Для моделирования и оценки влияния изменения параметров водного слоя был выбран температурный диапазон от 2°C до 18°C, что соответствует скоростям распространения волны от 1458 м/с до 1516 м/с. За базовое значение было взято 10°C (для условий Охотского моря). На рисунке 3 представлены результаты моделирования сигнатур и их амплитудно-частотные спектры. Стоит отметить, что при анализе учитывалось изменение только температуры и скорости распределения упругих волн, то есть значение солености было зафиксировано.

Как отмечалось ранее, все модельные сигнатуры необходимо анализировать по нескольким зонам. Все отклонения

амплитуд были рассмотрены относительно базовой сигнатуры. В таблице 3 показаны отклонения, по которым можно сделать выводы, что при изменении температуры воды происходит изменение характеристик сигнала. Изменение приводит к искажению пиковых амплитуд и как следствие, энергии сигнала. При этом видно, что отклонение температуры в диапазоне 2х°C соответствует требованиям ГТЗ по отклонению значений ФВК. Из этого можно сделать вывод, что при проведении полевых работ необходимо детально контролировать и регистрировать характеристики водной толщи для последующего учета на уровне обработки. Если для проектов 2D и 3D это может быть не столь существенным, то для проектов 4D недоучет изменений скоростей в водном слое может вносить существенные искажения.

▼ Табл. 2. Изменение основных рассматриваемых характеристик сигнатур в зависимости от температуры водного слоя.

Отклонение	P1, %	P2, %	P/B, %	Энергия, %	ВКФ 0-0,25с	ВКФ 0-0,1с	ВКФ 0,1-0,25с
-8 °C	-1,1	1,1	3,1	-3,2	99,931	99,933	99,648
-6 °C	-0,8	0,7	2,2	-1,7	99,961	99,963	99,806
-4 °C	-0,4	0,0	1,3	-1,1	99,985	99,985	99,916
-2 °C	0,0	0,0	0,4	-0,5	99,996	99,996	99,979
+2 °C	0,4	-0,4	-0,9	0,5	99,997	99,997	99,979
+4 °C	0,8	-0,7	-1,3	1,1	99,987	99,987	99,913
+6 °C	1,1	-1,1	-1,8	1,5	99,973	99,974	99,801
+8 °C	1,1	-0,7	-2,2	1,3	99,954	99,956	99,644



▲ Рис. 4. Примеры изменения сигнатуры источника при разных глубинах:
А – во временной области, Б – в частотной области.

Изменение характеристик сигнала в связи с изменениями условий возбуждения и приема

С учетом особенностей проведения морских сейсморазведочных работ при буксировке источников и приемников в водном слое, на них влияют гидрологические и метеорологические условия: ветра, шторма, течения и т.д. Это приводит к смещению положения оборудования в пространстве и, как следствие, к изменению характеристик генерируемого и впоследствии регистрируемого сигнала.

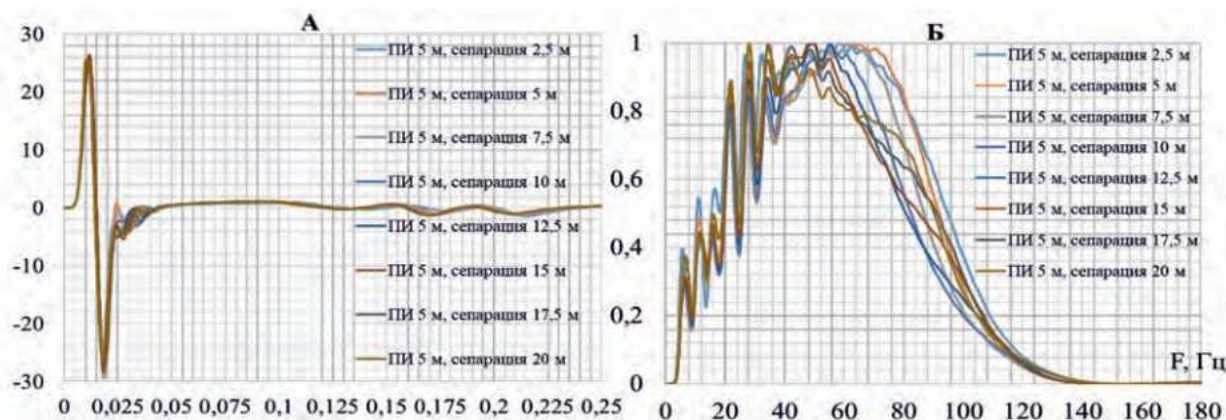
С учетом накопленной статистики по многим проектам, основные изменения источника связаны с отклонением глубины от заданной и изменением сепарации между пневмолиниями в связи с влияни-

ем гидрологической модели. При проектном заглублении источника 5 м были проанализированы отклонения ± 2 м с шагом 0,25 м. На рисунке 4 представлен результат моделирования 16-ти сигнатур с изменением заглубления (для удобства отображения графики отображены с шагом 1 м).

В таблице 4 представлено цифровое сравнение параметров и их отклонений. Цветом выделены допуски по параметру заглубления пневмоисточника, закреплённые в геолого-технических заданиях. Важно отметить, что уменьшение заглубления пневмоисточника влияет в разы больше, чем увеличение заглубления. Можно видеть, что амплитуда источника (P1) и критерий 10% выдерживается до уменьшения глубины чуть более 1 м, при

▼ Табл. 4. Изменение параметров сигнатуры в связи с изменением глубины источника.

Отклонение	P1, %	P2, %	P/B, %	Энергия, %	ВКФ 0-0,25с	ВКФ 0-0,1с	ВКФ 0,1-0,25с
-2	26,8	23,4	-37,8	39,0	84,189	84,490	36,514
-1,75	21,8	22,7	-30,7	28,1	87,358	87,631	44,818
-1,5	16,5	14,9	-32,4	21,7	90,309	90,543	54,765
-1,25	11,5	8,5	-31,6	17,0	92,987	93,173	65,465
-1	7,7	3,2	-28,0	9,1	95,343	95,479	75,963
-0,75	4,6	-0,4	-22,7	3,4	97,340	97,427	85,467
-0,5	2,3	-2,1	-15,1	11,7	98,802	98,845	93,144
-0,25	0,8	-2,1	-7,1	5,1	99,698	99,710	98,206
+0,25	-0,8	3,2	6,7	-5,5	99,713	99,726	98,235
+0,5	-1,5	3,2	11,6	-7,1	98,872	98,924	93,131
+0,75	-1,5	-0,7	14,7	-11,9	97,504	97,623	84,945
+1	-1,9	-2,1	18,2	-6,9	95,664	95,877	74,207
+1,25	-1,9	-2,1	22,2	-11,3	93,398	93,728	61,624
+1,5	-1,5	-0,7	31,1	-15,8	90,782	91,248	47,991
+1,75	-1,5	2,1	43,6	-20,1	87,907	88,517	34,124
+2	-1,1	-3,2	50,2	-22,5	84,836	85,595	20,704



▲ Рис. 5. Примеры сигнатур при изменении сепарации между линиями пневмоисточников: А – во временной области, Б – в частотной области.

этом Р/В при критерии 15% выдерживается до глубин, соответствующих ГТЗ. Самые существенные изменения происходят с ФВК. Даже при минимальном изменении в 0,25 м, значение ФВК равно 99,7, что существенно меньше установленного в ГТЗ. Анализ показывает, что глубина буксировки ПИ существенно влияет на характеристики сигнала и ее стабильность, поэтому целевого значения необходимо максимально придерживаться.

Помимо влияния на вертикальное положение пневмоисточников, гидрологическая обстановка, в том числе и кильватерная струя от винтов, воздействует на геометрию внутри группы источников, то есть положение линий пушек относительно друг друга. Для рассмотрения этого случая были смоделированы ситуации, когда меняется поперечное расстояние (crossline-сепарация). При

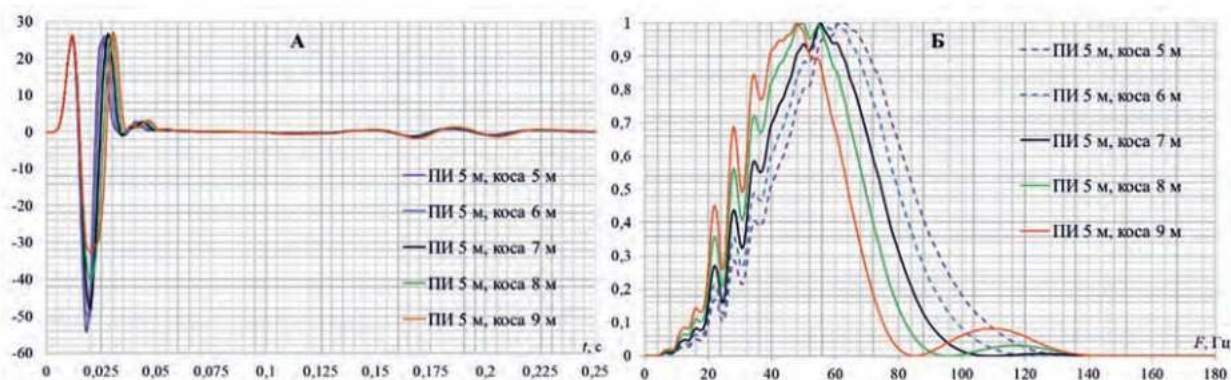
базовом расстоянии 10 м, были смоделированы изменения от 2,5 до 20 м с шагом 2,5 м. На рисунке 5 представлены результаты моделирования и спектры сигналов.

В таблице 5 представлены сводные значения изменений. Видно, что при изменении расстояния между линиями происходит изменение Р1, но даже при существенном изменении до 5 метров амплитуда меняется лишь на 1%. ФВК отличается от базовых значений, но не так существенно, как при изменении глубины.

Помимо изменения геометрической конфигурации источников, также в процессе полевых работ происходит отклонение забортного регистрирующего оборудования (сейсмокос). Это связано как с описанными выше причинами, так и с изменением плотности/солености воды при работе в прибрежных зонах, что приводит к изменению глубины

▼ Табл. 5. Изменение характеристик сигнатур в зависимости от расстояния между линиями ПИ.

Отклонение	Р1, %	Р2, %	Р/В, %	Энергия, %	ВКФ 0-0,25с	ВКФ 0-0,1с	ВКФ 0,1-0,25с
-7,5	5,7	7,1	3,6	-18,1	94,387	94,624	67,074
-5	1,1	-3,2	-5,3	-7,6	99,262	99,329	90,786
-2,5	0,0	-2,1	-4,0	-1,3	99,790	99,797	98,858
-1,25	0,0	-1,1	-1,8	-2,4	99,948	99,949	99,798
+1,25	0,0	0,7	1,3	4,3	99,951	99,951	99,894
+2,5	0,0	1,1	2,2	4,9	99,822	99,823	99,682
+5	-0,4	1,4	3,6	6,6	99,484	99,486	99,241
+7,5	2,7	6,0	4,9	11,8	95,757	95,758	95,711
+10	2,7	6,0	4,4	12,5	95,749	94,624	67,074



▲ Рис. 6. Сигнатуры при изменении глубины буксировки сейсмокос:

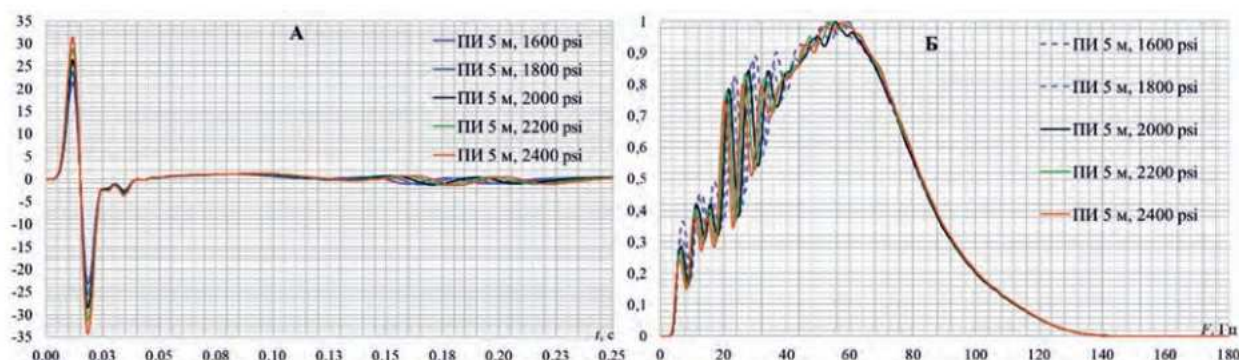
А – во временной области, Б – в частотной области

буксировки. В работе проанализировано изменение глубины приема в ± 2 м с шагом 0,25 м относительно базового заглубления 7 м. На Рисунке 6 представлен результат моделирования, в таблице 6 представлены результаты анализа в цифровом виде в соответствии с принятыми параметрами контроля. Можно видеть, что при изменении глубины приема, амплитуда P1 не меняется (что логично), при этом амплитуда P2 и P3 существенно меняются. При уменьшении глубины они уменьшаются, а при увеличении увеличиваются, при этом не одинаково в разные стороны. Также можно видеть, что амплитудно-частотный спектр существенно меняется, при увеличении глубины смещается режекторная частота (провал в связи с наложением кратной волны от водного

слоя) в сторону низких частот, уменьшая энергию высоких. Если рассмотреть изменения с точки зрения ГТЗ (Таблица 6), то при требовании ± 1 м, можно видеть, что по P2 данные находятся в допустимых пределах, но по ФВК уже на 0,25 м не соответствуют. В реальных условиях, при работе в прибрежной зоне с выходом рек и выносом пресной воды, происходит существенное изменение характеристик водного слоя, что может приводить к локальным изменениям глубины сейсмических кос на 5-10 метров. Поэтому изменение глубины источника и приемников необходимо отслеживать и на этапе обработки, особое внимание уделять зонам, где есть существенные отклонения при процедурах подавления вторичных пульсаций газового пузыря, образованного пневмоис-

▼ Табл. 6. Изменение характеристик сигнатур в зависимости от глубины буксировки сейсмокос.

Отклонение	P1, %	P2, %	P3, %	P/B, %	Энергия, %	ВКФ 0-0,25с	ВКФ 0-0,1с	ВКФ 0,1-0,25с
-2	0,0	-12,7	5,6	-20,8	0,0	84,121	84,097	97,630
-1,75	0,0	-11,0	2,2	-18,5	0,0	87,574	87,555	98,185
-1,5	0,0	-8,5	0,4	-13,3	0,0	90,682	90,667	98,666
-1,25	0,0	-5,2	0,7	-9,2	0,0	93,405	93,394	99,074
-1	0,0	-4,6	2,6	-8,1	0,0	95,706	95,698	99,408
-0,75	0,0	-5,2	2,6	-9,8	0,0	97,547	97,543	99,667
-0,5	0,0	-4,4	2,2	-9,8	0,0	98,895	98,893	99,852
-0,25	0,0	-2,5	1,5	-4,0	0,0	99,721	99,720	99,963
+0,25	0,0	3,3	0,4	4,0	0,0	99,717	99,717	99,963
+0,5	0,0	7,1	2,2	6,9	0,0	98,866	98,864	99,854
+0,75	0,0	11,3	2,2	8,7	0,0	97,453	97,447	99,672
+1	0,0	15,4	1,9	15,6	0,0	95,496	95,485	99,420
+1,25	0,0	19,8	-1,9	19,7	0,0	93,026	93,009	99,097
+1,5	0,0	24,2	-3,7	23,7	0,0	90,091	90,064	98,705
+1,75	0,0	28,1	-3,4	26,6	0,0	86,748	86,711	98,245
+2	0,0	31,7	-0,4	29,5	0,0	83,070	83,020	97,718



▲ Рис. 7. Сигнатуры при изменении давления в линиях пневмоисточника:
А – во временной области, Б – в частотной области.

точником (debubbling) и подавления волн-спутников (deghosting).

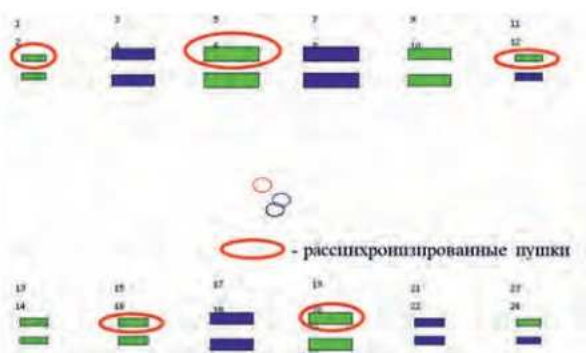
Изменения технических характеристик работы оборудования

При проведении работ кроме влияния среды могут быть отклонения в технической работе оборудования, которые также описаны допусками и которые можно промоделировать. К ним относится изменение давления и синхронизация отдельных элементов группы пневмоисточников. Было прогнозировано изменение давления от 1600 до 2400 psi при базовом давлении 2000 psi и допусках ГТЗ +/-5% (+/- 100 psi). На рисунке 7 и в таблице 7 представлен результат анализа

сигналов, цветом выделены допуски по давлению, используемые в геолого-технических заданиях. Наибольшие изменения связаны с низкими частотами и энергией вторичных пульсаций. Поддержание давления в пределах допусков приводит к максимальному изменению положительной пиковой амплитуды (P1) на +/-5%, P/V меняется в пределах от -2,2% до 2,2%, функция взаимной корреляции находится в диапазоне 99,950-99,998 (для окна 0,25 с). Контроль давления и поддержание его в заданном коридоре наиболее простое средство для получения стабильных характеристики источника, так как это зависит от настройки оборудования. С учетом

▼ Табл. 7. Изменение характеристик сигнатур в зависимости от давления в линиях пневмоисточника

Отклонение	P1, %	P2, %	P/V, %	Энергия, %	ВКФ 0-0,25с	ВКФ 0-0,1с	ВКФ 0,1-0,25с
-400 psi	18,4	18,8	9,8	31,0	99,347	99,984	19,042
-300 psi	14,6	15,2	8,9	25,0	99,579	99,990	47,980
-200 psi	9,6	10,3	4,9	17,0	99,802	99,996	75,095
-150 psi	7,3	7,8	4,0	12,9	99,887	99,998	85,753
-100 psi	5,0	5,0	2,2	8,7	99,950	99,999	93,634
-80 psi	3,8	4,3	1,3	7,0	99,968	99,999	95,931
-60 psi	2,7	3,2	0,9	5,2	99,982	100,000	97,718
-40 psi	1,9	2,1	0,9	3,5	99,992	100,000	98,991
-20 psi	0,8	1,4	0,4	1,8	99,998	100,000	99,749
+20 psi	-1,1	-0,7	0,0	-1,8	99,998	100,000	99,756
+40 psi	-1,9	-2,1	-0,4	-3,5	99,992	100,000	99,031
+60 psi	-3,1	-2,8	-0,9	-5,3	99,983	100,000	97,846
+80 psi	-3,8	-3,9	-1,8	-7,2	99,971	99,999	96,225
+100 psi	-5,0	-5,0	-2,2	-9,0	99,955	99,999	94,196
+150 psi	-7,3	-7,4	-3,6	-13,6	99,904	99,998	87,543
+200 psi	-10,0	-9,9	-4,9	-17,9	99,838	99,997	79,043
+300 psi	-14,9	-14,9	-7,6	-27,9	99,682	99,992	58,671
+400 psi	-19,5	-20,2	-8,9	-37,8	99,516	99,987	37,211



▲ Рис. 8. Выбор пушек для анализа.

реального опыта проектов данный параметр можно уменьшать с 5% до 2% (40 psi) или 3% (60 psi).

Следующий параметр, который необходимо контролировать, это синхронизация единичных пушек в группе пневмоисточников. Как отмечалось ранее, группа источников состоит из 14 основных пушек разных объемов. Если уточнять, то в кластерах представлены пушки объемом от 70 до 380 куб. дюйм. Все пушки должны срабатывать в определенный момент времени синхронно, но из-за аппаратурных неполадок или неисправности пушки может произойти рассинхронизация. Следовательно, необходимо рассмотреть описанную ситуацию на примере пушки каждого объема (Рисунок 8, Таблица 8). В соответствии с ГТЗ возможно допуск синхрони-

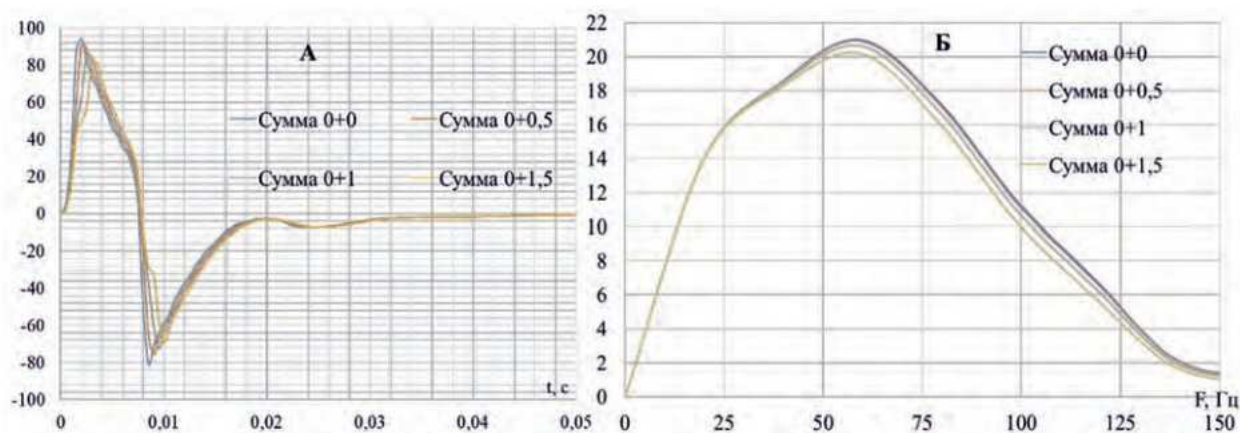
▼ Табл. 8. Изменение характеристик сигнатур в зависимости от рассинхронизации и объема пушек.

Объем пушки, куб.д	70					
Отклонение от базового параметра	P1, %	P2, %	P/B, %	ВКФ 0 - 0,25 с, %	ВКФ 0 - 0,05 с, %	ВКФ 0,05 - 0,25 с, %
0,5 мс	0,0	0,4	0,0	99,998	99,998	100,000
1 мс	0,0	0,7	0,0	99,995	99,995	99,999
1,5 мс	0,0	0,7	0,0	99,989	99,989	99,998
Объем пушки, куб.д	90					
0,5 мс	-0,4	0,7	0,0	99,994	99,980	99,958
1 мс	0,0	0,7	0,0	99,994	99,980	99,958
1,5 мс	0,0	1,8	0,4	99,996	99,983	99,960
Объем пушки, куб.д	110					
0,5 мс	0,0	0,7	0,0	99,993	99,993	99,999
1 мс	0,0	1,1	0,0	99,984	99,984	99,998
1,5 мс	0,0	1,4	0,0	99,970	99,969	99,995
Объем пушки, куб.д	230					
0,5 мс	0,0	1,1	0,4	99,988	99,988	99,997
1 мс	0,4	2,5	0,9	99,963	99,963	99,992
1,5 мс	1,1	3,5	1,8	99,928	99,927	99,981
Объем пушки, куб.д	380					
0,5 мс	0,4	1,8	0,9	99,978	99,977	99,995
1 мс	1,5	3,5	2,2	99,934	99,933	99,991
1,5 мс	2,7	5,7	4,0	99,873	99,871	99,981

зации не более 1 мс, поэтому была рассмотрена величина изменений на 0,5 мс, 1 мс и 1,5 мс для каждой пушки по отдельности. Наибольшее влияние оказывает изменение синхронизации пушки с объемом 380 куб. дюйм. Пиковая амплитуда (P1) в этом случае меняется на 0,4-2,7%, параметр P/B на 0,9-4%, функция взаимной корреляции находится в пределах от 0,9987-0,9998. Наименьшее влияние оказывают пушки с меньшими объемами и с меньшими значениями рассинхронизации.

Помимо рассинхронизации отдельных пушек, возможна аппаратная задержка при возбуждении колебаний. Чтобы смоделировать такую ситуацию, необходимо просуммировать сигнатуры без смещения и с заданным смещением. Максимальная задержка при срабатывании пневмопушки на пункте возбуждения равна 1 мс, но стандартный шаг дискретизации по времени для морских сейсморазведочных работ равен 2 мс. Следовательно, для более детального рассмотрения и ввода сдвига, сигнатуры были смоделированы с шагом 0,5 мс.

Далее производилось попарное суммирование без нормирования, то есть сигнал без сдвига складывался с



▲ Рис. 9. Модельные сигнатуры с результатами попарного суммирования:
А – во временной области, Б – в частотной области.

сигналом со сдвигом 0,5 мс, потом сигнал без сдвига суммировался с другими сигналами (сдвиг 1 мс и 1,5 мс). Результаты суммирования представлены на рисунке 9. Наибольшее искажение вносит рассинхронизация в 1,5 мс. Но искажение формы сигнала наблюдается и при сдвиге 1 мс и 1,5 мс. Для сдвига 0,5 мс функция взаимной корреляции в окне полезной составляющей равна 0,9857, в окне по всему сигналу – 0,9859. Для сдвига 1 мс функция взаимной корреляции в окне полезной составляющей равна 0,9547, в окне по всему сигналу – 0,9554. Для сдвига 1,5 мс функция взаимной корреляции в окне полезной составляющей равна 0,9201, в окне по всему сигналу – 0,9214. Из рисунка 9 следует вывод, что наибольшие искажения происходят в области полезной составляющей. Стоит отметить, что при сдвиге 1,5 мс на амплитудном спектре наибольшие искажения наблюдаются в области высоких частот.

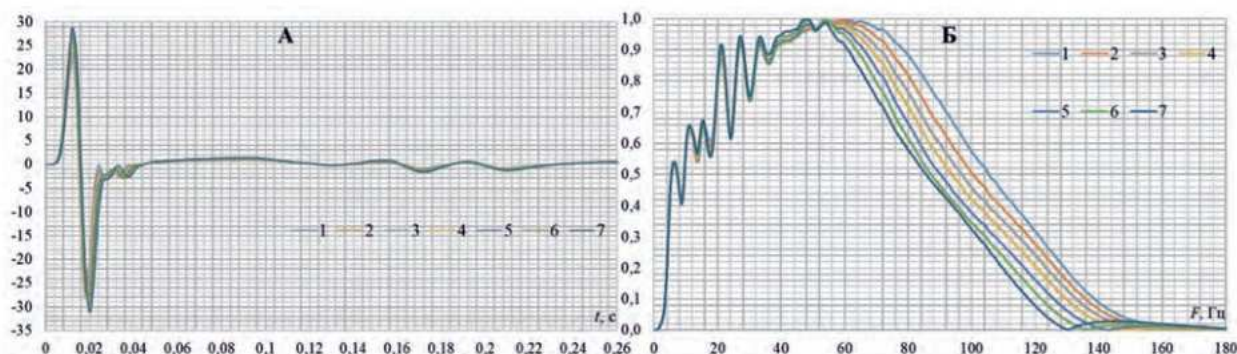
Комплексное влияние параметров

В реальных проектах все параметры, искажающие сигнал, могут действовать одновременно. Например, при изменении гидрологической обстановки может поменяться как заглубление пневмоисточника и сейсмокосы, так и расстояние между линиями ПИ, возможны скачки давлений и рассинхронизация. Для комплексного анализа влияния всех характеристик были смоделированы ситуации, когда происходит одновременное изменение разных параметров (Таблица 9). Для каждого из вариантов были рассчитаны сигнатуры и проведено их сравнение. На рисунке 10 представлены модельные сигнатуры для случая отсутствия волны-спутника со стороны приёмника.

Варианты 2-6 описывают ситуацию, когда все изменения проектных параметров варьируются в пределах допусков из ГТЗ, базовое значение вариант 4. Случаи 1 и 7 описывают ситуацию, когда измене-

▼ Табл. 9. Исходные данные для комплексного анализа изменений.

Параметры / Варианты сигнатур	1	2	3	4	5	6	7
Глубина ПИ, м	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Давление, psi	1800	1900	1950	2000	2050	2100	2200
Сепарация ПИ, м	7,5	8,75	9,5	10	10,5	11,25	12,5
Синхронизация, мс	0,6	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,6



▲ Рис. 10. Сигнатуры при комплексном влиянии разных факторов и амплитудно-частотные спектры.

ния выходят за пределы допустимых критериев. В таблице 10 представлено сравнение относительно базового значения и оценено изменение в пределах допусков.

При комплексном рассмотрении влияния изменений некоторых параметров можно сделать выводы, что пиковая амплитуда P1 и параметр P/B меняются в пределах допусков 10% и 15% соответственно, при этом ФВК при граничных условиях допусков уже не соответствует требованиям ГТЗ. При совместном влиянии всех искажающих сигнал факторов степень искажения намного выше, чем при их влиянии поодиночке.

Заключение

С учетом особенностей технологии выполнения морских сейсморазведочных работ невозможно добиться идеального положения системы наблюдений, фиксированной на проектных значениях.

За счет влияния как технических, так и гидрологических условий всегда при морских работах не будет идентичных характеристик возбуждения и регистрации сейсмического сигнала. То есть к данным морской сейсморазведки необходимо также применять поверхностно-согласованные процедуры обработки для стабилизации сигнала за пункт возбуждения и приема. Особенно детально подходить к процедурам deghosting, debubbling и подавления кратных волн с учетом изменения формы сигнала и возможных задержек.

Моделирование характеристик морских пневмоисточников и оценка вариантов их изменений в результате технологических или гидрологических изменений является важным элементом планирования работ и выработки корректных параметров полевого контроля качества.

Выполненный в работе детальный анализ изменения некоторых парамет-

▼ Табл. 10. Отклонение параметров при комплексном влиянии разных факторов.

Номер	P1, %	P/B, %	ВКФ 0-0,25 с	ВКФ 0-0,05с	ВКФ 0,05-0,25с
1	12,3	-19,6	0,9904	0,9904	0,9926
2	6,1	-11,6	0,9948	0,9948	1,000
3	2,7	-5,3	0,9989	0,9989	0,9997
4	0	0	1	1	1
5	-3,4	7,1	0,9874	0,9871	0,9997
6	-5,7	8,9	0,9510	0,9500	0,9992
7	-10,3	13,3	0,9133	0,9114	0,9938

ров контроля качества позволяет понять, как те или иные параметры и отклонения влияют на сейсмический сигнал, продумать в каком случае мы можем компенсировать эти отклонения на этапе обработки и тем самым оптимизировать дорогостоящие полевые морские работы без существенного влияния на решение геологических задач.

С учетом проделанного анализа можно сделать выводы, что некоторые указанные в ГТЗ параметры неоптимальны и по-разному влияют на характеристики возбуждаемого и регистрируемого сигнала. Рекомендуется перед каждым полевым сейсмическим проектом проводить комплекс аналитических оценок характеристик предлагаемых источников, стабильности работы оборудования по опыту предыдущих проектов этого судна, оценивать особенности гидрологической обстановки и на основании этого корректировать параметры и допуски в ГТЗ.

В данной работе проанализированы не все варианты возможного изменения характеристик сигнала, работа продолжается в направлении анализа «азимутальности» источника и регистрации данных, а также проработки алгоритмов обработки по корректному учету отклонений на уровне камеральных работ.

Литература

1. Горбачев С.В. Планирование уровневой системы контроля качества полевых сейсморазведочных работ на шельфе для повышения эффективности проектов // Приборы и системы разведочной геофизики, Саратов, № 3 (78), 2023, с 6-14.
2. Горбачев С.В., Титов А.Б., Обметко В.В., Рейдик Ю.В. Особенности планирования и выполнения 3D сейсморазведочного проекта в условиях предельного мелководья шельфа Печорского моря // Нефтяное хозяйство, №06, 2021.
3. Гуленко В.И. Пневматические источники упругих волн для морской сейсморазведки. Краснодар, 2003.
4. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Потенциальная эффективность группирования источников в морской сейсморазведке // Прикладная геофизика. Вып. 82. М.: Недра, 1976.
5. Лопаткина Э.В. Горбачев С.В., Титов А.Б., Анализ и выбор оптимальных допусков работы пневмоисточника при морских сейсморазведочных работах с буксируемым оборудованием // Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2024», Москва, 12-14 марта 2024.
6. Титов А.Б., Горбачев С.В. Элементы контроля качества морских сейсморазведочных работ с буксируемым оборудованием // Приборы и системы разведочной геофизики, Саратов, № 1 (555), 2016, с 32-34.
7. Dragoset W. H., Hargreaves N., Larner K. Air Gun Source Instabilities and Shot-by-Shot Signature Deconvolution, Geophysics, 2003.
8. Dundurur D., Acquisition and Processing of Marine Seismic Data //— Amsterdam: Elsevier, 2018. — 598 с.
9. Hopperstad J.F., Laws R. Source Signature Estimation - Attenuation of the Seafloor Reflection Error in Shallow Water, 2006.
10. Parkes G., Hatton L. The Marine Seismic Source // — Dordrecht: Springer Science + Business Media, 1986. — 114 с.