А.Н. Серебряный^{1,2}, Н.Р. Рао³, Л.Л. Тарасов²

**ВНУТРИТЕРМОКЛИННАЯ ЛИНЗА НА ШЕЛЬФЕ:
ЕЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ВИДЕНИЕ И ПРОХОЖДЕНИЕ ЧЕРЕЗ НЕЕ
ВНУТРЕННИХ ВОЛН**

*¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36,
Тел.: 8(499)124-59-96, E-mail: serebryany@hotmail.com*

*²АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева»
Россия, 117036, г. Москва, ул. Шверника, 4,
Тел.: 8(499)723-63-00*

³Catholic University of America, Washington, DC, USA

Обсуждаются наблюдения линз теплых и соленых вод на шельфе Японского моря, осуществленные с помощью ADCP, а также традиционными методами. Представлены параметры наблюдавшихся линз, а также данные об их взаимодействии с внутренними волнами. Приводятся результаты численного моделирования прохождения внутренней волны через линзу.

Ключевые слова: внутритермоклинная линза, Японское море, внутренние волны, моделирование, зондирование ADCP, линзы теплых и соленых вод

Введение

Одной из характерных особенностей гидрологической структуры в области шельфа, близкой к точке свала глубин, в Японском море являются линзы теплых и соленых вод, которые по своим размерам относятся к субмезомасштабным образованиям. Были проведены детальные долговременные наблюдения со стоящего на якоре судна за весь цикл прохождения линзы через точку наблюдения [1]. Был зарегистрирован интересный эффект прохождения внутренних волн через линзу, когда проходящие волны не только вызывают вертикальные смещения, но и создают попеременно зоны сжатия и утолщения тела линзы. Позже проведенные измерения с помощью акустического зондирования морской толщи доплеровским акустическим профилометром (ADCP) в заливе Петра Великого подтвердили существование линз в области над шельфом, примыкающей к материковому склону. В докладе обсуждается

один из примеров линзы, зарегистрированной ADCP, а также приводятся результаты моделирования прохождения внутренней волны через линзу.

Акустическое наблюдение линзы. При исследованиях на шельфе Японского моря с помощью ADCP в сентябре 2004 г. нами несколько раз пересекались акустически видимые линзы, по своим параметрам напоминавшие линзу, описанную в [1]. На рис. 1 приведена запись картины эхолокационных контрастов, полученная с помощью ADCP “RioGrande 600 kHz” на разрезе через линзу. Линза была акустически хорошо видна из-за усиленного обратного рассеяния звука, присущего ее телу (коэффициент обратного рассеяния более 60 дБ), по сравнению с окружающими водами (55 дБ). Она имела характерный горизонтальный размер 3 км и толщину в центральной части 4 м. Линза располагалась выше горизонта 29 м при глубине места 60 м. На записи ADCP также были видны вертикальные колебания тела линзы из-за прохождения короткопериодных внутренних волн.

Рис. 1. Акустическое изображение внутритермоклинной линзы по данным измерения ADCP “RioGrande 600 kHz”.

Было проведено специальное исследование воздействия внутренних волн на линзу на основе численного моделирования. Для моделирования использовались параметры линзы и внутренних волн, взятые из вышеупомянутых наблюдений [1]. Наблюдение за линзой в том эксперименте проводилось с заякоренного судна в течение всего времени распространения линзы через точку наблюдения на шельфе. Линза имела диаметр около 6 км. Ее тело было наполнено более теплой и соленой водой по сравнению с окружающими водами. Инверсия температуры в теле линзы достигала почти 1°C , а перепад солёности – 0.6‰ . Толщина

линзы в ее центральной части – 7 м. На рис. 2 представлена эволюция температурной структуры толщи моря и толщины линзы за весь 35-часовой период наблюдения.

Моделирование прохождения внутренней волны через линзу.

Нами было проведено численное моделирование прохождения уединенной внутренней волны через акваторию шельфа, где располагалась линза. Решалась полная система уравнений Навье-Стокса и уравнения диффузии с помощью алгоритма, разработанного в Католическом Университете Америки [2, 3].

Рис. 2. Эволюция температурной структуры толщи моря (вверху) и изменение во времени толщины линзы, проходящей через точку измерения [1].

Рассматривались уравнения движения для несжимаемой, двумерной, вязкой жидкости. Задаваемые параметры линзы, внутренних волн и топографии дна были взяты из реальных данных наблюдений. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Изначально уединенная внутренняя волна высотой 10 м, имеющая форму волны-углубления, движется по глубоководной части шельфа к берегу (рис. 3а). Достигает области шельфа, где находится линза и проходит через нее (рис. 3б), при этом область линзы (область температурной инверсии) разрушается. Далее уединенная волна подходит к прибрежной части шельфа, где происходит уменьшение глубины. В этой области находится зона смены полярности амплитуд внутренней волны. До смены полярности у волны-углубления укручивается задний фронт и уплощается передний. Это известная особенность волн, испытывающих увеличение влияния нелинейности [4]. Далее волна распадается на пучок из двух волн, который движется к берегу уже как пучок волн-возвышений (рис. 3в). Основным результатом моделирования можно считать вывод, что энергии внутренней волны оказывается достаточно для полного перемешивания инверсионной области термоклина, и, таким образом, полного разрушения линзы теплых соленых вод. Волна также передает энергию на фоновые колебания малых амплитуд в шельфовой зоне.

Рис. 3. Результаты численного моделирования прохождения уединенной внутренней волны через линзу.

Заключение

Представлены экспериментальные доказательства существования на шельфе субмезомасштабных вихревых образований – внутритермоклинных линз. Показана возможность их обнаружения и регистрации акустическим методом с помощью ADCP. Численным моделированием продемонстрировано, что прохождение интенсивной уединенной внутренней волны через тело линзы ведет к ее разрушению.

Работа частично поддержана грантом РФФИ №19-05-00715.

Литература

1. Серебряный А.Н. Долгоживущая инверсия температуры и внутренние волны на шельфе // Океанология. 1995. Т. 35. № 4. С. 497–504.
2. Saffarinia K., Kao T.W. A numerical study of the breaking of an internal soliton and interaction with a slope // Dyn. Atmos. Oceans. 1996. Vol. 23. P. 379–391.
3. Pao H.P., Serebryany A.N. Studies of intense internal gravity waves: field measurements and numerical modeling // Advances in Engineering Mechanics Reflections and Outlooks,

In Honor of Theodore T-Y Wu. Eds.: Chuang, Teng and Valentine. New Jersey: World Scientific, 2005. P. 286–296.

4. Серебряный А.Н., Пao К.П. Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переворота на шельфе // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 543–547.

A.N. Serebryany^{1,2}, H.P. Pao³, L.L. Tarasov²

**INTERTHERMOCLINE LENS ON THE SHELF:
ITS ACOUSTICAL VISION AND PASSAGE OF INTERNAL
WAVES THROUGH IT**

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

Nakhimovskiy Prosp., 36, Moscow, Russia, 117997,

Tel.: 8(499)124-59-96, E-mail: serebryany@hotmail.com

²Andreyev Acoustics Institute

Shvernik Str, 4, Moscow, Russia, 117036, Tel.: 8(499)723-63-00,

³Catholic University of America, Washington, DC, USA

Observations of lenses of warm and salty water on the shelf of the Sea of Japan, carried out using ADCP and traditional methods are discussed. The parameters of the observed lenses are presented, as well as data on their interaction with internal waves. The results of numerical simulation of the passage of an internal wave through a lens are presented.

Keywords: intrathermocline lens, Sea of Japan, inland waves, modeling, ADCP sounding, warm and salt water lenses intrathermocline lens, Sea of Japan, inland waves, modeling, ADCP sounding, warm and salt water lenses

Acknowledgment: This work was partially supported by the RFBR grant No. 19-05-00715.

References

1. Serebryany A.N. Long-lived temperature inversion and internal waves on the shelf. *Oceanology*, 1995, Vol. 35, No. 4, pp. 497–504.
2. Saffarinia K. and Kao T.W. A numerical study of the breaking of an internal soliton and interaction with a slope. *Dyn. Atmos. Oceans*, 1996, Vol. 23, pp. 379–391.
3. Pao H.P. and Serebryany A.N. Studies of intense internal gravity waves: field measurements and numerical modeling. *Advances in Engineering Mechanics Reflections and Outlooks*, In Honor of Theodore T-Y Wu, Eds.: Chuang, Teng and Valentine, New Jersey: World Scientific, 2005, pp. 286–296.
4. Serebryany A.N. and Pao K.P. Passage of a nonlinear internal wave through a turning point on the shelf. *DAN*, 2008, Vol. 420, No. 4, pp. 543–547.