———— ОКЕАНОЛОГИЯ —

УДК 551.466.8

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ ВТОРОЙ МОДЫ В ЧЁРНОМ МОРЕ А. Н. Серебряный^{1,2,*}, Е. Е. Химченко^{1,2}

Представлено академиком РАН Р.И. Нигматуллиным 16.04.2019 г.

Поступило 19.04.2019 г.

Представлены результаты первых наблюдений внутренних волн 2-й моды в Чёрном море. Измерения проводились на крымском шельфе с платформы МГИ в июле 2011 г. В период после сгона, когда проводились измерения, в прибрежной зоне наблюдались сначала интенсивные инерционные внутренние волны 1-й моды, а затем 2-й. Колебания второй моды наиболее ярко проявлялись в вертикальных смещениях водного столба, достигавших амплитуд 10 м. Черты 2-й моды также были отмечены во флуктуациях горизонтальной составляющей течений. Наряду с регистрацией инерционных внутренних волн 2-й моды отмечалось также появление короткоперидных внутренних волн 2-й моды.

Ключевые слова: инерционные внутренние волны, внутренние волны второй моды, шельф, Чёрное море. **DOI:** https://doi.org/10.31857/S0869-56524885555-559

Внутренние волны в океане, как отмечал В. Манк [1], явление так же широко распространённое, как и ветровые волны, даже более, потому что никто из исследователей ещё не сообщал о внутриволновом штиле. Основным источником генерации внутренних волн в океане служат приливообразующие силы. До недавнего времени считалось, что высшие моды внутренних волн, существование которых предсказывает теория, практически не встречаются в реальной океанской среде. Действительно сообщалось только о повсеместных наблюдениях в океане внутренних волн первой моды [2]. В последние годы стали поступать сведения о наблюдениях внутренних волн второй моды в отдельных районах Мирового океана, в частности в Индийском океане [3, 4], в Южно-Китайском море [5, 6], на Атлантическом шельфе США [7] и шельфе Австралии [8]. Главное отличие 1-й моды от 2-й заключается в том, что внутренняя волна 1-й моды смещает синхронно все слои водной толщи (попеременно во времени вверх и вниз), в то время, когда для второй моды происходят противофазные смещения слоёв водной толщи (часть слоёв водной толщи движется вверх, при этом другая часть слоёв — вниз или наоборот). Все вышеперечисленные случаи наблюдения волн 2-й моды были связаны с приливной природой происхождения волн. Один раз было отмечено появление внутренних инерционных волн 2-й моды после воздействия урагана на шельфе Атлантики [9]. В измерениях, проводимых в шельфовой зоне Чёрного моря в 2011 г., мы столкнулись со случаем внутренних волн 2-й моды. Ранее внутренние волны 2-ой моды в Чёрном море не регистрировались. Чёрное море как замкнутое море имеет слабые приливы, и, как следствие, отличается в среднем относительно невысокими амплитудами внутренних волн [10]. В то же время здесь наблюдаются интенсивные инерционные, а также интенсивные короткопериодные внутренние волны, чья генерация связана с неприливными механизмами [11, 12]. В представляемых здесь данных были впервые выявлены колебания второй моды в длиннопериодных внутренних волнах инерционного периода на крымском шельфе Чёрного моря. Отмечались также колебания 2-й моды и в короткопериодных внутренних волнах.

Наблюдения за изменчивостью температуры водного слоя и течениями проводились нами со стационарной океанографической платформы МГИ в период с 9 по 18 июля 2011 г. Платформа расположена в шельфовой зоне Чёрного моря у Южного берега Крыма на расстоянии 600 м от берега при глубине места 28 м. Проводились ежечасные зондирования от поверхности до дна моря минизондом SVP фирмы Valeport, снабжённым датчиками температуры, давления и скорости звука. Измерение скорости течений проводилось при помощи ADCP "Rio Grande 600 kHz", укреплённого на платформе, смотрящим вниз. Перед началом наблюдений в районе произошёл сгон прибрежных вод, в результате чего в море установилась гидрологическая структура с приповерхностным термоклином и поверхностной температурой 17-19 °С. С 9 июля стояла тихая погода и происходил постепенный прогрев водной толщи, что проявлялось в монотонном заглублении среднего положения термоклина на протяжении 10 дней. При этом к концу наблюдений поверхностная

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва

²АО "Акустический институт им. Н.Н. Андреева", Москва

^{*}E-mail: serebryany@hotmail.com



Рис. 1. Колебания температуры водной толщи с инерционным периодом 17 ч с 9 по 18 июля 2011 г. с одновременным заглублением среднего положения термоклина с горизонта 5 до 25 м.



Рис. 2. Внутренние волны инерционного периода 1-й моды. Колебания температуры водной толщи 9–10 июля 2011 г. (слева). Вертикальные профили температуры в характерные моменты времени (справа).

температура возросла с 17 до 26 °С, а придонная с 10 до 13 °С. На протяжении всего периода наблюдений скорость течений изменялась незначительно и была в пределах 20–30 см/с с преобладанием вдольбереговой северо-западной направленности. На рис. 1 представлен временной разрез температуры водной толщи по данным ежечасных зондирований за весь период измерений с 9 по 18 июля 2011 г. В течение всего периода наблюдений термоклин вместе с уже упоминавшимся заглублением своего среднего положения совершал значительные по размаху колебания по всей толще водного столба с периодом, близким к локальному инерционному, который для данного района составляет 17,2 ч. Характер инерционных колебаний термоклина первой половины наблюдений отличался от второй. Начиная приблизительно с 14 июля, когда среднее положение термоклина достигло глубины середины водной толщи, инерционные колебания термоклина 1-й моды сменились на 2-ю. Рассмотрим первую половину периода наших наблюдений. На рис. 2 представлен ход изотерм по данным ежечасных зондирований продолжительностью 38 ч с 9 июля. Хорошо видны 17-часовые синхронные вертикальные движения всех слоёв водной толщи, что свидетельствует о подходе в прибрежную зону внутренних волн 1-й моды. Вертикальный профиль температуры под воздействием внутренней волны изменяется так, что термоклин из придонного положения (подошва волны) поднимается к поверхности в фазе гребня волны, а



Рис. 3. Внутренние волны инерционного периода 2-й моды. Колебания температуры водной толщи 16–17 июля 2011 г. (слева). Вертикальные профили температуры в характерные моменты времени (справа).

затем снова опускается в придонное положение. На записи видны обострённые подошвы длинных волн, что является проявлением их нелинейности. Размах колебаний термоклина достигал 15-20 м. Подобные синхронные смещения термоклина прослеживались на пяти инерционных циклах до 13 июля, после чего инерционные колебания термоклина 1-й моды поменялись на колебания 2-й моды, при которых верхняя и нижняя части водного столба двигались в противофазе. Эти колебания проявились как в данных температуры, так и скорости звука, и в данных течений. За несколько дней до перехода инерционных колебаний термоклина от 1-й моды ко второй отмечались также короткопериодные противофазные вертикальные смещения водных слоёв (см., например, на рис. 2 волна около 20:00 10 июля).

На рис. 3 приведён пример инерционной внутренней волны 2-й моды, наблюдавшейся 16-17июля, где отчётливо видно, как за 17-часовой период с 6 ч с глубин 15-16 м происходит поднятие водных слоёв до горизонта 7-8 м, а затем заглубление в исходное положение. Движение вниз ниже горизонта 15 м слабовыраженное. Но уже в следующем инерционном цикле движение нижней части водной толщи существенно заметнее, а верхней части слабее. На рис. 3 показаны вертикальные профили температуры, снятые при прохождении подошвы (в 6 и 19 ч) и гребня (в 14 ч) инерционной внутренней волны. Хорошо видно, что прохождение волны 2-й моды преобразует вертикальный

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 488 № 5 2019

профиль с термоклином в середине водной толщи в профиль с двумя термоклинами, разнесёнными вверх и вниз. Зарегистрированные нами волны 2-й моды относятся к типу волн растяжения. Этот тип внутренних волн 2-й моды встречается наиболее часто на шельфе океана в отличие от волн сжатия.

Представляет интерес сравнение экспериментально наблюдённых параметров внутренних волн 2-й моды с тем, что предсказывает теория. Для этого был проведён расчёт собственных функций инерционных внутренних волн 2-й моды путём численного решения уравнения внутренних волн с использованием программы В.В. Гончарова [13], в которой в качестве исходных данных задаётся послойно невозмущённый вертикальный профиль плотности среды. На рис. 4 показаны экспериментальные и рассчитанные нормированные собственные функции внутренней волны 2-й моды от 16-17 июля для вертикальных и горизонтальных смещений во внутренних волнах. Сопоставление теоретических и наблюдаемых величин вертикальных смещений во внутренних волнах показывает хорошее совпадение. В то же время для горизонтальных смещений совпадение хуже, хотя, как и в теории, у наблюдаемой волны дважды меняется знак горизонтальной компоненты течений. В середине водной толщи направление потока ориентировано на север, в нашем случае это береговая направленность, а в верхних и нижних слоях в противоположную сторону, при этом реальные горизонтальные потоки течений



Рис. 4. Собственные функции инерционных внутренних волн 2-ой моды —наблюдённых (пунктир) и расчётных (сплошная линия).

существенно слабее модельных. Последнее объясняется близостью берега, где, как известно, преобладают течения вдольбереговой, а не береговой направленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было представить фактические данные о наблюдении внутренних волн инерционного периода второй моды в Чёрном море. Нами были проведены ещё несколько аналогичных экспериментов по измерению внутренних волн в Чёрном море в последующие летние сезоны с океанографической платформы МГИ, в которых мы также регистрировали внутренние волны 2-й моды инерционного периода, а также короткопериодные волны 2-й моды (периоды минуты – десятки минут). Возникает вопрос о причинах генерации этих волн. Зарегистрированный нами факт появления волн 2-й моды в условиях, когда термоклин оказался ближе расположенным ко дну, указывает на механизм, описанный в [14], где появление 2-й моды происходит при разрушении длинной нелинейной внутренней волны 1-й моды, движущейся вверх по склону. Другой альтернативный механизм, подходящий к нашему случаю, смоделированный численно, заключается во взаимодействии длинной внутренней волны 1-й моды с пересекающим её мезомасштабным вихрем. Согласно моделированию [15], в результате взаимодействия волны и вихря генерируется 2-я мода внутренней волны. Для Чёрного моря подобная ситуация весьма вероятна, поскольку вихри (мезо- и субмезомасштабные) — это типичное явление прибрежной и шельфовой зон, куда распространяются внутренние волны инерционного периода.

Источник финансирования. Работа была выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149–2019–0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Munk W.H.* Internal waves and small-scale processes // Evolution of physical oceanography. Cambridge, 1981.
- 2. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А.* // Океанология. 2004. Т. 44. № 6. С. 805-810.
- 3. *Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* // Deep Sea Res. Pt. I. 1995. V. 42. № 11/12. P. 2075–2091.
- Da Silva J.C.B., New A.L., Magalhaes J.M. // Deep-Sea Res. Pt. I. 2011. V. 58. P. 229–240.
- Yang Y.J., Fang Y.C., Chang M.-H., Ramp S.R., Kao C.-C., Tang T.Y. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C10003. DOI:10.1029/2009JC005318
- Ramp S.R., Yang Y.J., Reeder D.B., Bahr F.L.// J. Geophys. Res. 117. C03043. DOI:10.1029/2011JC007662, 2012
- Shroyer E.L., Moum J.N., Nash J.D. // J. Geophys. Res: Oceans. 2010. V.115. C7.
- Rayson M.D., Jones N.L., Ivey G.N. // J. Phys. Ocean. 2019. V. 49. № 1. P. 328.
- Mayer D.A., Mofjeld H.O., Leaman K.D. // J. Phys. Ocean. 1981. V.11. P. 87–106.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 488 № 5 2019

559

- 10. Иванов В.А., Серебряный А.Н. // Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
- 11. Серебряный А.Н., Иванов В.А. // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2013. № 3. С. 34-45.
- 198.
- 13. Гончаров В.В., Лейкин И.А. // Океанология. 1983. T. 23. № 2. C. 210.
- 14. Helfrich K.R., Melville W.K. // J. Fluid Mech. 1986. V. 167. P. 285-308.
- 12. Serebryany A. // Hydroacoustics. 2014. V. 17. P. 187- 15. Dunphy M., Lamb K.G. // J. Geophys. Res. Oceans. V. 119. P. 523-536. DOI:10.1002/2013JC009293

INTERNAL WAVES OF MODE 2 IN THE BLACK SEA N. Serebryany^{1,2}, E. E. Khimchenko^{1,2}

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation ²Andrevev Acoustics Institute JSC, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS R.I. Nigmatullin April 16, 2019

Received April 19, 2019

The results of the first observations of mode 2 internal waves in the Black Sea are presented. The measurements were carried out on the Crimean shelf from the MGI platform in July 2011. In the period after the sweep, when measurements were taken, firstly mode 1 inertial internal waves were observed, and then mode 2 one. The oscillations of mode 2 were most pronounced in the vertical displacements of the water column, reaching amplitudes of 10 m. The features of mode 2 were also noted in fluctuations of the horizontal component of the currents. Along with the registration of mode 2 inertial internal waves, the appearance of short-period internal waves of mode 2 was also noted.

Keywords: inertial internal waves, internal waves of mode 2, shelf, Black Sea,