

К вычислению звуковых полей в моделях морской среды, включающих атмосферу, водную толщу и дно

К.В. Авилов^{1,2,*}, С.Н. Куличков^{2,†}, О.Е. Попов^{2,‡}
¹Институт машиноведения имени А.А.Благонравова РАН
Россия, 119334, Москва, ул. Бардина, д. 4
²Институт физики атмосферы имени А.М.Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3
(Статья поступила 27.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

В докладе представлено описание комплекса программных средств для вычисления широкополосных передаточных функций в моделях природных сред, включающих атмосферу, водную толщу и дно с учетом зависимости акустических свойств как от вертикальной, так и от горизонтальной координат волновым методом псевдодифференциального параболического уравнения в приближении однонаправленного распространения без учета наличия сдвиговых волн. Приведены примеры расчетов как верифицирующие правильность функционирования комплекса, так и представляющие прикладной интерес.

PACS: 43.28 43.30.

УДК: 534.213.

Ключевые слова: численное моделирование распространения звука в океане и атмосфере, псевдодифференциальные параболические уравнения.

ВВЕДЕНИЕ

Численные модели звуковых полей в природных средах должны учитывать как можно более широкий набор видов изменчивости этих сред. Современные знания об акустических эффектах при распространении звука в атмосфере, океане и осадочной толще указывают на желательность расчетов широкополосных звуковых полей с учетом боковой рефракции в трехмернонеоднородных моделях среды, с учетом сдвиговой упругости в дне и (для больших дистанций распространения) сферичности Земли для адекватного описания распространения звука. Научные основы (математические модели — уравнения и алгоритмические модели — процедуры решения этих уравнений) к настоящему времени построены [1–3]. Дело за разработкой программ их реализующих. В то же время программы для двумернонеоднородных сред в настоящее время достигли высокого быстродействия и совершенства в описании акустических свойств среды, позволяя учитывать трехмерные неоднородности в приближении $N*2D$, т.е. без учета боковой рефракции, случайные возвышения поверхности и дна, зависимость поглощения от пространственных координат, присутствие горизонтальных течений.

В настоящее время лучшими программами для расчета распространения звука волновым методом в двумернонеоднородных средах являются программы, реализующие метод псевдодифференциального параболического уравнения в приближении однонаправленного распространения, также называемый методом дроб-

ных шагов Падэ [4–7]. Такие программы обладают тем свойством, что для всех источников ошибок имеются управляющие параметры, позволяющие сделать эти ошибки сколь угодно малыми. В частности, они обладают свойством сверхширокоугольности, т.е. в отличие от программ, реализующих методы параболического уравнения различной, но фиксированной степени широкоугольности, диапазон углов или скоростей распространения в среде в таких программах может быть сделан сколь угодно широким за счет использования набора управляющих параметров. Собственно качество программы, реализующей широкоугольное параболическое уравнение, в большей степени и определяется тем, насколько широк диапазон скоростей распространения в модели среды, при котором программа позволяет проводить расчеты с контролируемой точностью.

1. СВЕРХШИРОКОУГОЛЬНАЯ ВЕРСИЯ ПРОГРАММЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МЕТОД ПСЕВДОДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

В последние несколько десятилетий при решении большого числа задач моделирования распространения звука в морской среде и в атмосфере использовалась программа К.В.Авилова, реализующая метод псевдодифференциального параболического уравнения в приближении однонаправленного распространения для жидкой среды [8]. Оценим широкоугольность этой распространенной версии программы К.В.Авилова. Следуя Ф. Д. Тапперту [9], используем для оценки широкоугольности величину максимального угла скольжения θ нормальной волны, распространение которой программа может описывать с приемлемой (в основном, фазовой) ошибкой:

*E-mail: k.v.avilov@list.ru

†E-mail: snik1953@gmail.com

‡E-mail: olegp@mail.ru

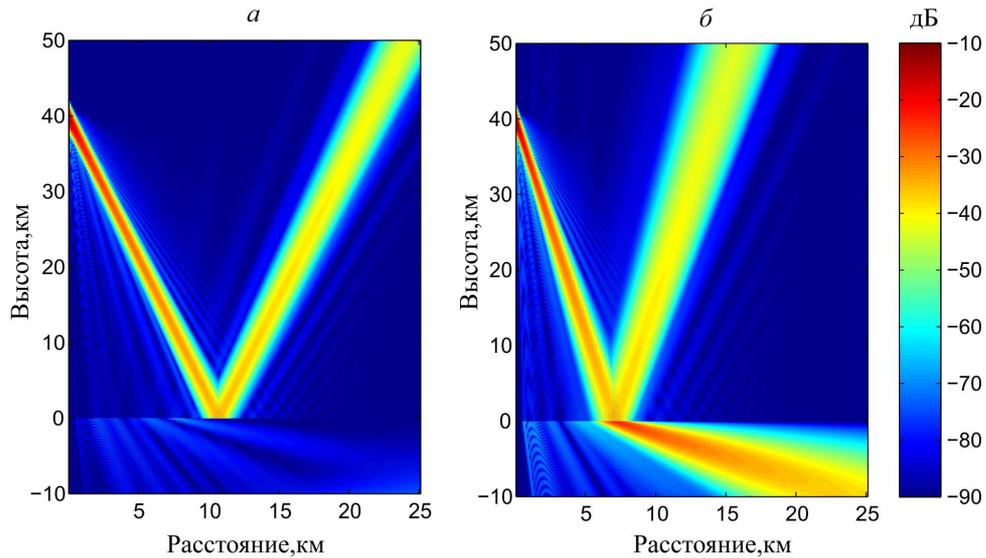


Рис. 1: Звуковое поле при падении звукового пучка на границу воздух–вода при угле скольжения $a - 75^\circ$ и $b - 80^\circ$

$$\theta = \arccos(C_{min}/C_{max}) = \operatorname{arcsec}(C_{max}/C_{min})$$

Ранее поставлявшиеся дистрибутивы этой программы имели набор управляющих параметров, позволявших с достаточной точностью проводить расчеты для сред, в которых при шаге расчета 8 длин волн отношение $C_{max}/C_{min} = 1.376$, что соответствовало $\theta \approx 43.4^\circ$. При шаге расчета равном половине длины волны $C_{max}/C_{min} \approx 1.709$, что соответствовало уже $\theta \approx 54.2^\circ$.

Для этих наборов параметров на каждом шаге расчета по горизонтальной координате фазовая ошибка не превосходит по абсолютной величине значения, $\pi/4 \times 10^{-4}$, что обеспечивает общую ошибку в набеге фазы на десяти тысячах шагов расчета не превосходящую четверти числа π . Абсолютная величина фактора распространения аппроксимируется всегда с более чем достаточной точностью. При уменьшении величины требуемого максимального угла скольжения θ ошибка уменьшается, а расстояние расчета с высокой точностью значительно увеличивается.

Для моделирования широкого круга задач распространения звука в океане этого было достаточно. Например, при скорости звука в воде около 1500 м/с максимальная скорость звука в дне могла быть от 2063 м/с при шаге расчета 8 длин волн и до 2564 м/с при шаге равном половине длины волны.

В новой, сверхширокоугольной версии программы К. В. Авилова предоставляется набор управляющих параметров, позволяющий радикально увеличить отношение C_{max}/C_{min} , а, следовательно, и диапазон углов скольжения. При шаге расчета 1 или 4 длины волны $C_{max}/C_{min} \approx 20$, и соответственно максимальный угол скольжения $\theta \approx 87.1^\circ$.

Минимальные скорости звука в природных средах встречаются в газонасыщенных осадках и могут достигать величин порядка 200 м/с. Такие же небольшие скорости звука — около 200 м/с — могут встречаться и в поверхностном почвенном слое. Близкие к 200 м/с значения эффективной скорости звука наблюдаются и в атмосфере. При минимальной скорости звука 200 м/с и допустимым для программы отношением $C_{max}/C_{min} \approx 20$ максимальная скорость в модели среды может быть 4000 м/с, что превышает скорости продольных волн в большинстве типов осадков.

Таким образом, новая сверхширокоугольная версия программы позволяет строить модели распространения звука, включающие атмосферу, водную и осадочные толщи, и изучать распространения звука из одной среды в другую.

2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

Рассмотрим пример расчета для простой, но весьма показательной модели распространения звука из воздуха в воду. Известно, что при падении звуковой волны из воздуха (300 м/с) в воду (1500 м/с) при углах скольжения менее 78.46° , должно происходить полное внутреннее отражение. На рис. 1 представлен расчёт по новой версии программы падения звукового пучка из воздуха в воду. Звуковой пучок формируется вертикальной цепочкой излучателей на частоте 30 Гц длиной 5 км с центром на высоте 40 км для углов скольжения 75° и 80° . Выше границы воздух–вода, находящейся в модели на высоте 0 км — однородная воздушная среда со скоростью звука 300 м/с и плотностью 1.225 кг/м^3 . Ниже границы — однородная водная среда

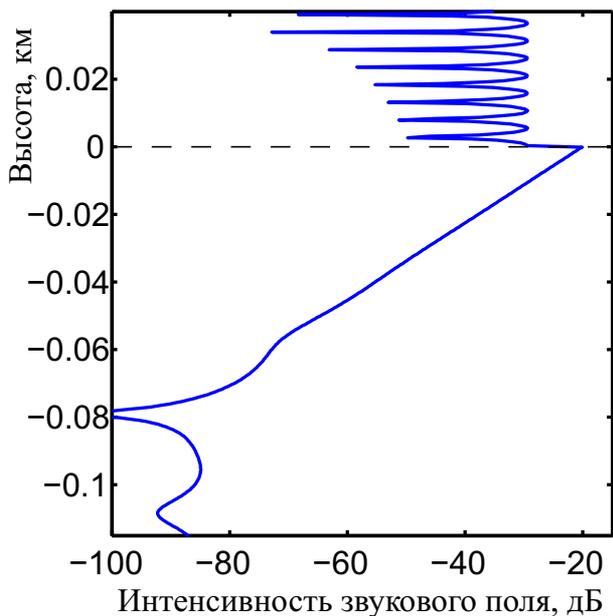


Рис. 2: Вертикальный разрез звукового поля, представленного на рис. 1, на расстоянии 6.91 км

со скоростью звука 1500 м/с и плотностью 1000 кг/м³.

Для угла скольжения 75° наблюдается полное внутреннее отражение (рис. 1а), тогда как для 80° (рис. 1б), можно наблюдать как отраженный, так и прошедший звуковые пучки. Поскольку при формировании звукового пучка присутствуют боковые лепестки, то, несмотря на их низкий уровень, на рис. 1 их можно наблюдать благодаря большому динамическому диапазону 80 дБ. Хорошо виден эффект увеличения давления в боковых лепестках при пересечении границы воздух–вода.

Увеличение давления при прохождении границы воздух–вода можно оценить на вертикальном разрезе

звукового поля рис. 2 на расстоянии, где осевая линия звукового пучка пересекается с границей раздела сред. При пересечении звуковым пучком границы давление на одном шаге расчетной сетки по глубине, практически скачком увеличивается на 9.28 дБ, а затем на расстоянии одной длины волны (50 м) падает на 44.6 дБ. Если бы на границе производная изменения скорости и плотности была бесконечной, то давление должно было бы удвоиться. Возможно, поскольку расчет проводится численным методом и шаг расчета по глубине был равен 0.4 м (на этом шаге модель среды линейно меняет свои свойства от воздуха к воде), изменение давления оказалось несколько больше. Выше границы воздух–вода наблюдается характерная интерференция падающего и отраженного звукового поля.

На рис. 3 представлен профиль эффективной скорости звука и звуковое поле в атмосфере от точечного ненаправленного источника с частотой излучения 1 Гц. В верхнем слое грунта скорость звука меняется от 200 м/с на поверхности до 2000 м/с на глубине 100 м.

Хорошо видны рефразирующие на высотах стратоплаузы и в термосфере звуковые волны. Вдоль земной поверхности звук распространяется в приземном звуковом канале высотой около 1000 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря своей сверхширокоугольности, новая версия программы К. В. Авилова, реализующая метод псевдодифференциального параболического уравнения, позволяет моделировать распространение звука близкое к вертикальному и изучать особенности распространения звука в средах, включающих атмосферу, водную и осадочные толщи, в которых скорость звука изменяется в широких пределах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-3461.

- [1] Avilov K. V. *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2015. **24**. 070003. <http://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/2.0000110>.
- [2] Авилов К. В., Глазов Ю. Е., Косарев О. И. Эффективное вычисление поля Р-SV волн в двумернонеоднородной среде методом псевдодифференциальных параболических уравнений. Тр. 1-й Всероссийской акустической конференции. 2014.
- [3] Авилов К. В., Глазов Ю. Е., Косарев О. И. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения акустогравитационных волн в атмосфере сферической Земли. Тр. 1-й Всероссийской акустической конференции. 2014.

- [4] Авилов К. В. Волны и дифракция–85. IX Всес. симп. по дифракции и распространению волн. Тбилиси: ТГУ, 1985. **2** С. 236.
- [5] Авилов К. В. Акуст. журн. 1995. **41**, вып. 1. С. 5.
- [6] Collins M. D. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993. **93**, P. 1736.
- [7] Collins M. D., Cederberg R. J., King D. B., Chin-Bing S. A. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. **100**, N 7.
- [8] Авилов К. В., Добряков Н. А., Попов О. Е. Доклады X школы–семинара акад. Л. М. Бреховских «Акустика океана». М.: ГЕОС, 2004. С. 27.
- [9] Распространение волн и подводная акустика. Под ред. Келлер Дж. Б., Пападакис Дж. С. М.: Мир, 1980.

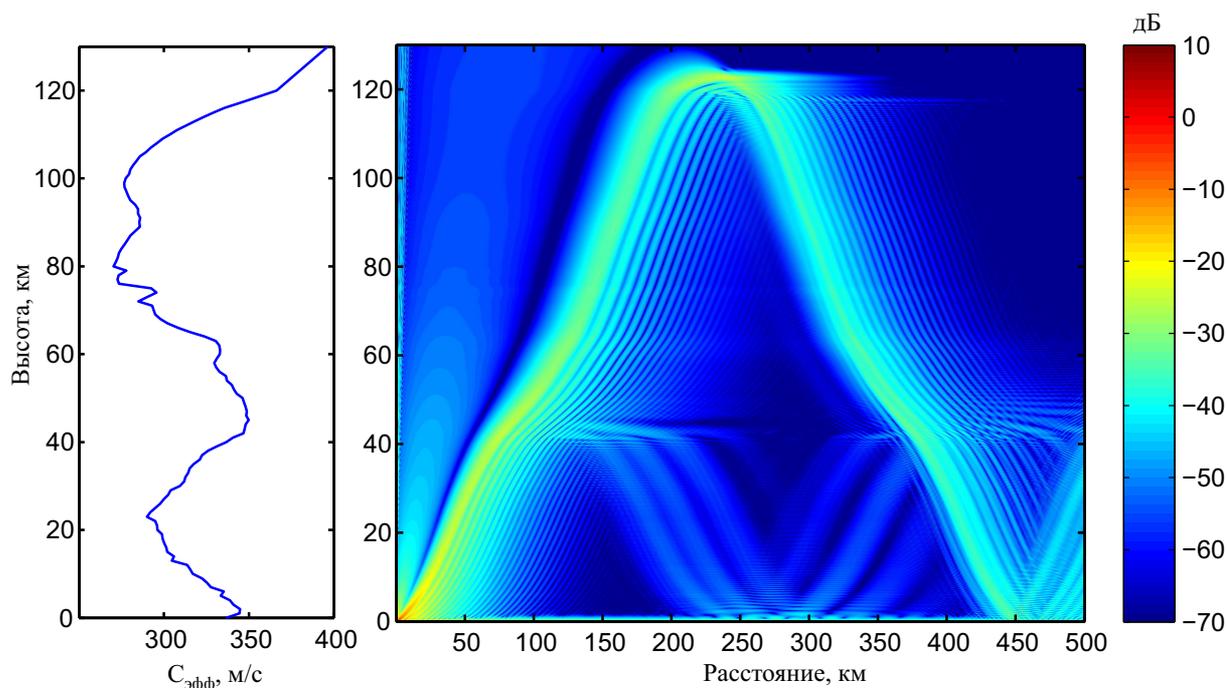


Рис. 3: Профиль эффективной скорости звука и звуковое поле в атмосфере

Calculation of the sound fields in the environment model including simultaneously atmosphere, water and bottom

K. V. Avilov^{1,2,a}, S. N. Kulitchkov^{2,b}, O. E. Popov^{2,c}

¹*A. Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS (IMASH) Moscow, 101990, Russia*

²*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. Moscow 119017, Russia*

E-mail: ^ak.v.avilov@list.ru, ^bsnik1953@gmail.com, ^colegp@mail.ru

This report introduces the description of the program package for calculation of the broadband transfer functions of the environment model including atmosphere, water column and bottom taking into account the dependence of the medium acoustic properties both on vertical and horizontal coordinates by the pseudodifferential parabolic equation technique in one-way approximation without taking into account shear stresses. Calculation examples are included both verifying the package functionality and having some applicable interest.

PACS: 43.28, 43.30.

Keywords: numerical modelling of the sound propagation in ocean and atmosphere, pseudodifferential parabolic equations.

Received 27 June 2017.

Сведения об авторах

1. Авилов Константин Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: k.v.avilov@list.ru.
2. Куличков Сергей Николаевич — доктор физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, зав. лабораторией; тел.: (495) 953-48-76, e-mail: snik1953@gmail.com.
3. Попов Олег Евгеньевич — науч. сотрудник; e-mail: olegp@mail.ru.