

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НА ТОЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

**М.А. Сорокин, П.С. Петров,  
Д.Д. Каплуненко, Д.В. Степанов, Ю.Н. Моргунов**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт  
имени В. И. Ильичева ДВО РАН<sup>1</sup>

Разработка систем акустической навигации и акустической дальнометрии в настоящее время является одной из наиболее актуальных практических задач акустики океана. В работе исследуется вопрос о влиянии крупномасштабных неоднородностей поля скорости звука в океане на точность решения задачи акустической дальнометрии. В качестве примера такой неоднородности нами выбран устойчивый антициклонический вихрь, наблюдающийся в южной части Японского моря в летний период. В работе проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния этого вихря на структуру звукового поля, формируемого на акустической трассе, проходящей через его центр, источником навигационных сигналов (ИНС), расположенным на шельфе. В ходе этих экспериментов по гидрологическим данным, полученным с помощью моделей глобальной циркуляции океана NEMO и IBM РАН, для этой трассы построена модель нерегулярного волновода «шельф–глубокий океан», после чего с помощью метода широкоугольных параболических уравнений выполнено моделирование акустического поля, формируемого ИНС в таком волноводе. Далее в работе также выполнен анализ модовой структуры этого поля, определены интервалы локализации различных модальных компонент сигнала и рассчитаны эффективные скорости распространения сигналов от ИНС на различных горизонтах приема, после чего исследовано влияние синоптического вихря на данные характеристики волновода. На основе этого анализа выполнены оценки влияния вихря на времена прихода сигналов от ИНС в точку приема, а также дополнительная погрешность решения задачи акустической дальнометрии, обусловленная этим влиянием. Результаты исследования показывают, что в рамках рассматриваемой методики решения задачи акустической дальнометрии даже относительно крупный неучтенный синоптический вихрь, ядро которого находится непосредственно на трассе, оказывает относительно слабое влияние на точность определения дальности (около 30 м для трассы протяженностью 300 км, или 0,01%).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных практических задач акустики океана является разработка систем подводной акустической навигации и дальнометрии. Такие системы необходимы, в частности, для позиционирования автономных подводных аппаратов (АПА), выполняющих миссии на больших глубинах [1–4]. Точность позиционирования АПА, обеспечиваемая гидроакустическими навигационными системами, напрямую зависит от точности оценки эффективной скорости распространения импульсных навигационных сигналов [3, 4]. В первом приближении эту величину АПА может оценить, измерив скорость звука на оси подводного звукового канала (ПЗК) [3, 4] в районе выполнения миссии. В работе [4] показано, что эта оценка практически совпадает

со значением эффективной скорости, рассчитанной через групповые скорости соответствующих мод в широком диапазоне глубин. Тем не менее в случаях, когда требуется дальнейшее уточнение решения задачи дальнометрии, можно усреднить эффективные скорости по нескольким поперечным сечениям океанического волновода, в котором происходит распространение звука от источника навигационных сигналов (ИНС) до АПА [4–6]. Для этого необходима информация о профилях скорости звука (так мы называем здесь и далее зависимость скорости звука от глубины) на этих сечениях, зная которые можно рассчитать групповые скорости мод.

<sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (914) 697-29-58.  
E-mail: mikhapilot@mail.ru

Точность оценки эффективной скорости в реальных условиях снижается ввиду наличия на линии, соединяющей ИНС и АПА, неучтенных при априорных расчетах неоднородностей морской среды различного типа, оказывающих влияние на значения групповых скоростей мод малых номеров (соответствующих приосевому распространению в подводном звуковом канале и естественным образом селективируемых при прохождении шельфового участка).

В глубоком океане наиболее распространенными неоднородностями такого типа являются синоптические вихри [7, 8], наблюдаемые по спутниковым данным альтиметрии и на изображениях инфракрасного и видимого диапазона для поверхности моря. Такие изображения хотя и сообщают о самом факте наличия этих неоднородностей, тем не менее не дают детальных сведений об их внутреннем строении, например, о зависимости связанной с ними поправки к скорости звука от глубины и удаления от центра вихря. Для получения этой информации можно прибегнуть, например, к помощи моделей глобальной циркуляции океана [9–11]. Передача полного набора данных оперативного прогноза, даваемого такими моделями на АПА, представляется затруднительной, поэтому интерес представляет оценка дополнительной ошибки, возникающей в случае наличия на трассе ИНС–АПА крупного неучтенного вихря.

В этой статье мы выполним такую оценку, рассмотрев численный эксперимент по моделированию распространения звука через конкретный устойчивый антициклонический вихрь, наблюдаемый в южной части Японского моря в летний период [11]. Данная задача может показаться довольно экзотической ввиду конкретизации вихря и акустической трассы. Разумеется, для каждой конкретной неоднородности такого типа вычисленные ниже поправки к эффективным скоростям необходимо пересчитывать заново. Тем не менее полученные ниже оценки можно в некотором смысле использовать как «худший сценарий» с точки зрения появления дополнительных ошибок позиционирования. Действительно, рассмотренный вихрь является достаточно крупным образованием, а акустическую трассу мы будем считать проходящей через его центр, чтобы максимизировать его влияние на среднюю по трассе эффективную скорость распространения навигационных сигналов. В случае вихрей меньшего размера и акустических трасс, пересекающих лишь их периферию, описанные ниже эффекты будут еще менее выраженными, а ситуация с дополнительными ошибками позиционирования, ими обусловленными, еще более оптимистичной с точки зрения устойчивости результатов.

## 1. Гидрологические данные из модели циркуляции океана NEMO

Рассматриваемый антициклонический вихрь, а также пересекающая его акустическая трасса, ориентированная вдоль параллели, показаны на рис. 1. Этот вихрь прослеживается на многолетних данных спутниковых наблюдений и, кроме того, устойчиво воспроизводится в различных современных моделях глобальной циркуляции океана [11]. Его основные характеристики оказываются приблизительно одинаковыми при проведении расчетов циркуляции Японского моря в двух различных рассмотренных нами моделях, а именно в модели NEMO [9] и модели ИВМ РАН [10, 11]. По этой причине для расчетов в рамках данной работы мы будем использовать гидрологический разрез данного вихря, взятый из первой упомянутой модели [9] за 16 июля 2015 г. Заметим еще, что приведенные ниже результаты останутся в главном неизменными, если при моделировании использовать усредненные за месяц данные о структуре данного вихря.

Западный край рассматриваемого вихря находится приблизительно над свалом глубин, а его центр в глубоководной части Японского моря. Будем считать, что ИНС расположен на шельфе в крайней западной точке трассы, изображенной на рис. 1. Заметим, что методика организации гидроакустических навигационных систем, предложенная и апробированная в работах [2–6], основана на использовании ИНС, установленных на шельфе и на небольшом удалении от береговой линии.

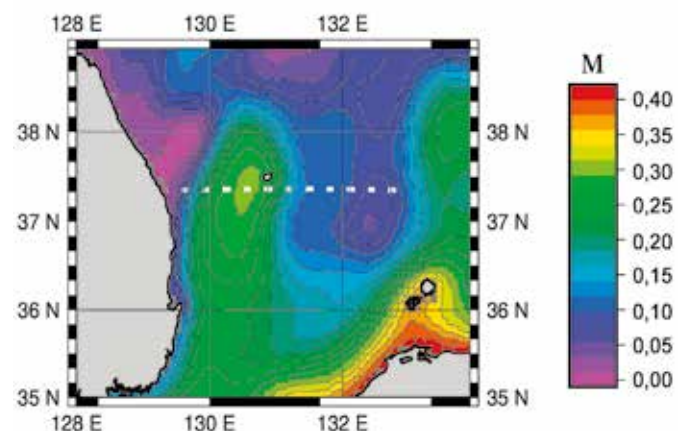


Рис. 1. Возвышение поверхности океана над средним уровнем, рассчитанное при помощи модели NEMO [8]. Пунктирной линией обозначена акустическая трасса, цветом представлено возвышение поверхности океана над поверхностью геоида (в метрах). Хорошо видно, что акустическая трасса пересекает крупномасштабное возмущение, вызванное вихрем

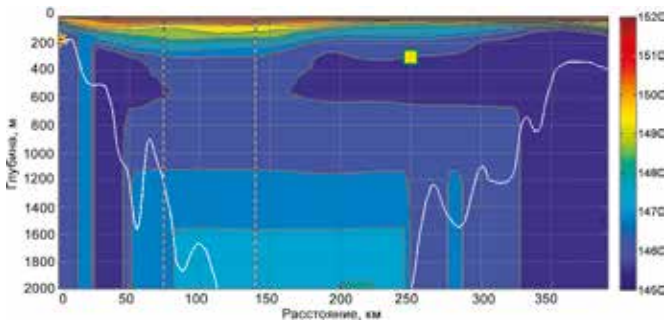


Рис. 2. Вертикальный разрез поля скорости звука (м/с) вдоль акустической трассы, представленной на рис. 1. Цветом представлены значения скорости звука, белая линия показывает батиметрический профиль. Видно, что на отрезке трассы между отметками в 70 и 140 км (пунктир) от ИНС наблюдается разбегание изолиний скорости звука, обусловленное влиянием синоптического вихря

Гидрологический разрез данного вихря, полученный из данных модели NEMO, представлен на рис. 2 (данные на 16 июля 2019 года). На рисунке хорошо заметно его влияние на поле скорости звука, заключающееся в «разбегании» его изолиний, обусловленное антициклоническим вращением. Для оценки влияния данного вихря на эффективные скорости и времена распространения навигационных сигналов, а также на обусловленные этим влиянием ошибки позиционирования построим волновод сравнения, устранив данный вихрь и заменив профили скорости звука в области его локализации «фоновыми» профилями из соседних с вихрем точек акватории Японского моря.

Поле скорости звука в таком волноводе сравнения показано на рис. 3. На нём хорошо видно, что разбегание изолиний в области локализации вихря, наблюдаемое на рис. 2, в данном случае отсутствует.

## 2. Влияние антициклонического вихря на акустическое поле в волноводе

Наиболее важной величиной, имеющей перво-степенное значение при оценке ошибки определения дальности, является эффективная скорость распространения сигналов от ИНС. Как было ранее показано в наших работах [3], при глубоководном распространении ее можно отождествить с групповой скоростью моды минимального номера с интервалом локализации, содержащим данный горизонт наблюдения. По этой причине мы будем рассматривать влияние вихря на групповые скорости различных мод для центральной частоты  $f_0 = \Gamma$ ц ИНС, использованного в работах [2–6].

Перед рассмотрением поправок к групповым скоростям исследуем модовую структуру акустического поля в волноводе с вихрем и волноводе сравнения.

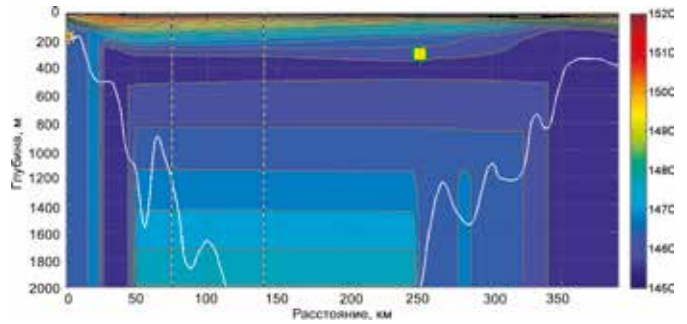


Рис. 3. Вертикальный разрез поля скорости звука (м/с) вдоль акустической трассы для волновода сравнения, построенного путем удаления из волновода на рис. 2 возмущения, вызванного вихрем. Обозначения идентичны использованным на рис. 2

Считая дно вдоль всей трассы однородной жидкой средой с акустическими параметрами  $c_b = 1700$  м/с (скорость звука),  $\rho_b = 1,7$  г/см<sup>3</sup> (плотность),  $\beta_b = 0,25$  дБ на длину волны, выполним расчет звукового поля путем численного решения широкоугольного параболического уравнения [11] (здесь мы используем модель RAM). Результаты расчета поля при наличии вихря и в его отсутствие представлены на рис. 4.

На рисунке видно, что наличие вихря вызывает заглужение ПЗК в области его локализации и, как следствие, приводит к заглужению линий уровня акустического поля.

Количественно этот эффект можно наблюдать, построив распределение энергии звукового поля по глубине. Это было сделано нами для нескольких поперечных сечений рассматриваемых волноводов. Распределение энергии по глубине для расстояния  $r_j$  может быть описано величиной  $|P(r_j, z)|^2$  (квадрат амплитуды поля в данной точке), а общая энергия поля может быть найдена по следующей формуле:

$$E = \int_0^H |P(r_j, z)|^2 dz = \sum_{j=1}^{\infty} |A_j|^2.$$

Здесь  $A_j$  суть модовые амплитуды в разложении акустического поля. Последнее равенство следует из того факта, что модовые функции образуют полную ортонормированную систему (фактически это вариант тождества Парсевяля–Стеклова). Заметим, что в глубоководном случае мы опускаем плотность в знаменателе подынтегрального выражения, для простоты считая ее равной 1 для всех  $z$ . Также отметим, что данная энергетическая характеристика  $E$  на самом деле связана с усредненным по глубине потоком акустической энергии [13]. Результаты расчетов распределения  $|P(r_j, z)|^2$  представлены на рис. 5.



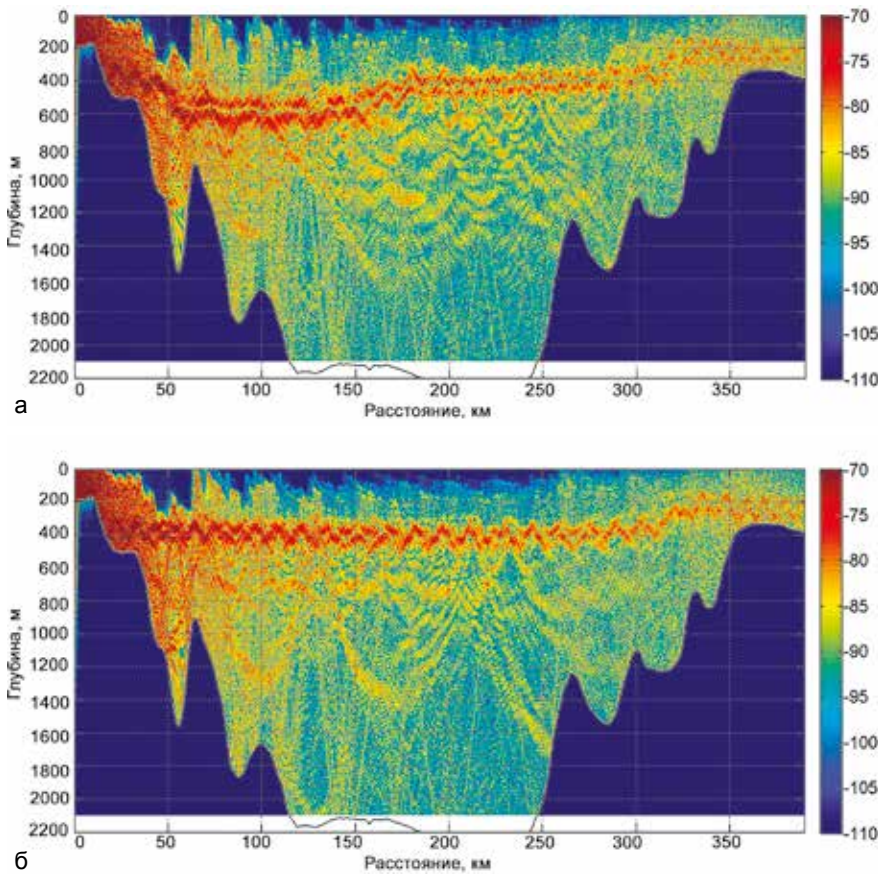


Рис. 4. График зависимости рассчитанного при помощи ШПУ акустического поля (дБ) от глубины и расстояния от источника для разреза, изображенного на рис. 2, т. е. поля скорости звука с вихрем (а) и без вихря (б) для разреза на рис. 3. На верхней части рисунка заметно выражено влияние на структуру звукового поля, в частности, на распределение энергии по глубине в районе нахождения вихря

Из графика видно, что наибольшей деформации распределение энергии поля подвергается на дистанциях 100 и 150 км от ИНС. Максимум этого распределения заглубляется под воздействием вихря. Вероятно, в некоторых ситуациях этот эффект может оказать влияние на интервал глубин, в кото-

ром АПА будут различать сигналы ИНС.

### 3. Влияние вихря на эффективные скорости распространения навигационных сигналов

Перейдем теперь к оценке влияния вихря на групповые скорости. Методика расчета эффективных скоростей распространения звука была описана в предыдущих работах авторов [3–5]. Отметим, что, как и прежде, все расчеты, связанные с модовой теорией, выполнялись нами с помощью пакетов SAMBALA и AC\_MODES, разработанных в ТОИ ДВО РАН. График зависимости групповых скоростей от номера моды для  $r_j = 44,4$  км (приблизительно на этом удалении от ИНС начинается периферия вихря) приведен на рис. 6.

Видно, что на этом удалении от ИНС значения групповых скоростей в волноводе с вихрем и волноводе сравнения в точности совпадают, т.е. на дальней периферии вихря его влияние на скорости распространения сигналов практически незаметно. Теперь рассмотрим эти величины для других расстояний от источника.

Результаты для расстояния 103,6 км, соответствующему центру вихря, представлены на рис. 7. Видно, что влияние антициклонического вихря в

распространения сигналов практически незаметно. Теперь рассмотрим эти величины для других расстояний от источника.

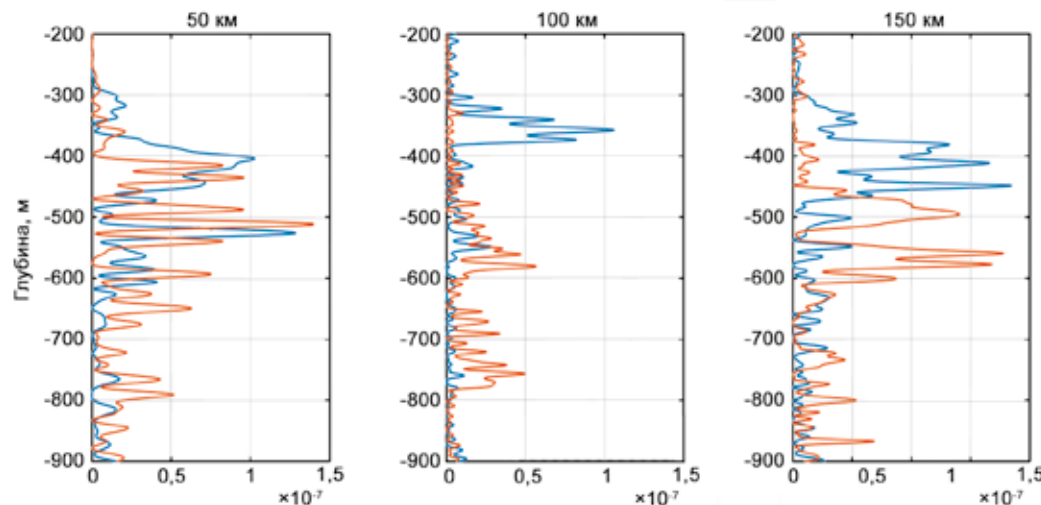


Рис. 5. Сводный график распределения акустической энергии по глубине в трех различных поперечных сечениях волновода для расстояний от ИНС  $r = 50, 100, 150$  км. Синей сплошной линии соответствует распределение энергии для случая без вихря, красной – при его наличии

данном случае заключается в увеличении групповых скоростей всех мод приблизительно на одну и ту же величину 0,5–0,6 м/с. Эта поправка может показаться незначительной, однако следует учесть и протяженность вихря (около 100 км), ввиду которой кумулятивная задержка, связанная с пересечением сигналом всей области его локализации, может быть достаточно большой. Рассмотрим еще случай для удаления от источника 133,2 км (рис. 8). В данной точке влияние вихря чувствуется в значительно меньшей степени, однако и здесь оно приводит к появлению добавки к групповым скоростям, составляющей 0,3–0,4 м/с относительно их значений в волноводе сравнения (вновь отметим, что эта величина почти не зависит от номера моды).

Тот факт, что поправка к групповым скоростям, связанная с наличием вихря, почти не зависит от номера моды (по крайней мере, для первых 50 мод, с которыми связано приосевое распространение), позволяет нам перейти к рассмотрению усредненных (по всем модам) поправок. Результаты их расчета для всей трассы представлены на рис. 9.

Видно, что максимальное значение поправки к групповым скоростям достигается в центре вихря. Поведение поправок к групповым скоростям для отдельных мод проиллюстрировано на рис. 10. Хотя эти скорости для 1-, 15-, 25- и 35-й мод ведут себя совершенно по-разному, характер их изменения под влиянием вихря на интервале его локализации почти одинаков.

Перед тем, как перейти к расчетам задержек, связанных с наличием вихря на трассе, и вызванных ими ошибок определения дальности, рассмотрим еще влияние вихря на интервалы локализации модальных компонент импульсного сигнала. Напомним [4], что в глубоком океане эффективная скорость распространения сигналов, принимаемых на некотором горизонте, может быть отождествлена

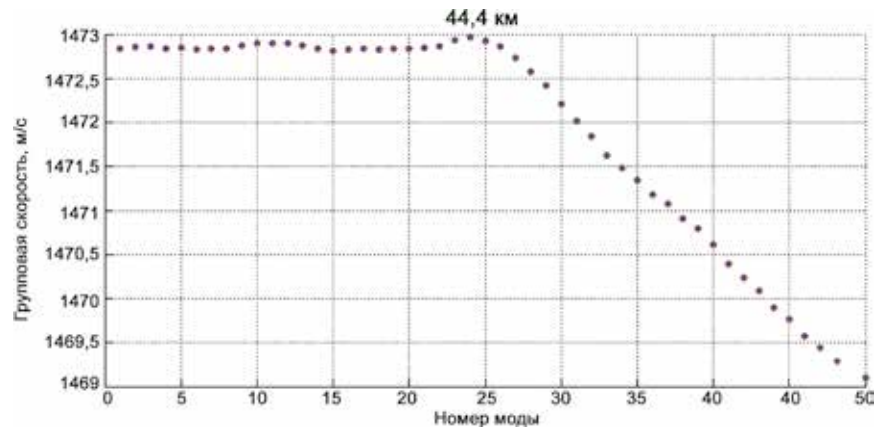


Рис. 6. График зависимости групповых скоростей от номера моды для  $r = 44,4$  км от номера моды для волноводов на рис. 2 (красные маркеры) и рис. 3 (синие маркеры). Видно, что на данном расстоянии групповые скорости совпадают, т. е. влияние вихря на этом расстоянии от ИНС не обнаруживается

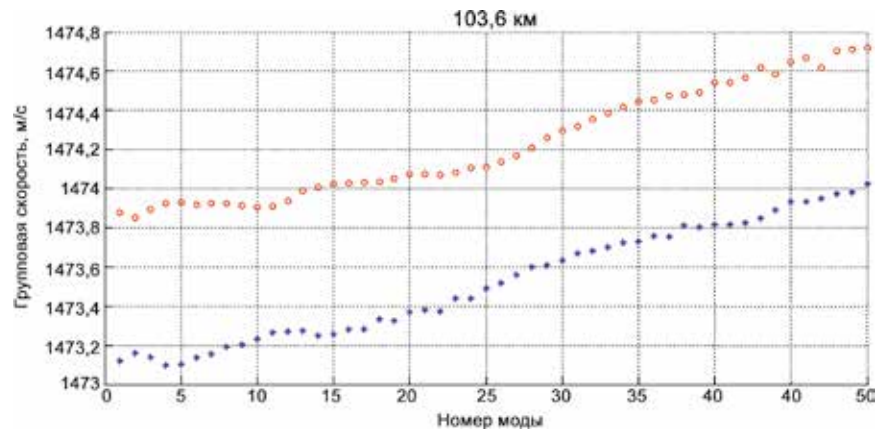


Рис. 7. Зависимость групповых скоростей в центре вихря ( $r = 103,6$  км) от номера моды для волноводов на рис. 2 (красные маркеры) и рис. 3 (синие маркеры)

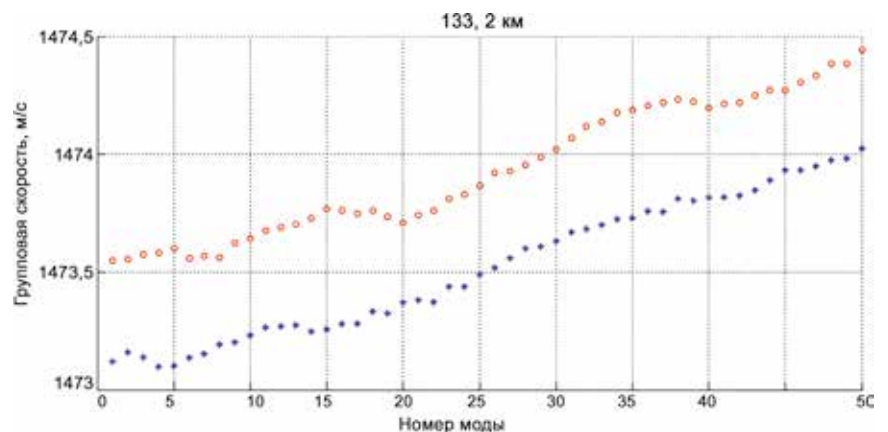


Рис. 8. Зависимость групповых скоростей в восточной части интервала локализации вихря ( $r = 133,2$  км от ИНС) от номера моды для волноводов на рис. 2 (красные маркеры) и рис. 3 (синие маркеры)

с групповой скоростью моды минимального номера, интервал локализации которой содержит данный горизонт. Результаты расчета границ этих интервалов для мод различных номеров представлены на рис. 11 (верхний подграфик относится к волноводу с вихрем,

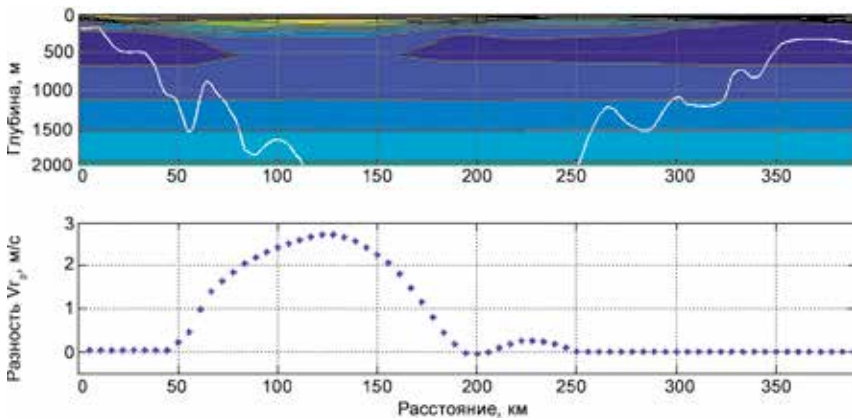


Рис. 9. Усредненное по первым 50 модам увеличение групповых скоростей, обусловленное наличием вихря, как функция расстояния от ИНС. Хорошо видно, что максимум функции достигается в центре вихря

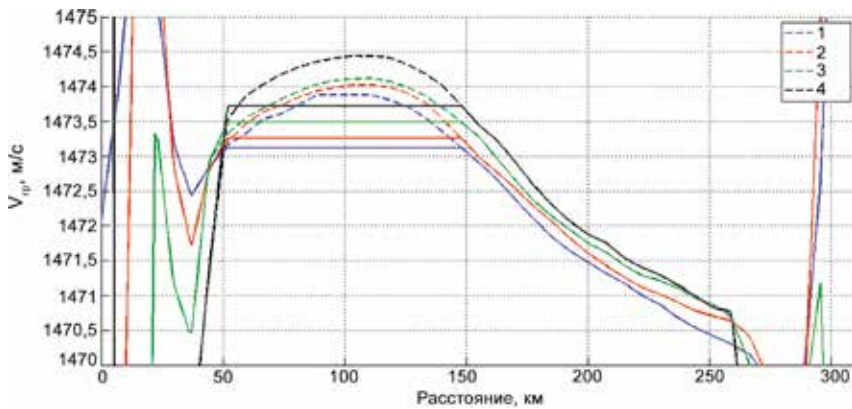


Рис. 10. График зависимости групповых скоростей  $v_g$  модальных компонент сигнала с номерами  $j = 1, 15, 25, 35$  (на центральной частоте ИНС  $f = 400$  Гц) от расстояния: 1 – 1-я мода, 2 – 15-я мода, 3 – 25-я мода, 4 – 35-я мода. Каждой моде соответствует свой цвет, пунктирные линии обозначают результаты расчетов для волновода с вихрем (рис. 2), сплошные – для волновода сравнения (рис. 3)

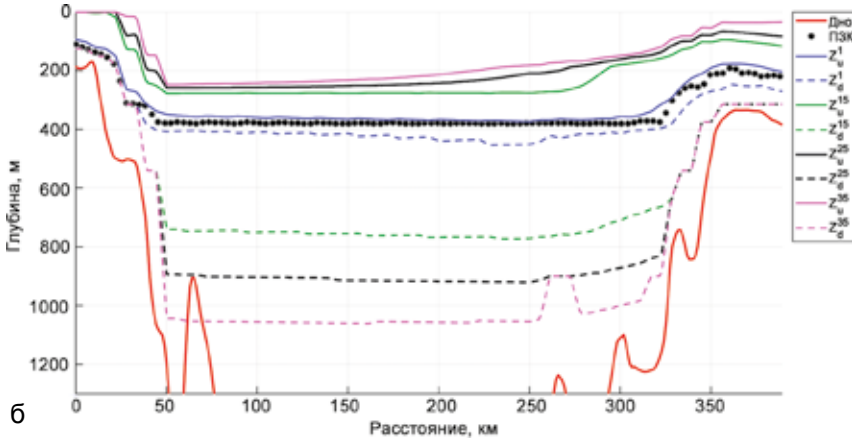
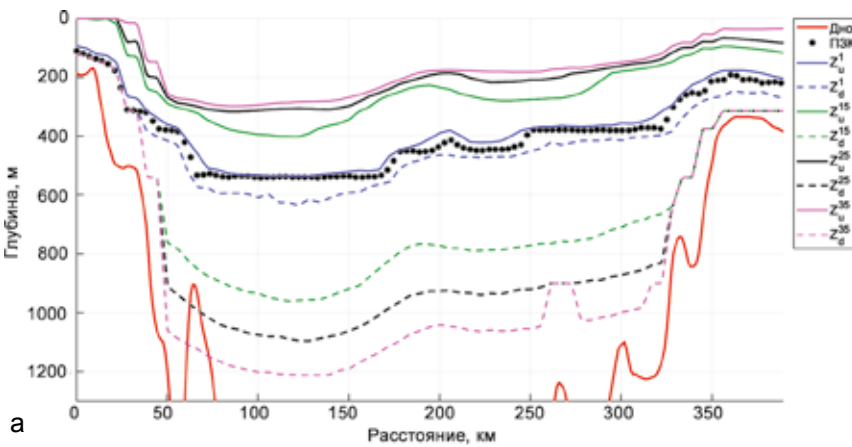


Рис. 11. Интервалы локализации модальных компонент акустического сигнала ( $j = 1, 15, 25, 35$ ) в случае наличия на трассе акустического вихря (а) и при его отсутствии (б). Верхние границы локализации обозначены непрерывной линией, нижние – пунктиром. Цвет линий соответствует номерам мод. Последовательность черных точек обозначено положение оси ПЗК



а нижний соответствует случаю волновода сравнения).

Видно, что между отметками в  $r = 50$  км и  $r = 150$  км данные интервалы вертикальной локализации деформированы из-за наличия на трассе синоптического вихря. При этом как верхние, так и нижние границы локализации опускаются на величину порядка 50–70 м, причем эта величина вновь почти не зависит от номера моды  $j$ . Данное изменение интервалов локализации, естественно, приводит и к дополнительным поправкам эффективных скоростей  $v_{eff}$  на различных горизонтах. Убедимся в данном факте, рассчитав эффективные скорости для отметки в  $r = 100$  км, которая соответствует центру вихря (рис. 12).

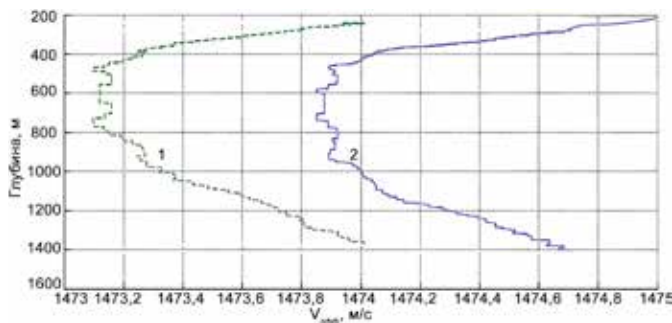


Рис. 12. График зависимости эффективной скорости [4] распространения сигналов ИНС от глубины на расстоянии  $r = 100$  км от точки излучения в волноводе с вихрем, представленном на рис. 2 (сплошная линия), и в волноводе сравнения, представленном на рис. 3 (пунктирная линия). Видно, что относительное смещение графиков практически не зависит от глубины

Как можно заметить, на расстоянии  $r = 100$  км профиль эффективных скоростей деформируется вихрем, что приводит к увеличению данной величины на 0,6–0,8 м/с по сравнению с аналогичной величиной в отсутствие вихря. При этом важно отметить, что данное приращение практически не зависит от горизонта приема. Очевидно, этот факт является следствием того, что поправка к групповым скоростям мод не зависит от их номеров.

#### 4. Влияние вихря на времена распространения навигационных сигналов

В точке акустической трассы, расположенной на расстоянии  $r$  от ИНС, время прихода  $\tau_j$   $j$ -й модальной компоненты сигнала может быть вычислено по формуле:

$$\tau_j(r) = \int_0^r \frac{dr}{v_{gr}^j(r)}$$

На практике при условии разбиения трассы на отрезки длиной  $\Delta r_j$  данная величина может быть рассчитана по приближенной формуле:

$$\tau_j \approx \sum \frac{\Delta r_j}{v_{gr}^j(r_j)}$$

Для наглядности мы рассчитали здесь разность времен прихода сигналов с центральной частотой  $f = 400$  Гц в волноводе с вихрем и волноводе сравнения. Зависимость этой величины от удаления точки приема от ИНС для  $j = 1$  показана на рис. 13 (заметим, что в силу изложенных в предыдущих разделах результатов данная величина также почти не зависит от номера моды).

Разность времен прихода в данном случае отрицательна, поскольку времена распространения для волновода с вихрем меньше (из-за того, что звук распространяется быстрее в более теплой воде). Вообще говоря, это явление необходимо учитывать при расчете средних эффективных скоростей распространения звука по трассе ИНС–АПА. Предположим, однако, что у нас нет возможности учесть наличие вихря при позиционировании подводного объекта. Оценим, какой будет ошибка определения дальности до ИНС в данном случае. Дальность  $R$  от подводного объекта до ИНС может быть найдена по формуле:

$$R_{err} = \tau_j v_{eff}.$$

Очевидно, что погрешность определения расстояния при этом может быть оценена следующим образом:

$$R_{err} = v_{eff}^E (\tau_j^E - \tau_j^{NE}) \approx 30 \text{ м},$$

где  $\tau_j^E$  – время прихода для волновода с вихрем,  $\tau_j^{NE}$  – в волноводе без вихря.

Для данной акустической трассы погрешность составляет всего 30 м при общем расстоянии от ИНС до точки приема, равном 310 км.

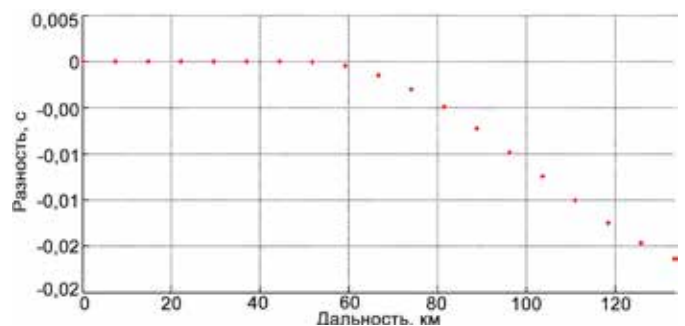


Рис. 13. Зависимость задержек для первой модальной компоненты, вызванная наличием на трассе циклонического вихря

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние крупного синоптического вихря, центр которого находится на акустической трассе, на структуру звукового поля, формируемого ИНС в волноводе глубокого океана, а также на эффективные скорости распространения различных модальных компонент излучаемых им сигналов. В частности, установлено, что увеличение групповых скоростей, обусловленное таким вихрем, в области его локализации практически не зависит от номера модальной компоненты.

Наиболее важным результатом следует считать то, что ошибка определения дальности (~30 м), вызванная наличием вихря, является малой с учетом того факта, что для моделирования распространения звука был взят достаточно крупный вихрь размером около 100 км в поперечном сечении, типичный для южной части Японского моря. Данная погрешность незначительна в рамках требований к точности позиционирования подводных объектов, предъявляемых на практике. Таким образом, подобные вихри можно не считать существенной помехой для функциони-

рования гидроакустических навигационных систем большой дальности, что еще раз подтверждает надежность методики определения дальности до ИНС, предложенной в предыдущих работах авторов [2–4].

Заметим однако, что хотя в рассмотренном нами сценарии распространения звука через центр синоптического вихря его влияние на увеличение эффективных скоростей максимизировано, в этом случае не проявляется другой важный эффект, который также может оказать влияние на точность решения задач акустической дальнометрии – горизонтальная рефракция звука [5, 6, 8]. Синоптический вихрь может стать причиной горизонтальной рефракции как раз в случае, когда акустическая трасса пересекает его лишь по периферии. Влияние данного эффекта на функционирование гидроакустических навигационных систем будет оценено в наших дальнейших работах.

Данная работа выполнена в рамках тем гос. задания ТОИ ДВО РАН (регистрационные номера АААА-А17-117030110034-7 и АА-АА-А20-120031890011-8) и поддержана грантом РФФИ №18-05-00057\_а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; [отв. ред. Л.В. Киселев]; Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с. ISBN 978-5-7311-0486-79.
2. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 374–380.
3. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 2. С. 191–196.
4. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
5. Голов А.А., Моргунов Ю.Н., Сорокин М.А., Петров П.С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения импульсных сигналов в мелком море вдоль кромки континентального шельфа // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 1 (31). С. 36–41.
6. Петров П.С., Голов А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Козицкий С.Б., Сорокин М.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространении импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 1. С. 20–33.
7. Henrick R.F., Siegmann W.L., Jacobson M.J. General analysis of ocean eddy effects for sound transmission applications // The Journal of the Acoustical Society of America. 1977. No. 62. P. 860–870.
8. Baer R.N., Propagation through a three-dimensional eddy including effects on an array // The Journal of the Acoustical Society of America. 1981. No. 69. P. 70–75.
9. Madec G. NEMO ocean engine // Note du Pole de modelisation. Institut Pierre-Simon Laplace, 2008. No. 27. P. 1288–1619.
10. Marchuk G.I., Rusakov A.S., Zalesny V.B., Diansky N.A. Splitting numerical technique with application to the high resolution simulation of the Indian Ocean circulation // Pure and Applied Geophysics. 2005. No. 162. P. 1407–1429.
11. Stepanov D.V., Ryzhov E.A., Zagumenov A.A., Berloff P., Koshel K.V. Clustering of floating tracer due to mesoscale vortex and submesoscale fields // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47, No. 3. e2019GL086504
12. Jensen F., Kuperman W., Porter M., Schmidt H. Computational ocean acoustics. Springer, 2011. 772 p.
13. Бреховских Л.М., Гордин О.А. Акустика неоднородных сред. Т. 2. М.: Наука, 2009. 426 с.