АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 3, с. 323–329

УДК 551.463

О ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЗОН КОНВЕРГЕНЦИИ В ОКЕАНЕ

© 2005 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 30.06.2004 г.

В публикациях неоднократно отмечались расхождения между экспериментом и расчетом в местоположении первой зоны конвергенции. Рассматривается наиболее вероятная причина таких расхождений – некорректное задание исходных данных для расчета. Обращается внимание на неодновременность проведения акустических измерений и гидрологического обследования района работ. Приводятся экспериментальные материалы по суточной изменчивости расстояния от источника до ближней границы зоны конвергенции, полученные автором для пяти регионов. Анализируются предложенные разными авторами и используемые в гидроакустике соотношения для пересчета температуры, солености морской воды и гидростатического давления в значения скорости звука. Отмечаются существенные различия этих соотношений при оценке зависимости гидростатического градиента скорости звука от глубины. Приводятся результаты серии расчетов положения первой зоны конвергенции при задании условий распространения звука профилями изменения температуры и солености с глубиной с последующим их пересчетом в профиль $c(z)$ на основании 8 различных соотношений, опубликованных в литературе. Различия между значениями расстояния до первой зоны, оцененными по результатам этих расчетов, заметно превышают отмечаемые в ряде работ расхождения эксперимента с расчетом. Отмечается необходимость дальнейшего совершенствования пересчетных соотношений с учетом экспериментальных данных по распространению звука в натурных океанических условиях, в том числе и с учетом данных по фактическому местоположению зон конвергенции.

Одной из "неразрешимых" проблем гидроакустики, на которую в течение нескольких десятков лет вновь и вновь обращают внимание авторы отдельных публикаций, посвященных акустике океана [1–4 и др.], остается проблема расхождений между экспериментом и расчетом в положении первой зоны конвергенции. Различие экспериментальных и расчетных значений расстояния от источника до ближней границы зоны достигает 1–2 км. Как правило (хотя и не всегда), расчет дает завышенное по сравнению с экспериментом значение этого расстояния.

Статья посвящена анализу наиболее вероятной причины такого расхождения – некорректного задания исходных данных при проведении расчетов. Внимание обращается на суточную изменчивость условий распространения, на неодновременность гидрологического обследования трассы распространения акустического сигнала и проведения эксперимента, на существенные различия соотношений, предложенных различными авторами для пересчета температуры, солености и гидростатического давления в значения скорости звука.

1. В большинстве случаев гидрологическое обследование трассы распространения проводится либо до, либо после проведения акустического опыта. При этом, как правило, зондирование морской среды производится до глубин 1000–2000 м (глубоководные станции "до дна" проводятся довольно редко). Недостающая часть профиля изменения скорости звука с глубиной $c(z)$ достраивается на основе архивных данных. Суточная изменчивость условий распространения звука и неодновременное проведение гидрологических и акустических измерений – один из возможных источников наблюдаемого расхождения расчетного расстояния до зоны конвергенции от экспериментальных замеров. Расхождение во времени между проведением акустического опыта и гидрологическим зондированием обычно составляло от 8 до 20 часов.

В нескольких экспедиционных рейсах научно-исследовательских судов Акустического института были проведены суточные наблюдения за геометрией и энергетической структурой первой зоны конвергенции. Опыты были проведены в 5 регионах Мирового океана (в Норвежском, Средиземном, Японском морях, в северо-восточной части Центральной Атлантики и в центральной части Индийского океана). На рис. 1 приведены профили изменения скорости звука по глубине, характеризующие условия распространения в каждом из этих регионов.

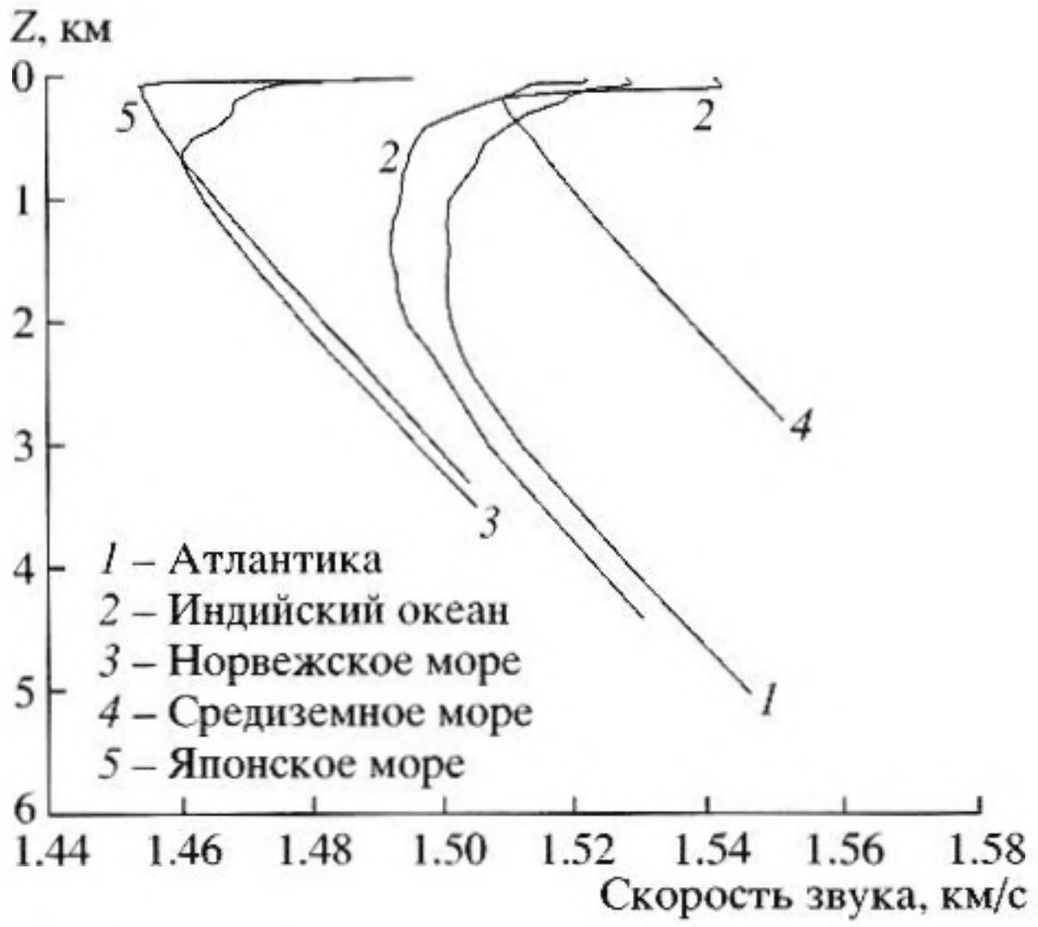

Рис. 1. Профили изменения скорости звука с глубиной, характеризующие условия распространения звука в районах проведения экспериментальных исследований.

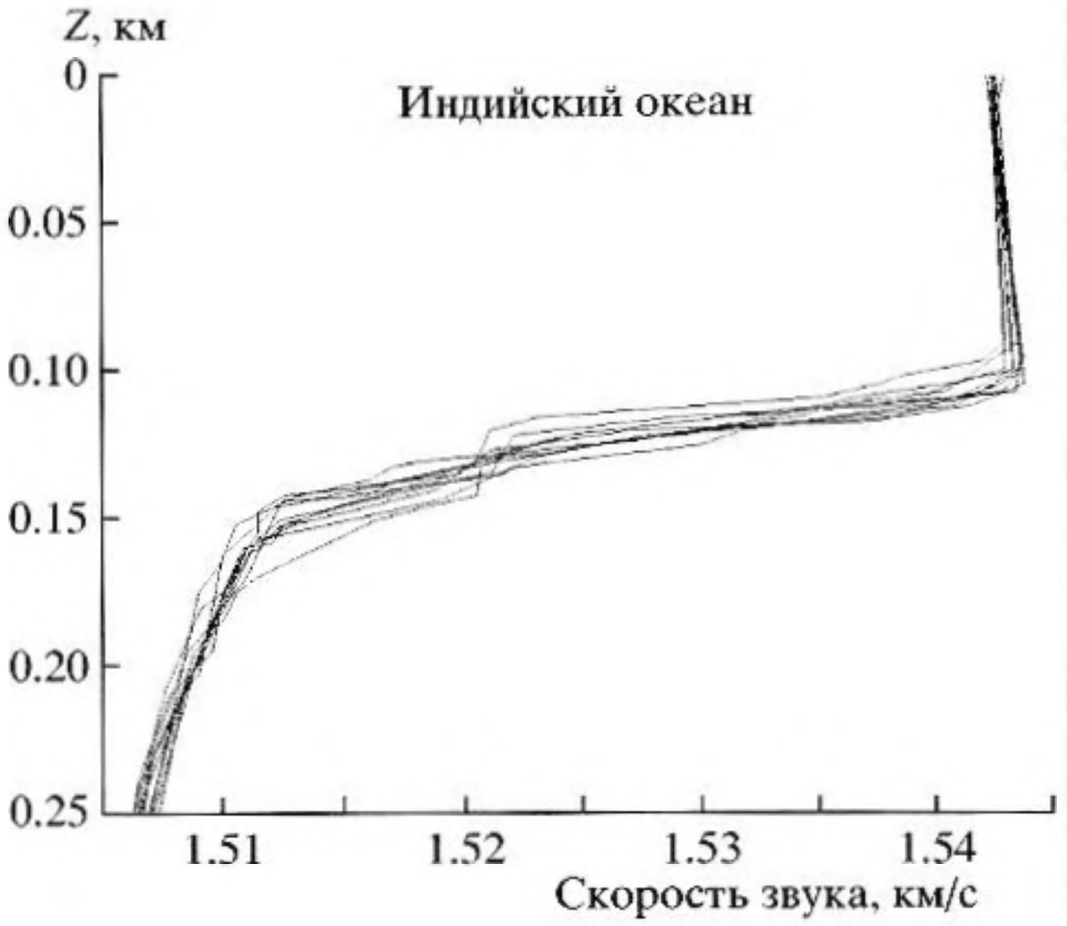

Рис. 2. Суточные изменения условий распространения в одном из районов проведения исследований – Индийский океан.

Опыты проводились по единой методике [5, 6]. Приемное судно с опущенными на выбранные горизонты ненаправленными приемными системами лежало в дрейфе. Излучающее судно с буксируемым на выбранной глубине излучателем двигалось со скоростью 2–3 узла на удаление или сближение с приемным судном, пересекая (неоднократно в течение суток) первую зону конвергенции. Во время пересечения зоны конвергенции излучался непрерывный шумовой (в 1/3-октавной полосе частот) сигнал. Центральная частота излучаемого сигнала составляла ~3 кГц. Периодически (1 раз в 5–10 минут) производились замеры расстояния между источником и приемными системами. Для этой цели использовалась специально разработанная аппаратура [7]. С помощью спутниковой навигационной системы также периодически (1 раз в 1–2 часа) проводились измерения расстояния между судами. При выходе за пределы зоны конвергенции излучающее судно разворачивалось для последующего очередного ее пересечения. В это время с приемного судна проводились измерения профиля изменения скорости звука с глубиной $c(z)$. При этом максимальная глубина зондирования не превышала 500 м. Характер суточных изменений профиля $c(z)$ иллюстрируется представленным на рис. 2 набором кривых $c(z)$, зарегистрированных во время проведения одного из опытов. Основные изменения профиля $c(z)$ наблюдались в слое температурного скачка, в слое максимального абсолютного значения отрицательного градиента скорости звука – менялось значение градиента, менялось положение этого слоя. Основная причина таких изменений – внутренние волны.

В качестве исходного экспериментального материала для оценки суточной изменчивости положения зоны конвергенции и ее энергетической структуры использовались записи уровня звукового поля, произведенные на регистраторах типа 2307 фирмы "Bruel&Kjer" в режиме регистрации абсолютных арифметических средних значений (текущее усреднение производилось на интервале 1–2 с).

Меняющиеся по дистанции уровни звукового давления после оцифровки вводились в память ЭВМ. Таким образом, исходный материал, подготовленный к последующей обработке, представлял набор согласованных между собой по дистанции массивов средних уровней звукового давления, зарегистрированных на различных участках первой зоны конвергенции неоднократно в течение суток. Шаг по дистанции, с которым были сделаны выборки при создании этих массивов, составлял от 10 до 25 м (несколько различаясь для разных опытов, разных горизонтов приема). На рис. 3 для иллюстрации представлены экспериментальные кривые изменения уровня звукового поля в пределах первой зоны конвергенции, зарегистрированные в одном из таких опытов. Уровни звукового поля (дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па), отложенные по оси ординат, относятся к верхней кривой. Остальные кривые искусственно разнесены по вертикали.

Положение ближней границы зоны конвергенции и расстояние до нее от источника определялось по уровню –3 дБ от максимума, регистрируемого на начальном ее участке. При анализе всей совокупности экспериментального материа-

Рис. 3. Суточная изменчивость энергетической структуры звукового поля в районе первой зоны конвергенции. Норвежское море. Источник расположен на глубине 120–125 м, прием на глубине 150 м.

ла полученное среднее значение положения границы зоны корректировалось в некоторых пределах изменения устанавливаемого порогового уровня для достижения минимального разброса значений расстояния до границы зоны. Результаты этих измерений приведены в таблице 1. В таблице приняты следующие обозначения: Z_0 – глубина буксировки излучателя, Z_1 – глубина расположения приемной системы, R_0 – среднее значение расстояния до ближней границы зоны конвергенции, оцененное по экспериментальным материалам, R_{01} – то же по результатам расчета, выполненного для набора профилей $c(z)$, зарегистрированных во время проведения опыта, S_R – среднеквадратичное отклонение расстояния до зоны от его среднего значения в эксперименте.

В результате проведенных исследований установлено, что ближняя граница зоны конвергенции в течение суток заметно меняет свое положение.

Среднеквадратичное отклонение расстояния до зоны от его среднего значения в опытах изменялось в пределах от 150 до 300 м. Исключением стало Японское море, где наблюдалось максимальное значение среднеквадратичного отклонения расстояния до зоны от среднего его значения – 700 м.

Таблица 1. Результаты 12–24-часовых наблюдений за положением ближней границы первой зоны конвергенции в различных регионах Мирового океана

Регион Мирового океана	Z_0, м	Z_1, м	R_0, км	S_R, м	R_{01}, км
Индийский океан (24 ч)	120–125	160	56.4	240	59.0
		470	54.6	220	56.6
Атлантический океан (24 ч)	110	200	58.7	232	59.5
		500	57.0	280	57.4
Атлантический океан (24 ч)	20	150	60.8	220	62.0
		500	59.6	200	60.0
Норвежское море (24 ч)	120–125	15	44.0	300	43.9
		60	41.4	170	40.2
		150	40.5	150	39.2
		500	36.3	100	35.6
Средиземное море (12 ч)	84–88	15	28.4	200	30.3
Японское море (24 ч)	70–85	20	42.1	700	43.1

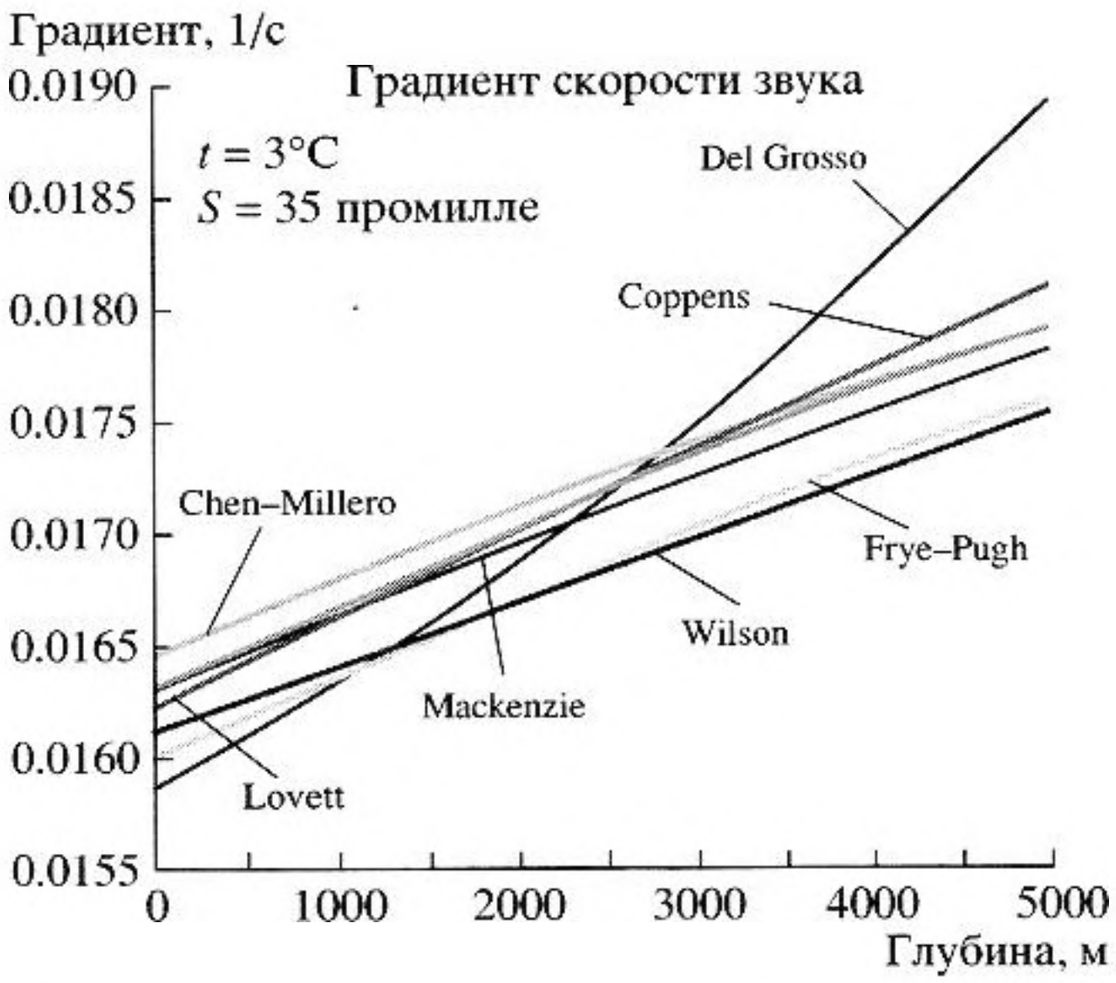

Рис. 4. Результаты расчета зависимости градиента скорости звука от глубины (при постоянных температуре и солености, 3°С и 35‰, соответственно), выполненного по предложенным различными авторами соотношениям.

Среднее значение расстояния до ближней к источнику границы зоны отличалось от расчетного (среднего по числу гидрологических станций, выполненных в обеспечение опыта) на 0.5–2.5 км. В Норвежском море расчет дал заниженное (по сравнению с экспериментом) значение этого расстояния, в остальных обследованных регионах – завышенное. Все расчеты проводились по программе Тебякина В.П. [8], для которой в качестве исходных данных использовались результаты гидрологических наблюдений, выполненных в обеспечение акустических опытов. Профили изменения скорости звука с глубиной достраивались до дна по материалам ближайших по времени и по географическим координатам глубоководных гидрологических станций.

2. В некоторых работах, авторы которых впервые обращали внимание на расхождения между расчетом и экспериментом в положении зоны конвергенции [1, 3], вопрос ставился не о причинах расхождений, а о выборе соотношений (из известных к тому времени), наилучшим образом описывающих связь между скоростью звука и температурой, соленостью морской среды, гидростатическим давлением. При этом критерием качества того или иного соотношения являлась степень согласия расчетного и экспериментально определенного значения расстояния до зоны. Кстати, аналогичный подход к оценке согласия расчетного времени распространения зондирующего сигнала с экспериментальными данными эхолотного замера глубины моря характерен и для работы [9], авторы которой производили сравнение соотношений, предложенных для расчета скорости звука Дель Гроссом [10] и Ченом, Миллеро [11].

Значения скорости звука, как правило, определяются в результате пересчета значений солености и температуры морской воды, определенных на соответствующих глубинах. При этом используются соотношения между скоростью звука, соленостью, температурой и гидростатическим давлением (или глубиной), выведенные на основе некоторого объема экспериментального материала.

Нами были проанализированы шесть формул пересчета температуры, солености морской воды и гидростатического давления в значение скорости звука, предложенных разными авторами [10–15]. Все они были сконструированы на основе экспериментальных данных по зависимости скорости звука от гидрологических параметров. Для приведения этих соотношений к единой форме функциональной зависимости $c(t, S, z)$ (у одних авторов исходными являлись температура, соленость, глубина, у других – температура, соленость, гидростатическое давление) пересчет гидростатического давления в глубину производился по формуле, предложенной в конце 70-х гг. Полосиным А.С. [16].

Для сравнительного анализа этих соотношений была проведена серия расчетов для различных значений параметров морской среды. Наиболее показательными оказались результаты расчетов, выполненных для морской среды, характеризующейся постоянными по глубине температурой и соленостью [17].

На рис. 4 представлены результаты расчета градиента скорости звука, выполненного для глубин от 0 до 5000 м при температуре и солености морской воды 3°С и 35‰, соответственно. Разброс в значениях градиента, определенных по разным формулам, достигает 0.0005 $с^{-1}$ на малых глубинах и превышает это значение на глубинах 3–4 км и более. Поправки такой величины к градиенту скорости звука вполне достаточны для смещения зоны более чем на 1 км. Такой результат оказался для нас несколько неожиданным.

На рис. 5 приведены результаты аналогичных расчетов, выполненных для температуры 13.5°С и солености 38‰, характерных для Средиземного моря. Разброс значений градиента скорости звука, определенных по формулам разных авторов, нисколько не уменьшился. Расчеты были продолжены в несколько ином направлении.

3. Была проведена серия расчетов в обеспечение опытов по суточным наблюдениям за положением зоны конвергенции. Для каждого из 5 обследованных нами регионов по зарегистрированным во время проведения исследований профилям изменения с глубиной температуры и солености

(для глубин, превышающих 1500–2000 м, значения температуры и солености морской воды брались из архивных материалов) были рассчитаны профили $c(z)$. При этом использовались восемь из опубликованных в разные годы разными авторами соотношений, связывающих скорость звука с температурой, соленостью морской воды и гидростатическим давлением (глубиной) [10–15, 18, 19]. Для каждого региона было получено по 8 профилей $c(z)$, которые были использованы при проведении серии расчетов звукового поля и определении расчетных значений расстояния от источника до ближней границы первой зоны конвергенции. Положение источника и приемников выбиралось в соответствии с геометрией проведения соответствующего опыта. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 2.

Практически для всех регионов минимальное расстояние до зоны получено с использованием пересчетных соотношений Кувахара–Маккензи. Эти соотношения (в отличие от других, используемых нами) базируются на результатах пересчета зависимости от температуры, солености и гидростатического давления модуля объемной упругости и плотности морской воды в значения скорости звука, и представленных Кувахарой в конце 30-х гг. прошлого века в виде таблиц [20], а в 1960 году предложенных Маккензи [19] в виде эмпирических соотношений.

Минимальный разброс расчетных значений расстояния до зоны, определенных с использованием семи профилей $c(z)$ (исключая профиль $c(z)$, полученный по формуле Кувахара–Маккензи [19]), составил 0.5 км для 500-метрового горизонта приема в Норвежском море, максимальный разброс 2.9 км – для Средиземного моря. В Индийском и Атлантическом океанах разброс расчетных значений расстояния до зоны составил 1.5–1.7 км.

В последней колонке таблицы 2 для сравнения приведены экспериментально полученные нами среднесуточные значения расстояния до зоны. Для Индийского океана наилучшее согласие экспериментального с расчетным значением расстояния до зоны достигается при расчете скорости звука по формуле Дель Гроссо [10], для Атлантического океана – по формуле Чен–Миллеро [11]. При этом следует заметить, что значения расстояния до зоны для этих регионов, рассчитанные как по Дель Гроссо, так и по Ченом и Миллеро, не отличаются от экспериментальных значений более чем на 0.4–0.5 км. В связи с этим следует напомнить, что соотношение, предложенное Чен–Миллеро, в начале 80-х гг. было рекомендовано для океанологических расчетов ЮНЕСКО.

Для Норвежского моря наилучшее согласие между расчетом и экспериментом достигается при использовании пересчетных соотношений Дель Гроссо. При этом расчетные значения расстояния до зоны по формуле Дель Гроссо [10] отличаются от рассчитанных по формуле Чен–Миллеро [11] на ~0.55 км (независимо от горизонта приема).

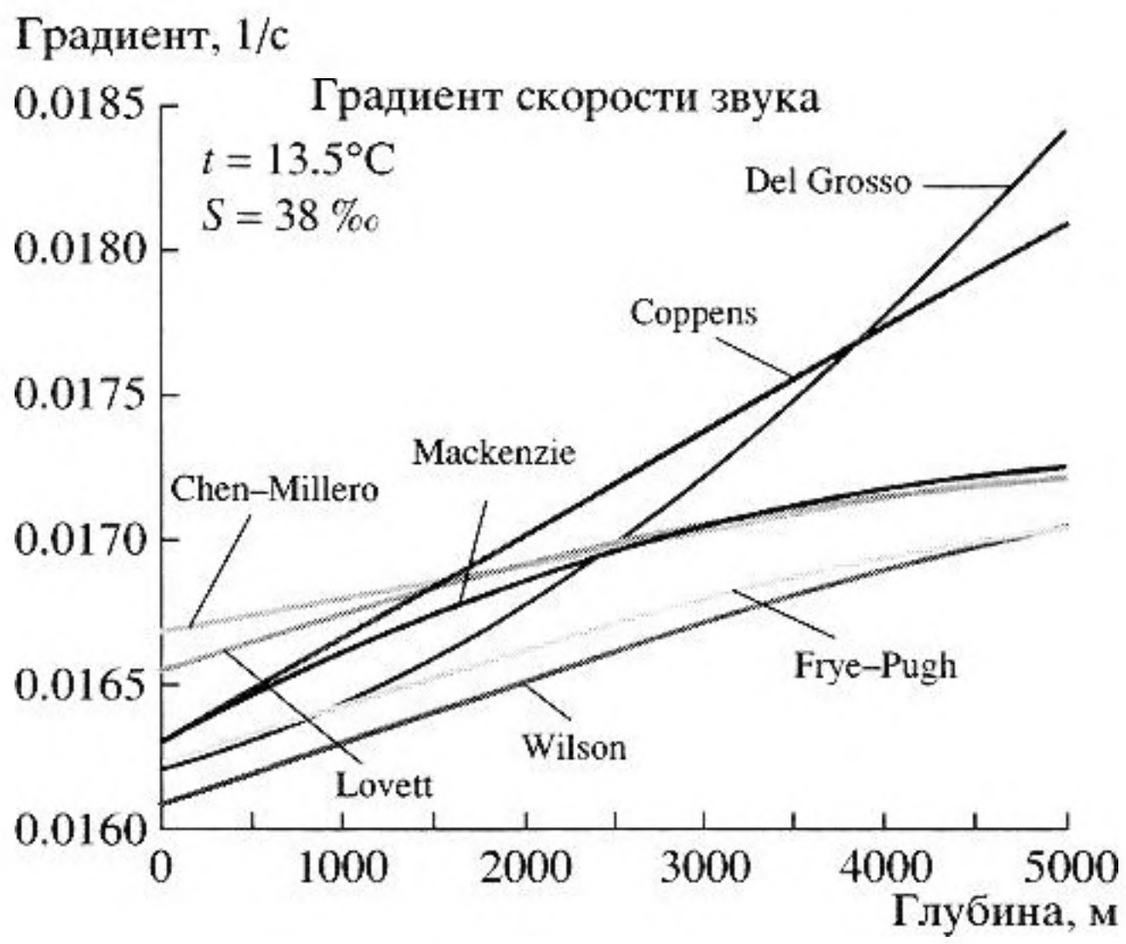

Рис. 5. Результаты расчета зависимости градиента скорости звука от глубины (при постоянных температуре и солености, 13.5° С и 38‰, соответственно), выполненного по предложенным различными авторами соотношениям.

Для Японского и Средиземного морей наилучшее согласие расчета с экспериментом достигается при расчете скорости звука по методу Кувахара [19]. Отметим при этом, что для Средиземного моря экспериментальное значение расстояния до зоны лежит между значениями, рассчитанными по Кувахара и по Ловетта (различие между ними 1.55 км). Такой результат неплохо согласуется с экспериментальными данными и других исследователей. По информации, предоставленной Инглишем (1963) [1], "…у Хэйса (Вудс-Холл) в его экспериментах в Средиземном море экспериментальное значение расстояния до зоны конвергенции находилось между расчетом по двум формулам – Кувахара и Вильсона". Из высказываний Инглиша можно также понять, что экспериментальное значение этого расстояния ближе к значению, вычисленному по формуле Кувахара.

В результате проведенных расчетов оказалось, что ни одно из восьми опробованных нами соотношений не может быть признанным в качестве универсального для расчета скорости звука в морской воде. В то же время, для каждого из обследованных регионов удалось подобрать соотношения, приводящие к приемлемому согласию расчетных значений расстояния до зоны с экспериментом. По-видимому, это обусловлено некоторыми индивидуальными особенностями условий распространения звука в каждом из этих регионов.

Таблица 2. Расстояние от источника до ближней границы зоны конвергенции – результаты расчета звукового поля, выполненного для разных регионов Мирового океана по профилям $c(z)$, построенным с использованием формул разных авторов. Сопоставление расчета с экспериментом

Регион	Горизонт излучения	Горизонт приема	Кувахара, Маккензи 1960 г.	Вильсон 1962 г.	Фрей, Паг 1971 г.	Дель Гроссо 1974 г.	Чен, Миллеро 1977 г.	Ловетт 1978 г.	Коппенс 1981 г.	Маккензи 1981 г.	Эксперимент
Индийский океан	120 м	160 м	55.575	58.225	57.975	56.675	56.925	56.925	57.125	57.475	56.4 км
		470 м	53.575	56.275	55.975	54.725	54.875	54.925	55.175	55.475	54.6 км
Атлантический океан	110 м	200 м	57.725	60.175	59.975	58.475	59.025	59.025	59.025	59.425	58.7 км
		500 м	55.525	58.175	57.975	56.625	57.025	57.075	57.125	57.475	57.0 км
Норвежское море	122 м	15 м	41.425	44.425	44.425	44.075	43.525	43.725	44.875	43.875	44.0 км
		60 м	38.175	40.775	41.125	40.925	40.375	40.375	40.375	40.625	41.4 км
		150 м	36.975	39.325	39.425	39.475	38.875	39.125	38.775	39.175	40.5 км
		500 м	33.575	35.725	35.825	35.875	35.325	35.625	35.325	35.625	36.3 км
Японское море	80 м	20 м	41.825	45.725	44.825	45.275	43.875	43.925	44.125	44.275	42.1 км
Средиземное море	86 м	15 м	27.775	30.475	27.525	30.325	29.675	29.325	29.975	29.775	28.4 км

Чем же принципиально различаются обследованные нами регионы, в чем их различия по условиям формирования звукового поля в районе первой зоны конвергенции?

Первое различие – в положении оси подводного звукового канала (ПЗК). В Атлантике и в Индийском океане глубина расположения оси ПЗК около 1500 м. Начало зоны конвергенции формируется лучами, нижняя точка заворота которых лежит на глубинах 3–4 км. При этом и расстояние до зоны будет существенно зависеть от значения гидростатического градиента скорости звука на этих глубинах. В Средиземном и Японском морях ось ПЗК расположена на глубине 150–250 м. Начало зоны конвергенции формируется лучами, нижняя точка заворота которых лежит на глубинах 1–2 км. Для этих регионов расстояние до зоны будет существенно зависеть от значения гидростатического градиента на гораздо меньших глубинах (0.5–2 км). Норвежское море в этом отношений занимает промежуточное положение.

Второе различие – в температуре водных масс, лежащих ниже оси ПЗК. Если в Атлантике и Индийском океане эта температура находится в пределах 2–4°С, в Японском и Норвежском морях – ниже 0°С, то в Средиземном море она составляет 13–13.5° С. При этом не следует забывать, что в соотношениях, предложенных разными авторами, помимо прямой зависимости гидростатического градиента от глубины присутствуют и перекрестные члены, описывающие определенную его температурную зависимость.

Такие принципиальные различия между регионами следовало бы использовать в процессе корректировки формулы расчета скорости звука в морской воде по температуре, солености и гидростатическому давлению при использовании экспериментальных данных по местоположению первой зоны конвергенции. Необходимость такой корректировки не вызывает сомнений.

В заключение сформулируем основные результаты проведенного анализа причин наблюдаемых расхождений местоположения первой зоны конвергенции с расчетом:

– Суточная изменчивость условий распространения приводит к заметным изменениям расстояния от источника до ближней границы зоны конвергенции; однако неодновременное проведение гидрологических и акустических измерений, являясь одной из причин расхождений расчетного расстояния до зоны конвергенции и экспериментальных замеров, может лишь частично объяснить наблюдаемые расхождения;

– Существенные различия соотношений, предложенных разными авторами для расчета скорости звука по температуре и солености морской воды, регистрируемых на разных глубинах при гидрологическом обследовании района работ, – основная, как нам представляется, причина наблюдаемых различий экспериментальных и расчетных значений расстояния до зоны; расчеты звуковых полей, проведенные с учетом профилей $c(z)$, построенных с использованием пересчетных соотношений разных авторов на основе солености и температуры морской воды, зарегистрированных на разных глубинах, приводят к разбросу значений расстояния до зоны того же порядка, что отмечались в публикациях разных авторов;

– Из всех предложенных разными авторами соотношений, связывающих скорость звука с температурой, соленостью и гидростатическим давлением, не удается выделить единственное, при применении которого для различных регионов Мирового океана (по крайней мере, для пяти, обследованных

нами) расчеты расстояния до зоны согласовывались бы наилучшим образом с экспериментом; при конструировании такого соотношения нельзя не учитывать экспериментальные материалы по местоположению первой зоны конвергенции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 04-02-16959, № 04-05-64557).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гринспан М., Чигг К.* Циклический измеритель скорости звука в море. В кн. Подводная акустика. М.: Мир, 1965. С. 105–124.
2. *Агеева Н.С., Райская Л.С.* Звуковое поле в океане в зоне конвергенции // Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1972. Вып. 1. С. 8–15.
3. *Шевцов В.П.* К вопросу о расчете скорости звука в морской воде по гидрологическим данным // Океанология. 1972. Т. 12. Вып. 3. С. 575–585.
4. *Галкин О.П., Харченко Е.А., Швачко Л.В.* Исследование угловой структуры звукового поля. – В кн.: IX Всесоюзная акустическая конференция: Докл. Секция Д. М.: Акуст. институт, 1977. С. 1–4.
5. *Вадов Р.А.* Нестабильность звукового поля в первой зоне конвергенции // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 202–208.
6. *Вадов Р.А.* Суточные наблюдения за энергетической структурой звукового поля в районе первой зоны конверген ции // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 2. С. 278–280.
7. *Веденеев А.Е., Галкин О.П., Рогожкин И.С., Филиппов Л.М.* Акустический метод измерения расстояния между исследовательскими судами в открытом океане // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1982. Вып. 15. С. 122–128.
8. *Тебякин В.П. и др.* Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто-неоднородном океане лучевым методом // Отчет АКИН, М., 1990.
9. *Meinen C.S., Watts D.R.* Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero // J. Acoust. Sos. Amer. 1997. V. 102. № 4. P. 2058–2062.
10. *Del Grosso V.A.* New equation for the speed of sound in natural water // J. Acoust. Sos. Amer. 1974. V. 56. № 4. Pt. 2. P. 1084–1091.
11. *Chen C.T., Millero F.J.* Speed of sound in sea water at high pressure // J. Acoust. Sos. Amer. 1977. V. 62. № 5. P. 1129–1135.
12. *Wilson W.D.* Equation for the speed of sound in sea water. // J. Acoust. Sos. Amer. 1960. V. 32. № 10. P. 1357.
13. *Lovett J.R.* Merged seawater sound-speed equation // J. Acoust. Sos. Amer. 1978. V. 63. № 6. P. 1713–1718.
14. *Coppens A.B.* Simple equation for the speed of sound in Neptunian waters // J. Acoust. Sos. Amer. 1981. V. 69. № 3. P. 862.
15. *Mackenzie K.W.* Nine-term equation for sound speed in the oceans // J. Acoust. Sos. Amer. 1981. V. 70. № 3. P. 807–812.
16. *Полосин А.С.* Вычисление скорости звука в морской воде // Вестник МГУ. 1967. Вып. 3. С. 101–105.
17. *Вадов Р.А.* Структура звуковых полей в океане (соответствие расчета эксперименту) // Сборник трудов, 13 сессия РАО, том 4, М.: ГЕОС, 2003 г. С. 27–32.
18. *Frye H.W., Pugh J.D.* A new equation for the speed of sound in sea water // J. Acoust. Sos. Amer. 1971. V. 50. № 1 (p. 2). P. 384–386.
19. *Mackenzie K.W.* Formulas for the computation of sound speed in sea water // J. Acoust. Sos. Amer. 1960. V. 32. № 1. P. 100–104.
20. *Kuwahara S.* Veloccity of sound in sea water and the calculation on velocity for use in sonic sounding // Hydrogr. Rev. 1939. V. 16. № 2. P. 123–140.

On the Possibility of Determining the Positions of the Convergence Zones in the Ocean

R. A. Vadov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: vadov@akin.ru

Abstract—The disagreement between the experimental and calculated positions of the first convergence zone are known from many publications. The most probable cause for such a disagreement, namely, the incorrect specification of the input data for the calculations, is considered. The lack of simultaneity between the hydrological surveys of the region and the acoustic experiments is emphasized. The experimental data obtained by the author in five ocean regions are presented. These data characterize the diurnal variability of the distance from the source to the nearest boundary of the convergence zone. The relations proposed by different researchers for calculating the sound speed from the temperature, salinity, and hydrostatic pressure are analyzed. It is shown that these relations lead to a substantial difference in the estimated depth dependence of the hydrostatic gradient of the sound speed. The position of the first convergence zone is calculated for the propagation conditions determined by vertical temperature and salinity profiles with the subsequent recalculation of these profiles into the sound speed profiles by using eight different formulas known from publications. It is shown that different formulas lead to different values of the distance to the first zone, this difference being substantially greater than that between the calculations and experiment. The necessity to improve the recalculation relations in view of the experimental data on sound propagation in natural oceanic waveguides, including the data on the actual positions of the convergence zones, is emphasized.