

ЛОКАЛЬНЫЕ АНОМАЛЬНЫЕ ЗОНЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В МЕЛКОМ МОРЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2021 г. Г. Н. Кузнецов^{а, *}, И. В. Семенова^{б,}, А. Н. Степанов^{а, б}

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

^бСамарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское ш. 34, Самара, 443086 Россия

*e-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2021 г.

После доработки 18.06.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Экспериментально и теоретически исследуется интерференционная структура низкочастотных пространственных амплитудных и фазовых характеристик скалярного поля и трех проекций вектора колебательной скорости, образованных тональными сигналами от буксируемых ненаправленных акустических источников в зонах вблизи интерференционных максимумов и минимумов звукового давления. Экспериментальные зависимости этих характеристик поля от расстояния, полученные на четырехкомпонентных векторно-скалярных приемниках при буксировке излучателей, сравниваются с расчетными в рамках модели Пекериса и модели волновода с трехслойным грунтом, параметры которых рассчитаны на основе акустической калибровки района работ. Установлено удовлетворительное согласие амплитудных и фазовых характеристик поля, рассчитанных на основе акустической калибровки и измеренных экспериментально. Показано, что в зонах максимумов наблюдается медленное изменение угла прихода, градиенты фазы “гладкие”, а в зонах минимума формируются резкие скачки амплитуд и фаз в горизонтальной и вертикальной плоскостях, приводящие при глубоких минимумах к образованию циркуляций — локальных вихрей вокруг полюсов. Выполнен численный анализ тонкой структуры звукового давления и проекций колебательной скорости в зоне акустического вихря, а также вычислены годографы колебательной скорости и градиентов фазы звукового давления, подтверждающие формирование в зоне полюсов вихрей в вертикальной плоскости.

Ключевые слова: мелкое море, интерференция, векторно-скалярные приемники, градиенты фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, углы прихода сигнала, полюса, седловины, акустические вихри, годографы, расчеты и эксперимент

DOI: 10.31857/S0320791921060046

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение векторно-скалярных приемников и антенн позволяет вскрыть тонкую трехмерную амплитудно-фазовую структуру звуковых полей и исследовать звуковые давления и потоки энергии в зонах интерференционных максимумов (ИМА) и в окрестности особых точек, в которых звуковое давление стремится к нулю. Эта возможность является следствием малых размеров приемника по сравнению с длиной волны и размерами самих аномальных зон. Используя векторно-скалярные приемники (ВСП), на основе анализа пространственно-частотных характеристик линий тока энергии можно выявить точки с сингулярностью фазы, в которых в зоне глубокого интерференционного минимума (ИМИ) (в пределе — нуля амплитуды звукового давления) образуются полюса (“дислокации”) и “завихренности”, а

в зоне равенства нулю градиента фазы или скачка разности фаз между звуковым давлением (ЗД) и вектором колебательной скорости (ВКС), кратном $\pi/2$, можно обнаружить и исследовать “седловые” точки фазового фронта. Некоторые “пионерские” результаты аналитического и численного решения этой задачи в мелком море при сечении поля в горизонтальной плоскости представлены в [1–3]. В [4] аналогичные закономерности обнаружены и исследованы при сечении поля в вертикальной плоскости.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ приведены в [3, 5–8]. В частности, в этих работах отмечается, что свойства звуковых полей в зонах ИМИ чувствительны к вариации характеристик волновода, например его глубины. Выполнено исследование интерференционной амплитудной и фазовой структуры ЗД и проекций

ВКС при буксировке низкочастотных тональных излучателей. Произведено достаточно интересное сравнение градиентов фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях с общетеоретическими представлениями о векторной структуре гидроакустических полей, в том числе — анализ вихревой структуры, но только для свободного пространства [6, 7]. В связи с этим необходимо выполнить сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования поля в многомодовом волноводе. Для сравнения будем использовать две модели передаточной функции волновода, построенные для этого же района работ на основе акустической калибровки параметров модели грунта. Смысл калибровки состоит в том, что в контролируемых условиях на основе решения обратной задачи — при известных геометрии антенны и трассе движения источника, а также профиле скорости звука, выполняется подбор параметров грунта, но в рамках принятых моделей волновода. Первая модель — известная модель Пекериса, когда реальный волновод заменяется однородным жидким слоем, лежащим на жидком полупространстве. Вторая модель более сложная и представляет собой слой воды, два жидких слоя грунта и упругое полупространство. Далее полученные в результате калибровки заданного района параметры грунта используются для построения модели передаточной функции волновода и расчета интересующих характеристик, что позволяет сравнить расчетные и экспериментальные векторно-скалярные характеристики сигналов. Для скалярных полей такая задача неоднократно и успешно решалась, например, в [9–11]. Решения в такой постановке для векторно-скалярных полей авторам не известны.

Ниже для решения поставленных задач экспериментально и расчетным путем изучается пространственная амплитудно-фазовая структура векторно-скалярного поля сигналов от тональных излучателей, буксируемых в мелком море по прямолинейным галсам. При этом результаты анализа экспериментальных данных сравниваются с характеристиками векторно-скалярных полей, рассчитанными с использованием модовых моделей волновода, построенных на основе акустической калибровки района работ.

Проведен также детальный расчетно-теоретический анализ вертикально-горизонтальной структуры поля ЗД и ортогональных проекций ВКС в зоне глубокого интерференционного минимума (вероятной зоне дислокации). Для этой зоны волновода с предельными характеристиками выполнено исследование тонкой структуры ЗД и вихревых компонент ВКС и градиента фазы ЗД [5–8]. Рассчитана идеализированная интерференционная структура поля ЗД с выделением зон дислокаций и седел, получены годографы ко-

лебательной скорости и градиента фазы ЗД, подтверждающие формирование вихрей в зоне полюсов, предсказанных в [1, 2, 4].

Делается вывод о целесообразности дальнейших исследований и анализа пространственно-частотных характеристик поля в зонах ИМА с использованием ВСП.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении экспериментов прием сигналов осуществлялся на разнесенные в пространстве низкочастотные четырехкомпонентные ВСП, включающие один скалярный и три ортогональных векторных приемника инерциального типа (рис. 1а, позиция А). ВСП размещались внутри рамы, вокруг которой крепился звукопрозрачный обтекатель, образующий застойную зону (рис. 1б, позиция Б). Приемники ориентировались с использованием плавучестей в положении оси Z , близком к вертикальному (рис. 1б, позиция В). Низкочастотные ВСП располагались на глубине около 1 м от дна. Приподнятый приемный модуль устанавливался на глубине 33 м. Глубина моря в районе работ по данным эхолота 53 м. Отметим, что приемники в пространстве практически не перемещались, и их ориентация после морской постановки была стабильной, но периодически уточнялась по импульсным акустическим сигналам с одновременной оценкой координат излучателя с применением спутниковой системы навигации GPS. Эксперименты проводились при буксировке на глубине 24 м со скоростью 1.67 м/с трех размещенных на одной раме излучателей, излучающих тональные сигналы на частотах 117, 320 и 650 Гц (рис. 1в). Общая апертура донной антенны — 100 м (рис. 2а).

Глубина буксировки выбиралась из предположения, что при вероятных свойствах грунта упрощается модовая структура — амплитуды четных мод будут минимальными. Анализ модовой структуры показал, что грунт был жестким и волновые спектры оказались многомодовыми — для построения модели Пекериса на частоте 117 Гц использовались 7–9 мод, для трехслойной модели — до 11 мод. На частоте 320 Гц в рамках модели Пекериса формировались 15–18 мод, для трехслойной модели — до 24 мод. Такое большое количество четных и нечетных мод приводит к сравнительно “гладкому” спадаанию амплитуд ЗД в зонах ИМА и умеренным значениям ИМИ. Отметим также, что в каждой группе моды с номерами больше 3 имеют маленькую амплитуду и половина из них или больше — “вытекающие” моды, быстро затухающие уже на малых расстояниях.

Буксировка излучателей производилась по прямолинейным галсам относительно приемных

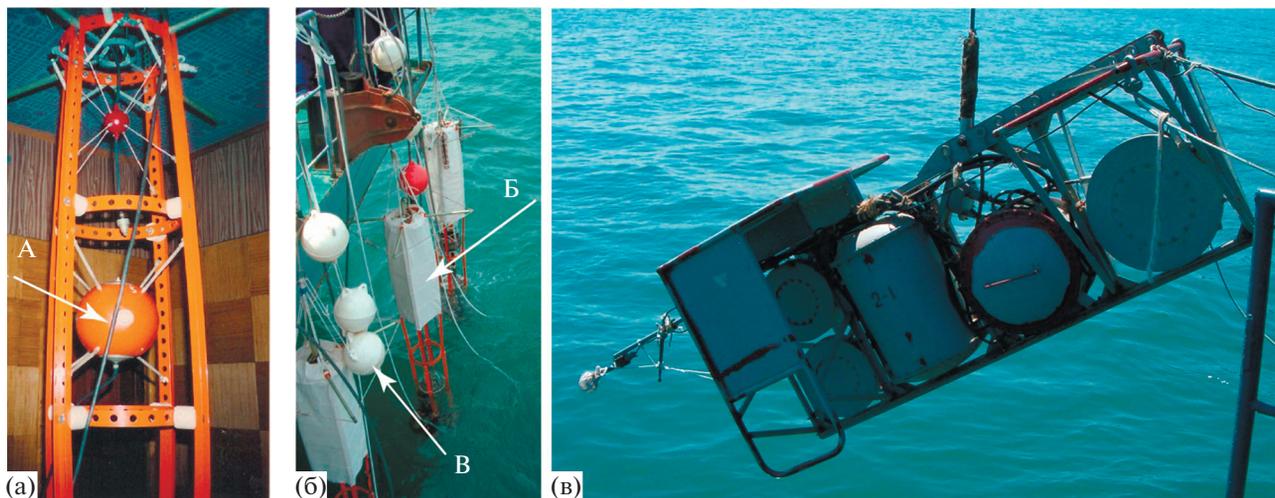


Рис. 1. (а) – Рама с низкочастотным (10–1200 Гц) и высокочастотным векторно-скалярными приемниками (1–10 кГц). (б) – Рама с ВСП у борта судна, подготовленные к морской постановке; А – низкочастотный приемник, Б – обтекатель, В – плавучести. (в) – Буксируемый излучающий комплекс с излучателями и комплектом аппаратуры.

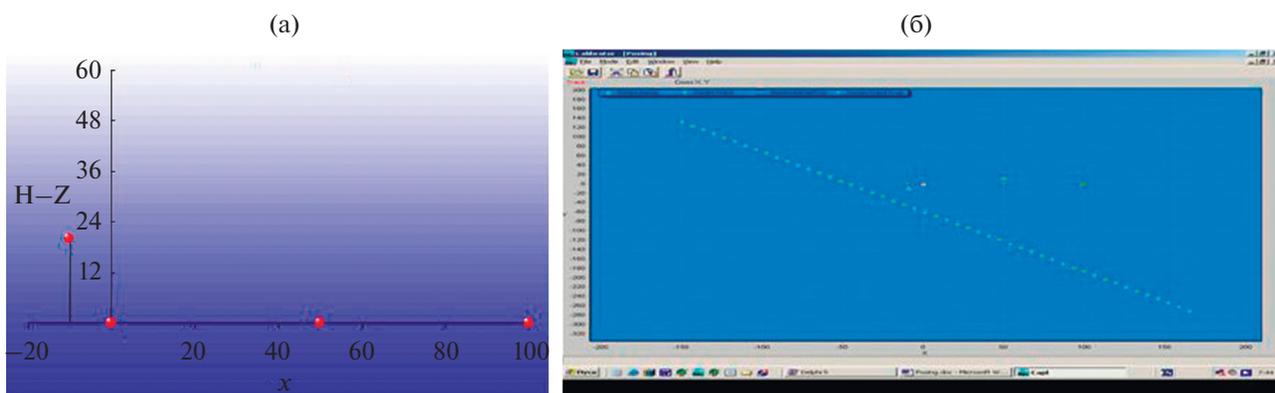


Рис. 2. (а) – Схема размещения ВСП в вертикальной плоскости и (б) – участок траектории буксировки излучателя относительно разнесенных приемных модулей (четыре точки).

модулей, схема расположения которых представлена на рис. 2а. Ближайший к антенне участок траектории буксировки излучателя, зарегистрированный в реальном времени на фотографии с экрана компьютера, изображен на рис. 2б. Протяженность представленного на этом рисунке участка траектории буксировки излучателей ± 250 м, траверсное расстояние до ближайшего донного приемника 25–30 м. Протяженность представленной на рис. 2 донной антенны 100 м. Приемники расположены справа от траектории движения. Координаты судна-буксировщика регистрировались с использованием GPS. Выбранная для обработки сигналов общая длина участка трассы 2000 м. Момент траверса обозначен цифрой “0” (рис. 3). Поскольку перед экспериментами была выполнена акустическая калибровка не только волновода, но и антенны, в частности, рассчита-

ны географические координаты приемных элементов, то координаты приемной системы и координаты судна-буксировщика и излучателей удастся представить на одном графике. Как следствие, рассчитываются координаты излучателя относительно приемных модулей. Результаты обработки звуковых сигналов на одном из прямолинейных галсов приведены далее на рис. 3.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 для частот 117 и 320 Гц представлены полученные синхронно в системе единого времени интерференционные зависимости от расстояния звукового давления P , вертикальной Z -компоненты ВКС, разности фаз между ЗД и Z -компонентой ($\Delta\phi_{P/Z}$), интегральный набег разности фаз

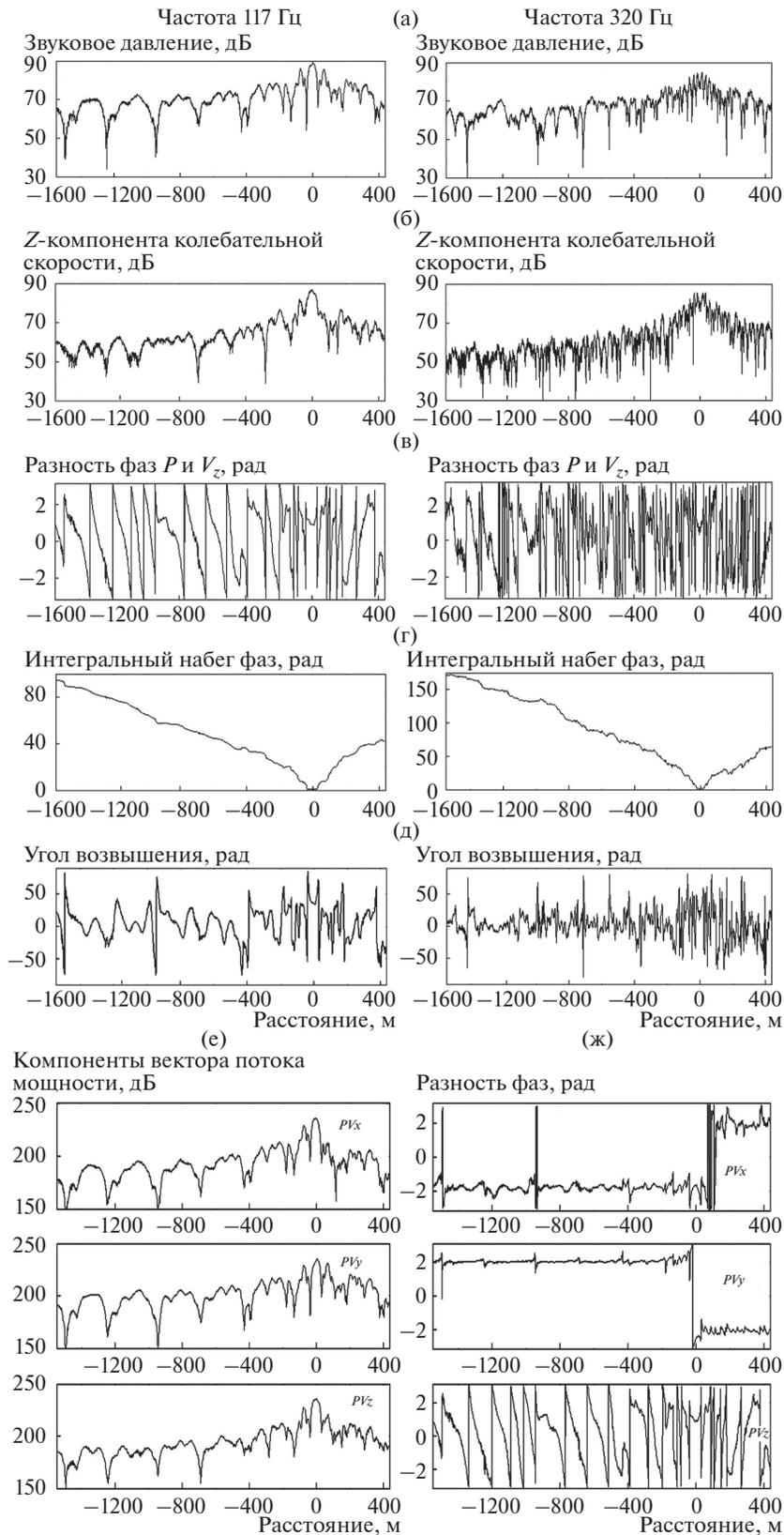


Рис. 3. Экспериментальные данные для частот 117 (слева) и 320 Гц (справа): (а) – амплитуда ЗД; (б) – Z -компонента колебательной скорости; (в) – локальная и (г) – интегральная разности фаз между звуковым давлением и Z -компонентой; (д) – угол возвышения вектора колебательной скорости в вертикальной плоскости. Зависимости от расстояния амплитуды ЗД и разности фаз трех ортогональных составляющих вектора потока мощности ((е) и (ж) соответственно, частота 117 Гц).

между ЗД и вертикальной составляющей ВКС ($\Delta\Phi_{P_{V_z}}$), а также угол прихода в вертикальной плоскости эквивалентной плоской волны (угол возвышения). Этот угол рассчитывался с использованием формулы: $\theta = \arctan(\langle P^*V_z \rangle / [\langle P^*V_x \rangle^2 + \langle P^*V_y \rangle^2]^{1/2})$, где звездочка — знак комплексного сопряжения. Результаты анализа интерференции горизонтальных проекций ВКС (V_x и V_y) здесь не приводятся, поскольку они до деталей совпадают с зависимостями от расстояния интерференционных кривых ЗД. Это подтверждается подобием кривых прохода (рис. 3е, 3ж), построенных по горизонтальным проекциям. На этих рисунках (рис. 3ж) представлены зависимости от расстояния разности фаз между звуковым давлением и тремя проекциями вектора колебательной скорости V_x , V_y и V_z . Хорошо видно, что в горизонтальной плоскости при проходе зон с минимумом чувствительности V_x и V_y наблюдаются скачки фазы на 180° , а также знакопеременные скачки фазы при проходе участков с глубокими ИМИ (расстояния 950 и 1520 м). Аналогичные отклонения можно видеть и при анализе разности фаз между давлением и вертикальной проекцией V_z .

Не приводятся и результаты для частоты 650 Гц, так как качественно они иллюстрируют такие же зависимости, как и для более низких частот. Но при росте частоты из-за увеличения числа нормальных волн в пространственной области формируется существенно более изрезанная структура, что затрудняет интерпретацию результатов.

На рис. 3а, 3б видно, что в ближней зоне на расстояниях до полутора глубин моря согласно лучевому приближению наблюдается подобие зависимостей от расстояния ЗД и вертикальной проекции ВКС. После формирования нормальных волн интерференционные структуры поля ЗД и горизонтальных проекций ВКС заметно отличаются от зависимостей для вертикальной проекции ВКС. Эти зависимости различаются, поскольку вертикальный векторный приемник подавляет моды первых номеров и подчеркивает моды высоких номеров, а горизонтальный приемник действует наоборот. Таким образом, на выходе этих приемников суммируются различающиеся группы мод. Это приводит, в частности, к различию протяженности зон ИМА и относительному смещению зон минимумов ЗД и вертикальной проекции ВКС, а также зон скачков фазы для этих двух групп сигналов вблизи зон ИМИ звукового давления. Как следствие, между ЗД и вертикальной проекцией ВКС наблюдаются резкие скачки градиентов фазы. Различаются и кривые прохода, особенно в зонах ИМИ.

Отметим также, что амплитуды вертикальной проекции ВКС убывают при увеличении расстояния быстрее, чем ЗД и горизонтальных проекций ВКС. Например, на частоте 117 Гц на интервале

расстояний 1600 м ЗД ослабляется на 22 дБ, а вертикальная проекция ВКС — на 28 дБ. На частоте 320 Гц эти же величины имеют, соответственно, значения 19 и 27 дБ. Причина состоит в том, что вертикальная проекция ВКС формируется модами высоких номеров, которые при увеличении расстояния затухают быстрее, чем моды первых номеров. Этот вывод хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования, представленными в [12, 13].

Анализ зависимостей от расстояния локальных значений разностей фаз показывает, что вблизи ИМИ градиенты фазы быстро возрастают и становятся неопределенными (непредсказуемыми). Причем, чем глубже минимум зависимости $P(r(t))$, тем больше величина скачка разности фаз. Из теории следует [1, 2, 4], что в зависимости от расстояния горизонтального или вертикального сечения поля от расположенных на определенных глубинах дислокаций (полюсов) возможны односторонние скачки разности фаз на величину до π радиан. Но поскольку сечение на глубине буксировки 24 м непосредственно не пересекает горизонт расположения дислокаций, то скачков фаз, равных $\pm\pi$, не наблюдается. Можно отметить, что на расстояниях 400, 950 и 1550 м (частота 117 Гц) и расстояниях 350, 700 и 1450 м (частота 320 Гц) скачки фаз вертикальной проекции ВКС приводят к вариации углов прихода $\pm(75^\circ-80^\circ)$. Но глубокие минимумы отсутствуют — это объясняется тем, что поле формируется модами как с четными, так и с нечетными номерами, пространственные периоды интерференции которых не совпадают. Но при увеличении дистанции и вырождении мод высоких номеров глубина ИМИ может увеличиваться, если сигнал мощный, а волновод регулярный. В нерегулярном стохастическом волноводе моды должны терять когерентность, и минимумы в значительной степени будут “замазываться”.

Из теории также следует, что при сечении непосредственно зоны дислокации (глубокого минимума), т.е. при проходе “дислокации” должен наблюдаться полный поворот направления потока мощности и изменение фазы на 2π [1–4]. Одновременно проявляются и отклонения от линейной зависимости интегральной фазы $\Delta\Phi_{P_{V_z}}$ — при обходе особой точки (дислокации) фаза изменяется на величину $+2\pi$ или -2π (рис. 3в, 3ж) — в зависимости от типа полюсов [1, 2, 4]. В эксперименте к этим значениям “скачки фаз” могут только стремиться, поскольку даже в зонах, в которых величины P , $|V_x|$, $|V_y|$, $|V_z|$ стремятся к минимальному значению, “глубина” ИМИ незначительная. Но все же наблюдаются одновременные скачки фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, которые имеют различные градиен-

ты и знаки. Следовательно, полюса могут находиться на достаточно близком расстоянии.

Отметим, что в отдельных зонах градиент фазы непрерывен и при смене знака фазы проходит через нуль. В этих точках образуются “седла” (рис. 3 и 4).

Важно, что зоны с глубокими интерференционными минимумами разделяют зоны, в которых формируются ярко выраженные ИМА. В этих зонах формируются более важные для решения практических задач протяженные зоны с повышенным отношением сигнал/помеха, гладкими градиентами фазы, медленным изменением направления прихода сигнала в вертикальной плоскости и, соответственно, более медленным изменением угла возвышения (см. рис. 3 и 4). Поэтому в этих зонах длительное время звуковая энергия приходит в точку приема под постоянным углом приема, что позволяет ее эффективно накапливать для увеличения отношения сигнал/помеха. При размещении антенны в зонах ИМА и учете реального распределения на апертуре антенны градиентов фазы и амплитуд звукового давления формируются характеристики направленности с несмещенными оценками пеленга [14]. Эти выводы далее дополнительно обосновываются. Отметим еще раз, что в районе работ была предварительно выполнена акустическая калибровка, на основании которой было построено несколько моделей грунта и передаточных функций волновода, в частности, применительно к волноводу Пекериса и волноводу с трехслойным грунтом. Покажем, что применение адекватных моделей позволяет получить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных характеристик не только для скалярных, но и для векторно-фазовых характеристик поля. Использование также модовых моделей, но с другими параметрами грунта, не позволяет получить при сравнении экспериментальных и расчетных зависимостей даже приближающиеся друг к другу результаты.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПОЛЯ В ВОЛНОВОДЕ

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования векторно-скалярных характеристик звукового поля в волноводе. Анализ выполнен для волновода с эквивалентными параметрами грунта, рассчитанными для частот 117 и 320 Гц и моделей грунта, разработанных на основе экспериментальной акустической калибровки [9–11].

На рис. 4, 5 представлены кривые, рассчитанные при прямолинейном проходе источника мимо неподвижного векторно-скалярного приемника при следующих условиях: глубина водного слоя $h = 53$ м, скорость звука в воде $c_0 = 1470$ м/с,

глубина источника $z_s = 24$ м, глубина приемника $z_r = 33$ м, длина участка прямолинейного галса источника до траверза — 1600 м, длина участка после траверза — 400 м, траверсное расстояние до ближайшего ВСП $r_t = 40$ м. По горизонтальной оси отложено расстояние от движущегося источника до точки траверза. Расчеты выполнены для двух моделей с параметрами: для однослойной модели Пекериса: $\rho = 1.5$ г/см³, $c = 1650$ м/с, $\alpha = \text{Im } c/\text{Re } c = 0.008$; для трехслойной модели грунта: слой грунта 1: $\Delta h = 2$ м, $\rho = 1.5$ г/см³, $c = 1608$ м/с, $\alpha = \text{Im } c/\text{Re } c = 0.008$; слой грунта 2: $\Delta h = 150$ м, $\rho = 2.0$ г/см³, $c = 1694$ м/с, $\alpha = 0.008$; однородное полупространство 3: $\rho = 2.5$ г/см³, $c = 2890$ м/с, $\alpha = 0.008$, $c_t = 448$, $\alpha_t = 0.012$. На рис. 4, как и на рис. 3, для частот 117 и 320 Гц (слева и справа) приведены зависимости от расстояния амплитуды ЗД (рис. 4а1, 4а2) и Z -компоненты ВКС (рис. 4б1, 4б2), локальные разности фаз звукового давления и Z -компоненты колебательной скорости в пределах от $-\pi$ до $+\pi$ (рис. 4в1, 4в2), а также интегральный набег разности фаз звукового давления и Z -компоненты колебательной скорости (рис. 4г1, 4г2). На рис. 4 графики 4а2–4г2 соответствуют трехслойной модели грунта, а графики 4а1–4г1 — модели Пекериса.

На рис. 5 также для частот 117 и 320 Гц приведены: (а) локальная разность фаз $\arg(PV_x)$ между P и V_x [рад.]; (б) локальная разность фаз $\arg(PV_y)$ между P и V_y [рад.]; (в) $1 - \varphi'_x$ горизонтальная и $2 - \varphi'_z$ вертикальная проекции градиента фазы ЗД; (г) $3 -$ эффективная фазовая скорость, рассчитанная как средневзвешенная фазовая скорость мод, $4 -$ эффективная фазовая скорость, рассчитанная с использованием градиентов фазы в зонах ИМА [14, 15], (д) угол возвышения (угол прихода эквивалентной плоской волны) относительно горизонтальной плоскости [град.]; (е) пеленг на движущийся источник [град.].

Из сравнения рис. 3–5 следует: экспериментальные и расчетные зависимости P и V_z в основном хорошо согласуются между собой как по интерференционным кривым и локальным значениям градиентов фазы, так и по наибольшему набегу интегральной фазы и по средним законам спада амплитуд ЗД и вертикальной проекции ВКС. Набеги интегральной фазы $\Delta\Phi_{PV_z}(r(t))$ и расстояния, при которых фиксируются моменты пересечения зон с минимумом чувствительностей V_x и V_y (оси диполей), практически совпадают. Наблюдается согласие моментов прохода траверзного расстояния, на котором разность фаз $\Delta\Phi_{PV_z}$ минимальна, $\arg|PV_z| \rightarrow \min$. Расчетные зоны смены знака пеленга на источник и экспериментальные значения этих характеристик также совпадают. Зоны скачков фазы при проходе глубин с минимальными значениями V_x и V_y близки,

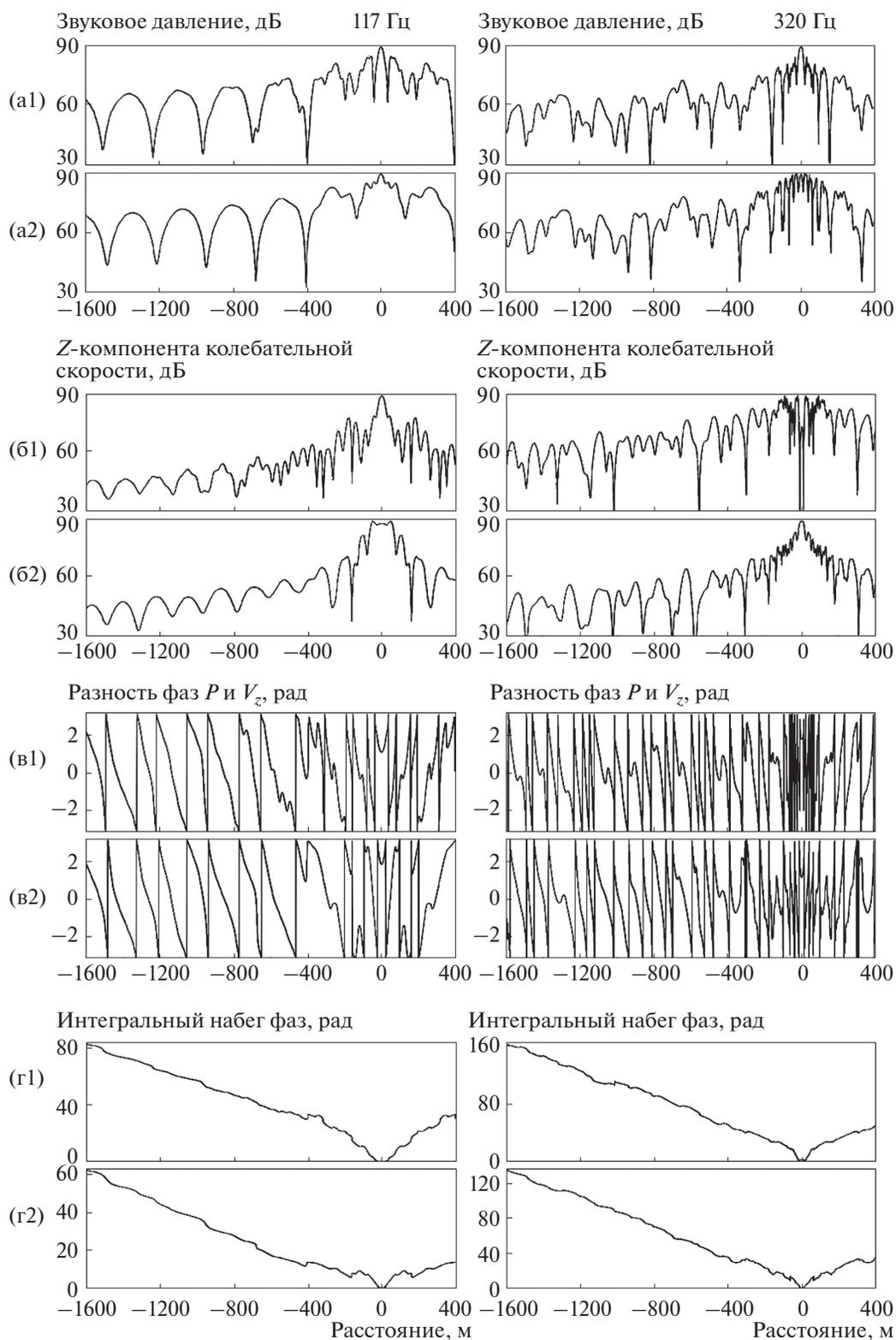


Рис. 4. (а–г) – Рассчитанные для модели Пекериса (а2–г2) и трехслойного грунта (а1–г1) зависимости (а) – ЗД от расстояния для частот 117 и 320 Гц, (б) – Z -компоненты колебательной скорости и (в) – локальной и (г) – интегральной разности фаз между звуковым давлением и Z -компонентой.

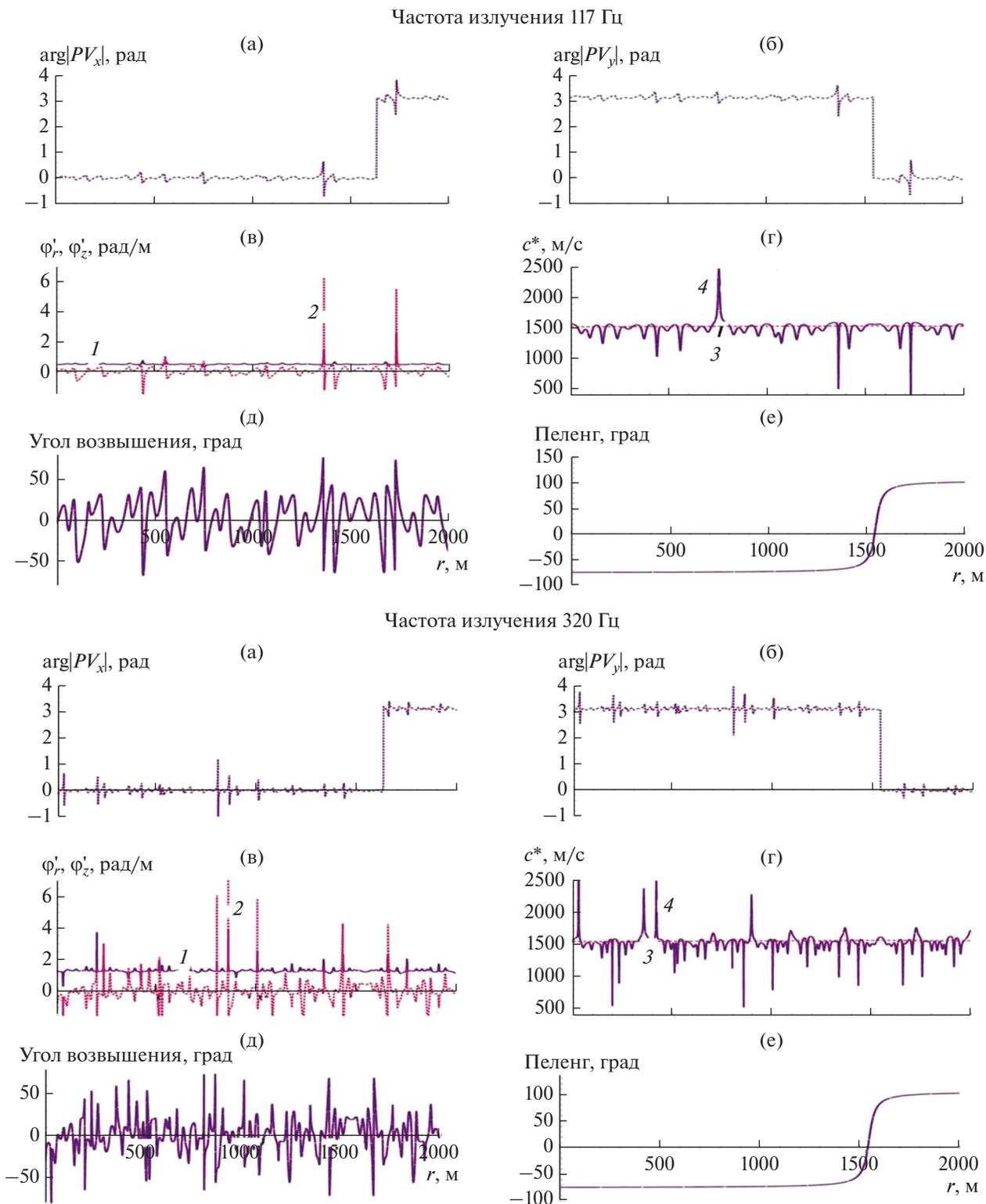


Рис. 5. Представлены результаты расчетов для волновода Пекериса с эквивалентными характеристиками грунта: (а, б) – локальная разность фаз между 3Д и горизонтальными проекциями ВКС, (в) 1 – горизонтальная и 2 – вертикальная проекции градиента фазы 3Д, (г) 3 – эффективная фазовая скорость, рассчитанная как средневзвешенная фазовая скорость мод, 4 – эффективная фазовая скорость, рассчитанная с использованием градиентов фазы в зонах ИМА, (д) – угол возвышения относительно горизонтальной плоскости, (е) – пеленг на движущийся источник. Сверху для частоты 117 Гц, внизу – для 320 Гц.

например, поворот градиента фазы на расстоянии 400 м (частота 117 Гц), но совпадают не всегда. Более сложная и более адекватная модель с трехслойным грунтом лучше согласуется с экспериментальными данными, чем модель Пекериса. Особенно это различие заметно в зоне траверза. Причина — при расчетах с использованием упрощенной модели Пекериса на малых расстояниях не учитывалась боковая волна, а использовалась только дискретная модель захваченных мод [9, 10]. Некоторое различие интерференционных зависимостей — экспериментальных и расчетных — можно объяснить также погрешностями оценки текущего расстояния между приемниками и буксируемым излучателем. Это подтверждается увеличением указанного различия кривых прохода при использовании высоких частот излучения по сравнению с низкочастотными сигналами.

Следует, однако, отметить, что интерференционные структуры вертикальной проекции ВКС, рассчитанные по двум моделям, заметно хуже согласуются с экспериментальными кривыми, чем для ЗД. Отсюда следует, что моды высоких номеров оценивались при акустической калибровке с большей погрешностью, чем моды первых номеров.

На рис. 5 приведены также для 117 и 320 Гц зависимости пеленга от расстояния, а также результаты расчетов градиента фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Эти данные используются в следующем разделе в качестве основы для построения годографа градиентов фазы. Видно, что на двух частотах оценки пеленга и зоны прохода траверсной точки практически совпадают. Производные фазы в горизонтальной плоскости φ'_x в зонах ИМА достаточно устойчивые, слабо зависят от частоты и расстояния. Это позволяет выполнить оценки локальных значений градиентов фазы и эффективной фазовой скорости, которые рекомендуется использовать при формировании характеристик направленности в горизонтальной плоскости [13–15]. Средние производные фазы в вертикальной плоскости φ'_z близки к нулю, что представляется важным результатом, поскольку может использоваться вертикальными приемными или излучающими антеннами для формирования пространственных откликов.

Из сравнения экспериментальных результатов и данных моделирования с общетеоретическими представлениями можно также сделать вывод, что как на расчетных кривых, так и в эксперименте наблюдается небольшое количество глубоких минимумов — в отличие от данных, приведенных в [9], где на низкой частоте 48 Гц интерференция определялась интерференцией нечетных мод. На более высоких частотах в многомодовом волноводе синфазное сложение всех нормальных волн невозможно в принципе — из-за некратности пе-

риодов интерференции нормальных волн с четными и нечетными номерами. Например, в [16] показано, что, пространственный масштаб зоны интерференционного максимума для первой и третьей мод $\Lambda_{1,3} \approx H^2/\lambda$, а для первой и второй мод $\Lambda_{1,2} \approx 8H^2/3\lambda$, где $\lambda = 2\pi/k$, k — горизонтальная проекция волнового числа, H — эквивалентная глубина волновода с двумя идеальными границами [17]. Таким образом, зоны ИМА, образованные модами с разными номерами, действительно не кратные.

5. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВБЛИЗИ ДИСЛОКАЦИЙ

Рассмотрим вначале укрупненные представления о пространственной структуре поля ЗД с выделением зон полюсов и седловин (рис. 6а). По осям на трехмерном рис. 6а отложено: расстояние от 4.5 до 5.5 км, глубина излучателя от 0 до 100 м и амплитуда ЗД [дБ]. Для упрощения анализа модовой и интерференционной структуры расчеты выполнены на низкой частоте 25 Гц при глубине волновода 100 м, когда в волноводе образуются всего две нормальные волны. Приемник располагается на дне, глубина излучателя изменяется от поверхности до дна, что позволяет на разных расстояниях получить сечения звукового поля в вертикальной плоскости. На рисунке глубокими впадинами обозначены зоны дислокаций, а черными точками — седловины. Видно, что дислокации локализованы на определенных горизонтах и только на них можно получить глубокие минимумы. Координаты этих зон зависят от частоты звука и, как следствие, зоны с минимальными значениями ЗД “размазываются” в частотно-пространственной области. В связи с этим, использование закономерностей завихрений для обнаружения широкополосных сигналов, по нашему мнению, не представляется возможным.

На рис. 6б представлены результаты расчета изменяющихся по пространству направлений вектора колебательной скорости, вычисленных вблизи левой нижней дислокации (рис. 6а). Для этого в окрестности этой дислокации вырезана в вертикальной плоскости площадка с размерами 10×10 м. Видно, как вдали от дислокации колеблющиеся частицы жидкости огибают зону дислокации, образуя вне этих зон горизонтально распространяющийся поток звуковой энергии. Непосредственно вблизи дислокации колебательные частицы изменяют направление на 90° и даже 180° , т.е. формируется звуковой вихрь. Эти результаты хорошо согласуются с данными на рис. 7, где представлены полученные расчетным путем зависимости от глубины и расстояния до источника амплитуды и локальной фазы звукового давления, а также значений горизонтальных и вертикальной

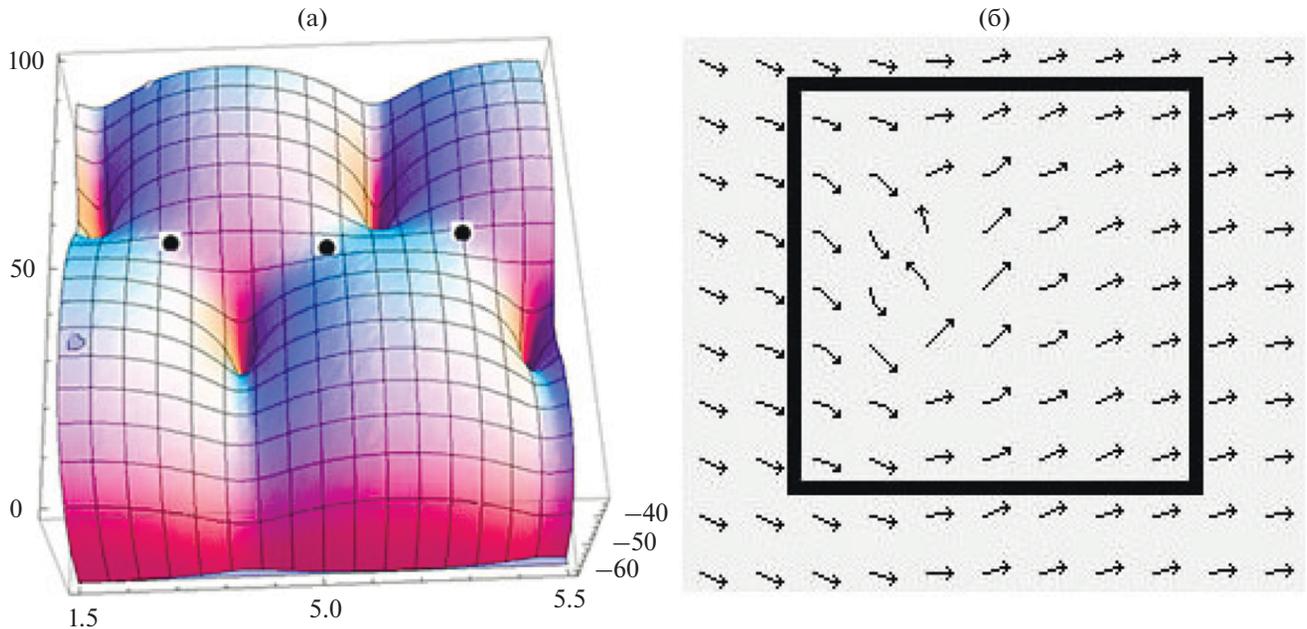


Рис. 6. (а) – Распределение в вертикально-горизонтальной плоскости амплитуды ЗД в зависимости от глубины и расстояния до источника. (б) – Распределение в пространстве векторов колебательных скоростей вблизи дислокации.

проекций ВКС и градиента фазы. На рис. 7 также рассматривается вертикальное сечение поля от свободной поверхности до дна, включающее участки с интерференционными максимумами и минимумами. Рассчитаны годографы вектора колебательной скорости и вектора градиента фазы. Расчеты выполнены в волноводе Пекериса со следующими характеристиками: толщина 100 м, скорость звука в воде $c_0 = 1450$ м/с, параметры грунта: отношение плотностей грунта и воды $m = 1.8$ и отношение скоростей звука в воде и в грунте $n = 0.725$; коэффициент поглощения 0.02. Для получения более рельефной структуры выполнены расчеты для сравнительно низкой частоты 25 Гц. Глубина приемника 100 м, глубина излучателя изменяется в пределах от нуля до глубины волновода, расстояние до приемника 20 км.

Из совместного анализа рис. 3–7 также следует:

– В зонах ИМА звукового давления градиенты фазы в горизонтальной плоскости стремятся к постоянной величине, а в зоне глубокого минимума при изменении глубины излучателя всего на несколько метров величина фазы скачкообразно изменяется на 180° (см. рис. 7, кривая 4). В вертикальной плоскости градиенты фазы в зоне ИМА практически равны нулю (кривая б), что позволяет на вертикальных антеннах когерентно суммировать сигналы, приходящие на разнесенные в пределах зоны ИМА гидрофоны.

– В зонах ИМА проекции вектора колебательной скорости (кривые 2 и 3) могут быть синфазными, а могут быть и в противофазе – в зависи-

мости от расположения приемника или излучателя относительно координат дислокаций [1, 2, 4], но в зоне глубокого минимума при глубине излучения 37.2 м (кривая 1) обе проекции, как и ЗД, стремятся к нулю. В зоне ИМА горизонтальная составляющая вектора колебательной скорости заметно превышает вертикальную составляющую. И этот результат является типичным для мелкого моря.

– Градиенты фазы в горизонтальной плоскости в зоне глубокого ИМИ резко возрастают и изменяют знак (кривая 5). При проходе зоны ИМИ градиент фазы в вертикальной плоскости дважды изменяет знак и резко увеличивается до значений $\pm\pi$ (кривая б). За пределами ИМИ эти градиенты достаточно стабильны.

– Углы возвышения (направления прихода в вертикальной плоскости) полного вектора градиента фазы (кривая 7) и направления (угла прихода) полного ВКС (кривая 8) рассчитываются по формулам: $\xi = \arctg \varphi_z / \varphi_r$, $\zeta = \arctg V_z / V_r$ [рад.]. Расчеты показывают, что в зоне первого максимума звукового давления эти углы совпадают по направлению, что свидетельствует о возможности использования в зоне максимума модели эквивалентной плоской волны [10, 11] и формирования потока мощности в горизонтальной плоскости. В зоне второго максимума после глубокого минимума направления векторов градиента фазы и колебательной скорости параллельны, но разнонаправлены. Причина в том, что вокруг точки глубокого минимума (полюса) образуется завих-

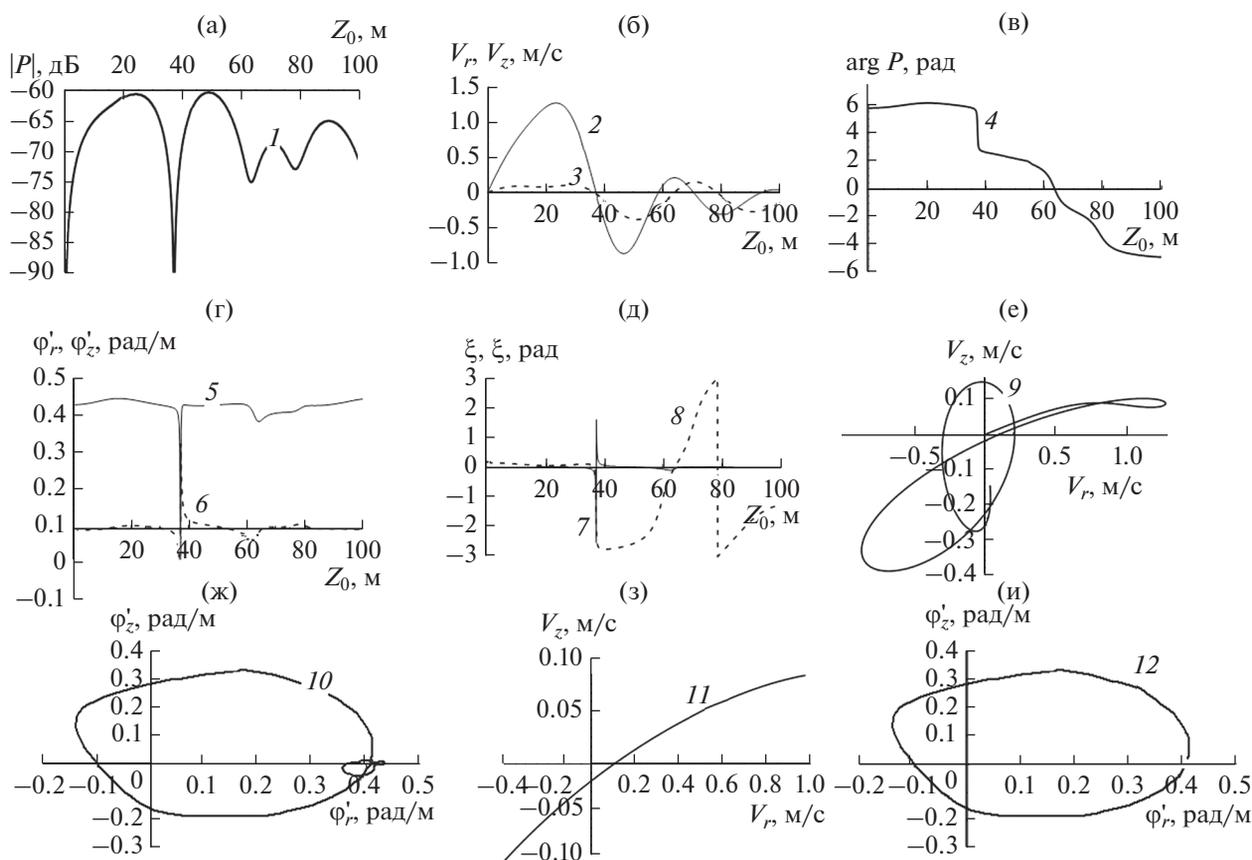


Рис. 7. Распределения по глубине волновода амплитудных и фазовых характеристик звукового давления, проекций вектора колебательной скорости и углов прихода сигналов, а также годографы вектора колебательной скорости и градиента фазы (обозначения кривых указаны в тексте).

ренность и поток мощности совершает разворот на 180° .

— Годограф векторов колебательной скорости в зоне ИМИ (кривая 9) также свидетельствует об изменении направления колебательного движения и формировании акустического вихря — циркуляции потока мощности вокруг полюса (дислокации).

— Годограф вектора градиента фазы (кривая 10) также это подтверждает. На рис. 7 обозначены по оси абсцисс горизонтальная производная ϕ'_r , по оси ординат — вертикальная ϕ'_z . Обе проекции градиента фазы формируют полный вектор градиента.

— Кривая 11 показывает годограф вектора колебательной скорости, но только в узкой зоне глубокого минимума — на ограниченном интервале глубин излучателя от 30 до 40 м. Обозначено: по оси абсцисс — горизонтальная V_r , по оси ординат — вертикальная V_z компоненты колебательной скорости. Полный вектор колебательной скорости в зоне ИМИ звукового давления практически достигает нулевого значения.

— Годограф вектора градиента фазы вблизи зоны глубокого минимума (глубины излучателя от 30 до 40 м) представлен кривой 12. На оси абсцисс отложена горизонтальная ϕ'_r , по оси ординат — вертикальная ϕ'_z компоненты вектора градиента фазы. Это подтверждает наличие в зоне завихренности обратного потока мощности, так как направления вектора Умова—Пойнтинга и вектора градиента фазы 3Д совпадают.

— Из рис. 7 также следует, что в зоне глубокого минимума 3Д (кривая 1, глубина источника $Z_0 = 37.2$ м) к нулевому значению стремятся 3Д и обе проекции ВКС (кривые 2, 3 и 11).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мелком море экспериментально и расчетным путем исследованы амплитудно-фазовые характеристики низкочастотного векторно-скалярного звукового поля в зонах интерференционных максимумов и минимумов. Установлено, что анализ векторно-скалярной структуры позволяет получить представление об однонаправленных потоках акустической энергии, установить их связь

с направлениями вектора Умова–Пойтинга и исследовать пространственную структуру потоков мощности. По отдельности ни описание скалярных, ни векторных полей таким качеством не обладает. Причем, такая возможность реализуется при использовании малогабаритных векторно-скалярных приемников с размерами много меньше длины волны и протяженности аномальных зон поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Это позволяет детально исследовать характеристики этих зон, в том числе в зоне вблизи минимумов ЗД и ВКС.

Установлено хорошее согласие интерференционных зависимостей и экстремальных зон максимумов и минимумов, полученных экспериментально и расчетным путем, но только при использовании моделей передаточной функции в волноводе, построенных по данным акустической калибровки волновода и адекватным оценкам параметров модели грунта. Подтверждено, что в зонах максимумов наблюдаются гладкие градиенты фазы, которые можно описать аналитически и аппроксимировать с использованием эффективной фазовой скорости. В зонах глубоких минимумов формируются полюса и возникают скачки до 180° горизонтального градиента фазы и до $\pm 180^\circ$ вертикального градиента фазы.

Детально изучены пространственные характеристики проекций вектора колебательной скорости и градиента фазы ЗД и рассчитаны их горизонтальные и вертикальные проекции. Это позволило построить годографы указанных величин, на основании анализа которых сделан вывод о формировании в вертикальной плоскости завихренности – циркуляции в зоне полюса (дислокаций). В горизонтальной плоскости при изотропности передаточных функций акустические вихри должны отсутствовать.

Направления градиента фазы ЗД отклоняются от горизонтального только в зоне дислокаций и изменяются в этой зоне в пределах близких к $\pm\pi$. Направления вектора колебательной скорости существенно зависят от глубины волновода, поскольку при вариации глубины изменяется соотношение между горизонтальными и вертикальными компонентами колебательной скорости. Модуль полного вектора колебательной скорости приближается в зоне минимума амплитуды давления к нулевому значению.

Анализ характеристик звукового поля в зонах ИМИ имеет, прежде всего, теоретический интерес. С практической точки зрения важнее исследование характеристик звукового поля в зонах ИМА, поскольку в этих зонах не только имеют максимальные значения отношения сигнал/помеха, но и наблюдаются стабильные и предсказуемые значения градиентов фазы ЗД и максимальные значения горизонтальной проекции ВКС.

Эти факторы позволяют при расположении антенн в зонах ИМА формировать несмещенные оценки пеленга и получать наибольшие значения коэффициентов осевой концентрации даже при косых углах падения волны. Вектор Умова–Пойтинга в зонах интерференционных максимумов имеет горизонтальное направление, что свидетельствует о горизонтальном распространении звуковой энергии в этих зонах. Использование особых свойств зон ИМА – формирование “гребней” – позволяет с учетом закономерностей энергетического инварианта Чупрова производить эффективное обнаружение, пеленгование и оценку расстояния до движущегося источника [18, 19]. В связи с этим, по мнению авторов, большое значение приобретают дополнительные исследования закономерностей изменения “поверхностей”, образованных именно зонами ИМА, в частности динамики “интерференционных гребней”.

При решении таких задач интересные научные результаты можно получить, применяя ВСП, которые дают в пространственной области существенно больше информации, чем скалярные приемники.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы “Акустика мелкого моря, нелинейная акустическая диагностика, нелинейная динамика волн” (номер государственной регистрации АААА-А18-118021390174-1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00941).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового поля волнового фронта // Журн. эксп. теор. физ. 1993. Т. 104. № 5(11). С. 3769–3783.
2. Елисеевнин В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 781–788.
3. Кузькин В.М., Огуцов А.В., Петников В.Г. Влияние гидродинамической изменчивости на частотные смещения интерференционной структуры звукового поля в мелком море // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 1. С. 94–100.
4. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В., Степанов А.Н. Вертикальная амплитудно-фазовая структура низкочастотного акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 699–711.
5. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Экспериментальное исследование интерференционной и фазовой структуры потока мощности от локальных источников в мелком море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 318–329.
6. Shchurov V.A. The dynamics of low-frequency signal acoustic intensity vector vortex structure in shallow sea // Chin. J. Acoust. 2019. V. 38. № 2. P. 113–131.
7. Шууров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в

- мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.
8. Кузнецов Г.Н. Звуковые поля в мелком море в зонах интерференционных минимумов и максимумов // Акустика океана. Доклады XVII Школы-семинара им. Акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXXIII сессией Российского акустического общества. М.: ИО РАН, 2020. С. 371–376.
 9. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка шумности движущихся источников на основе идентификации акустической модели морского дна // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 722–734.
 10. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 194–202.
 11. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Методы и результаты акустической калибровки локальных зон мелкого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 68–78.
 12. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Аппроксимирующие модели регулярной составляющей инфразвукового поля мультипольных источников в плоском волноводе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 378–390.
 13. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Приближенные аналитические представления законов спадаения векторно-скалярных полей мультипольных источников в волноводе Пекериса // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 623–636.
 14. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 628–638.
 15. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Интерференция звукового давления и фазовые скорости в мелком море: расчет и эксперимент // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 408–419.
<https://doi.org/10.31857/S032079192004005>
 16. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. Ослабление интерференционных максимумов акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 675–678.
 17. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007.
 18. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Голографический метод обнаружения, оценка расстояния и радиальной скорости шумового источника с использованием векторно-скалярного приемниками // Гидроакустика. 2018. Вып. 34(2). С. 26–38.
 19. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 4. С. 406–418.