

Наблюдения внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях

Е. И. Свергун^{1, 2, ✉}, А. В. Зимин^{1, 2, 3}, Г. В. Жегулин¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт водных проблем севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

✉ egor-svergun@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.11.2021; одобрена после рецензирования 24.12. 2021;
принята к публикации 27.01.2022.

Аннотация

Цель. Описание комплексной методики выделения внутренних волн второй моды и рассмотренные случаи их регистрации в ходе летних экспедиционных исследований, выполненных в прибрежных районах Белого и Баренцева морей, – цель данной работы.

Методы и результаты. Исходными данными послужили многочасовые серии CTD-измерений с высокой дискретностью по времени в прибрежных стратифицированных районах в летние сезоны 2009–2017 гг. Рассматривались волны длительностью 5–60 мин с высотами более 1 м. Обработка наблюдений велась с использованием комплекса вейвлет- и модового анализов. Кросс-вейвлет-спектр вертикальных смещений изотерм демонстрировал статистически значимое увеличение взаимной спектральной мощности с полной противофазностью, связанное со второй модой внутренних волн. Положения максимумов амплитуды волн второй моды на записях колебаний изотерм дополнительно проверялись путем расчета гидростатических нормальных вертикальных мод. Показано, что в приповерхностном сезонном пикноклине Белого моря внутренние волны второй моды регистрировались в виде одиночных волн «растяжения» со средней длительностью 10 мин и амплитудой 2 м. В Баренцевом море внутренние волны второй моды регистрировались в виде как одиночных волн «растяжения», так и последовательных волн «сжатия» и «растяжения» со средней длительностью 20 мин и амплитудой до 1,5 м. Установлено, что переменяемость внутренних волн второй моды в рассмотренных районах Белого и Баренцева морей не превышает 1%.

Выводы. В результате анализа шестилетнего архива данных экспедиционных наблюдений впервые описаны случаи регистрации внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях. Анализ более 350 ч записей колебаний температуры позволил обнаружить лишь 5 случаев проявления внутренних волн второй моды в виде волн «растяжения» и «сжатия» суммарной длительностью не более 1,5 ч, что указывает на крайне редкую частоту встречаемости таких волн на описанных акваториях.

Ключевые слова: внутренние волны, вторая мода, контактные наблюдения, вейвлет-анализ, Белое море, Баренцево море

Благодарности: обработка измерений в Белом море выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2021-0014; обработка измерений в Баренцевом море выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-35-90054 Аспиранты.

Для цитирования: Свергун Е. И., Зимин А. В., Жегулин Г. В. Наблюдения внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 185–195. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-185-195

Observations of the Second Mode Internal Waves in the White and Barents Seas

E. I. Svergun^{1,2,✉}, A. V. Zimin^{1,2,3}, G. V. Zhegulin¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia

✉ egor-svergun@yandex.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to describe a comprehensive technique for detecting the second mode internal waves, and to consider the cases of their record during the *in situ* measurements carried out in the coastal areas of the White and Barents seas in summer.

Methods and Results. The initial data were formed based on the series of frequent many-hour CTD measurements performed in the coastal stratified areas in the summer seasons, 2009–2017. The waves, duration of which was 5–60 min and the heights exceeded 1 m, were considered. The observations were processed using the complex of wavelet- and mode-analyses. The cross-wavelet spectrum of the isotherms' vertical displacements demonstrated a statistically significant increase in the cross-spectral power with a complete phase mismatch associated with the second mode of internal waves. The positions of the amplitude maxima of the second mode internal waves on the records of the isotherm oscillations were additionally checked by calculating the hydrostatic normal vertical modes. It is shown that in the near-surface seasonal pycnocline of the White Sea, the second mode internal waves were recorded as the single “convex” ones with average duration 10 min and amplitude 2 m. In the Barents Sea, such waves were observed both as the single “convex” waves, and as the “concave” and “convex” sequential ones with average duration 20 min and amplitude up to 1.5 m. It was established that in the considered areas of the White and Barents seas, the intermittency of the second mode internal waves did not exceed 1%.

Conclusions. Analysis of the archival data on the six-year-long *in situ* observations has resulted in first description of the cases when the second mode internal waves had been recorded in the White and Barents seas. Having been analyzed, more than 350-hour records of temperature fluctuations permitted to detect only 5 cases demonstrating the second mode internal waves in a form of the “convex” and “concave” ones with their total duration not exceeding 1.5 hours. This indicates that occurrence of such waves are extremely rare in the water areas under consideration.

Keywords: internal waves, second mode, contact measurements, wavelet-analysis, White Sea, Barents Sea

Acknowledgements: the measurements in the White Sea were processed within the framework of the state assignment of IO RAS No. FMWE-2021-0014; the measurements in the Barents Sea were processed with a support of the RFBR grant No. 20-35-90054 Aspiranty.

For citation: Svergun, E.I., Zimin, A.V. and Zhegulin, G.V., 2022. Observations of the Second Mode Internal Waves in the White and Barents Seas. *Physical Oceanography*, 29(2), pp. 172-181. doi:10.22449/1573-160X-2022-2-172-181

Введение. Внутренние волны (ВВ) практически всегда существуют в области приповерхностного пикноклина (термоклина) со значительным градиентом плотности [1], формирующегося в морях умеренной и субарктической климатических зон в теплый период года. По результатам вертикального зондирования водной толщи с высокой дискретностью по времени можно качественно оценить модовый состав ВВ по направлению гребней или впадин волн на получаемых пространственно-временных панорамах колебаний характеристик гидрофизических полей (напр., температуры) [2]. Наиболее часто встре-

чаемые и хорошо идентифицируемые ВВ первой моды проявляются как единое колебание столба воды в области пикноклина (термоклина). Они в зависимости от фазы бывают двух типов – волны «повышения» и волны «понижения». Внутренние волны второй моды наблюдаются в виде двух модификаций – это волны «растяжения» и волны «сжатия» [3]. В первом случае в верхней части водного столба имеет место поднятие изопикн (изотерм), в нижней – заглупление. Во втором случае, наоборот, в верхних слоях происходит опускание изопикн (изотерм), в нижнем – их подъем.

Внутренние волны второй моды зарегистрированы во многих районах Мирового океана: в Южно-Китайском море [4], в Индийском океане [5, 6], в Андаманском море [7], на североамериканском шельфе Атлантического океана [8], вблизи российского побережья Черного моря [9]. Появление таких волн в глубоководных районах Мирового океана, где присутствуют сезонный и главный термоклин, связано с образованием лучей внутреннего прилива [10]. В относительно мелководных северных морях России, где сезонный термоклин прижат к поверхности, случаи регистрации ВВ второй моды до настоящего времени не описаны.

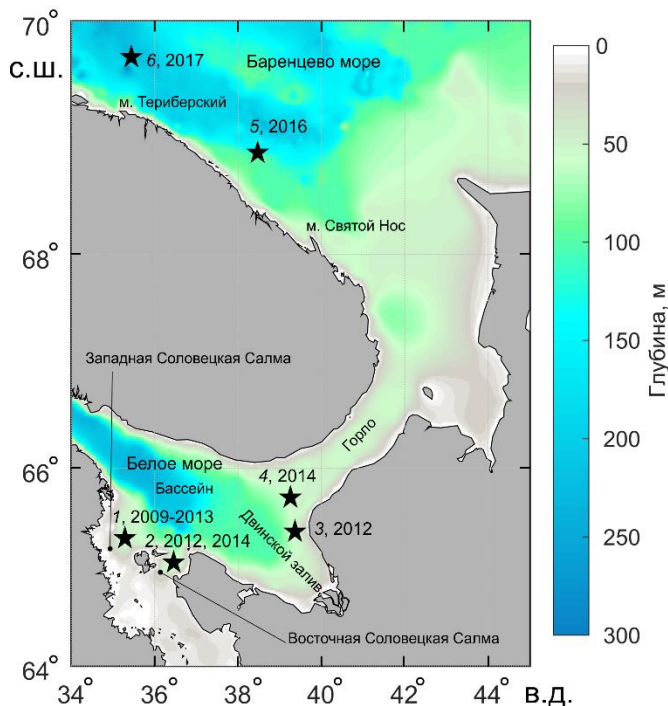
Цель данной работы – по результатам анализа многолетнего архива данных экспедиционных исследований Санкт-Петербургского филиала Института океанологии с использованием оригинальной методики описать случаи регистрации внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях.

Материалы и методы их обработки. Материалами для данной работы послужили результаты длительных (14–80 ч) высокоразрешающих по времени и глубине контактных изменений температуры и плотности морской воды. Измерения выполнялись в Белом море [11] в июне – августе 2009 – 2014 гг. (районы 1–4 на рис. 1) и в Баренцевом море [12, 13] в августе 2016–2017 гг. (районы 5, 6 на рис. 1). В Белом море измерения проводились в области глубин 40–65 м с заякоренного судна, в Баренцевом море – в области глубин 100–150 м с судна, лежащего в дрейфе (скорость дрейфа не превышала 0,2 узла). Наблюдения включали повторяющиеся зондирования (сканирования) водной толщи от поверхности до заданного горизонта. На полигонах в Белом море использованы CTD-зонды *SBE-25* (США) и *CTD90M* (Германия), в Баренцевом море – зонды *CastAway* (США) и *SBE-25*. Один цикл сканирования «спуск – подъем» зонда занимал 1–2 мин в зависимости от охватываемого диапазона глубин.

На записях колебаний температуры проявления ВВ второй моды предварительно регистрировались визуально как протекающие в противофазе колебания групп изотерм в области пикноклина. Для выделенных участков характерных изотерм оценивались их глубины залегания, которые затем подвергались вейвлет-анализу для проверки совпадения противофазы колебаний. В качестве базисной функции использовался комплексный вейвлет Морле, а мерой локальной взаимосвязи служили оценки мощности вейвлет-когерентности аналогично тому, как это было сделано в [14].

Для подтверждения факта возможности существования ВВ второй моды на выделенных глубинах по осредненному за несколько часов профилю плотности выполнялся расчет гидростатических нормальных вертикальных мод с использованием конечно-разностного алгоритма с условиями жесткой крыш-

ки, плоского дна и произвольной стратификации [15, 16]. При наличии противофазных колебаний изотерм на глубинах, соответствующих максимумам амплитуды ВВ второй моды, предполагалось, что на записи корректно зарегистрированы проявления таких волн.

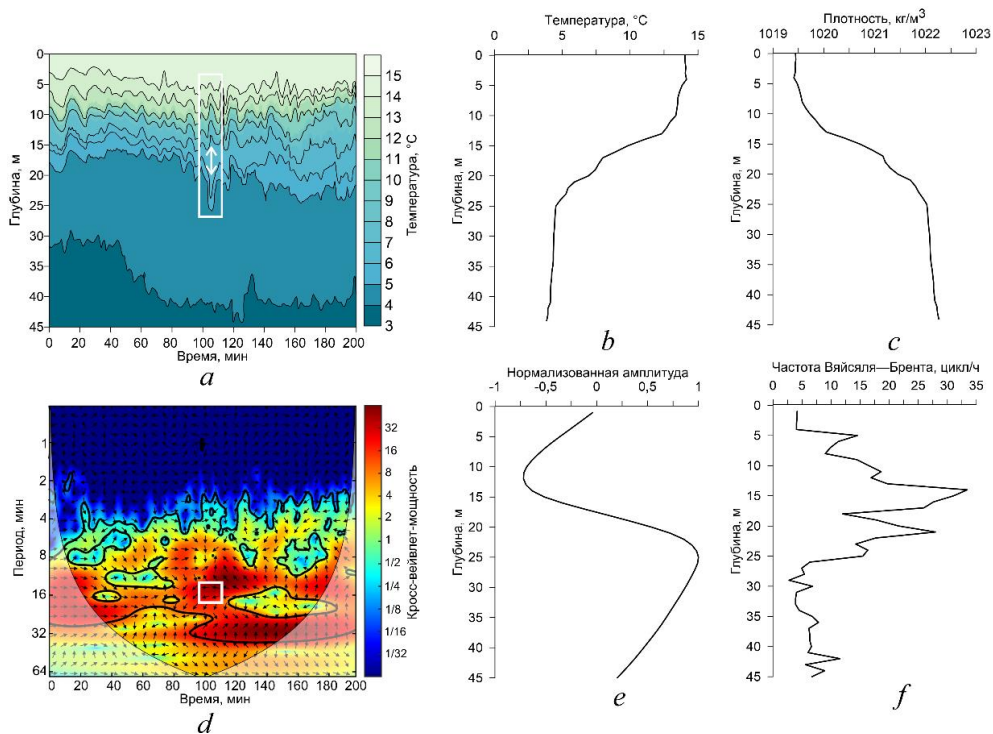


Р и с. 1. Схема расположения районов измерений (1–6, обозначены звездочкой) в Белом и Баренцевом морях, совмещенная с картой глубин

Fig. 1. Scheme of location of the measurement areas (1–6, denoted by the asterisks) in the White and Barents seas combined with the depth map

Для каждого выделенного таким способом колебания, ассоциируемого с ВВ второй моды, определялись высота и длительность. Методика расчета характеристик ВВ была аналогична примененной в работе [17] для анализа ВВ первой моды, согласно которой рассматривались колебания длительностью 5–60 мин и высотами более 1 м. Затем рассчитывалась временная перемежаемость ВВ как отношение в процентах времени существования ВВ второй моды к общему времени записей в каждой точке измерений. Попутно для сравнительной оценки на тех же полигонах, где было выявлено присутствие ВВ второй моды, оценивалась временная перемежаемость внутренних волн первой моды, присутствие которых также оценивалось по методике из [17].

Натурные наблюдения ВВ второй моды. Проявления волн второй моды в виде одиночных колебаний или групп из двух колебаний были зарегистрированы в рассматриваемых морях. На рис. 2 показан пример регистрации ВВ второй моды по данным наблюдений в Белом море на основании описанной выше методики.



Р и с. 2. Пример регистрации ВВ второй моды в Белом море в районе *I*: *a* – фрагмент записи колебаний температуры от 18.07.2012 г. (белый прямоугольником отмечены колебания ВВ второй моды); *b* – усредненный за 2 ч вертикальный профиль температуры; *c* – усредненный за 2 ч вертикальный профиль плотности; *d* – кросс-вейвлет-спектр мощности колебаний изотерм 7 и 6°C; *e* – расчетный профиль второй нормализованной вертикальной моды ВВ длительностью 15 мин; *f* – вертикальный профиль частоты Вэйсälä – Брента

Fig. 2. An example of record of the second mode IW in the White Sea in region *I*: *a* – fragment of the temperature fluctuations recorded on 18.07.2012 (white rectangle marks fluctuations of the second mode IW); *b* – temperature vertical profile averaged over two hours; *c* – density vertical profile averaged over two hours; *d* – cross-wavelet power spectrum of the 7°C and 6°C isotherms' oscillations; *e* – calculated profile of the 2nd normalized vertical mode of IW with the 15 min duration; *f* – vertical profile of the Brunt-Väisälä frequency

Из рис. 2, *a* видно, что примерно на 100-й минуте от начала измерений регистрируются ярко выраженные противофазные колебания изотерм, затрагивающие толщу воды в диапазоне 5–25 м. Амплитуда колебаний минимальна на глубине ~ 15 м и растет в направлении вверх и вниз, достигая максимума 2 м на глубине 12 и 24 м. Длительность противофазных колебаний составляет ~ 15 мин. До момента регистрации ВВ второй моды наблюдаются незначительные колебания изотерм с амплитудой ~ 1 м.

Вертикальные профили температуры и плотности, представленные на рис. 2, *b*, *c*, указывают на наличие ярко выраженного термоклина в слое 10–25 м, который совпадает с пикноклином.

Рис. 2, *d* демонстрирует результаты применения вейвлет-анализа к колебаниям изотерм 6 и 7°C: сплошные черные линии отделяют области краевых эффектов, жирные линии ограничивают области с взаимным кросс-вейвлет-

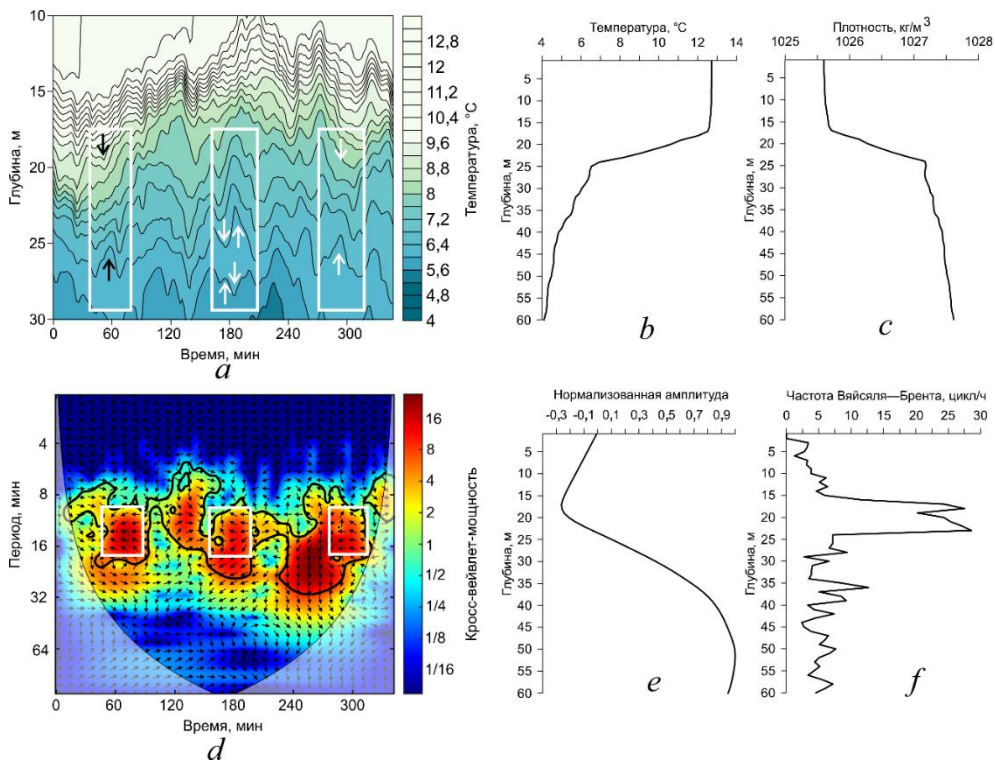
спектром и вейвлет-когерентностью, отличными от нуля на уровне значимости 0,95 по отношению к красному шуму. Стрелки на рисунке показывают относительную фазу колебания: вправо – колебания находятся в фазе; влево – колебания находятся в противофазе. Расчеты кросс-вейвлет-спектра вертикальных смещений изотерм показывают статистически значимое увеличение взаимной спектральной мощности с полной фазовой рассогласованностью длительностью ~ 15 мин примерно на 100-й минуте измерений, что, согласно принятой методике, указывает на регистрацию ВВ второй моды (область обозначена на рис 2, *d* белым прямоугольником).

Максимумы амплитуды ВВ второй моды (рис. 2, *e*) располагаются на горизонтах 12 и 25 м, весьма близко к расположению максимумов вертикальной амплитуды противофазных колебаний, зарегистрированных по данным контактных наблюдений, что, исходя из допущений методики, подтверждает корректность регистрации колебаний как ВВ второй моды. Отметим, что дополнительным подтверждением правильности такого допущения может служить рис. 2, *f*, где значения частоты Вайсяля – Брента больше 5 цикл/ч (при которых могут существовать волны длительностью 15 мин) наблюдаются в диапазоне глубин 10–25 м.

Приведенный анализ позволяет утверждать, что в слое приповерхностного пикноклина (термоклина) проявляется ВВ второй моды в виде одиночной волны «растяжения».

На рис. 3 приведены примеры регистрации ВВ второй моды в Баренцевом море.

Запись, показанная на рис. 3, *a*, интересна тем, что она является единственной из рассмотренных, где противофазные колебания изотерм регистрируются трижды: на 60-й, 180-й и 300-й минуте от начала измерений. На 60-й минуте регистрируется выраженное одиночное колебание «сжатия», которое прослеживается в диапазоне глубин 18–28 м. Минимум амплитуды регистрируется на глубине ~ 22 м, а максимальное значение амплитуды, составляющее 1 м, достигается на горизонтах 18 и 27 м. Длительность противофазных колебаний составляет ~ 20 мин. Примерно на 180-й минуте измерений сначала регистрируется менее выраженное колебание «сжатия», а затем ярко выраженное колебание «растяжения». Амплитуда данных колебаний минимальна на горизонте 26 м, а максимальное значение амплитуды, составляющее 1,5 м, наблюдается на горизонте 20 м. Несмотря на ярко выраженный противофазный характер колебаний, положение второго максимума амплитуды не удается выявить, вероятнее всего, вследствие узкого диапазона охвата водной толщи (10–30 м) данными зондирований для достижения интервала между зондированиями ~ 1 мин. Длительность противофазных колебаний, как и на 60-й минуте измерений, составляет ~ 20 мин. На 300-й минуте регистрируется одиночное колебание «сжатия», сходное по характеристикам с колебанием на 60-й минуте: минимум амплитуды регистрируется на глубине ~ 23 м, а максимальное значение амплитуды, составляющее 1 м, достигается на горизонтах 19 и 26 м. Колебание прослеживается в диапазоне глубин 18–28 м, его длительность составляет ~ 20 мин.



Р и с. 3. Пример регистрации ВВ второй моды в Баренцевом море в районе 5: *a* – фрагмент записи колебаний температуры от 15.08.2016 г. (белыми прямоугольниками отмечены колебания ВВ второй моды); *b* – усредненный за время записи вертикальный профиль температуры; *c* – усредненный за время записи вертикальный профиль плотности; *d* – кросс-вейвлет-спектр мощности колебаний изотерм 5,8 и 6,4°C; *e* – расчетный профиль второй нормализованной вертикальной моды ВВ длительностью 20 мин; *f* – вертикальный профиль частоты Вайясяля – Брента **F i g. 3.** An example of record of the second mode IW in the Barents Sea in region 5: *a* – fragment of temperature fluctuations recorded on 15.08.2016 (white rectangles mark fluctuations of the second mode IW); *b* – the temperature vertical profile averaged over the record period; *c* – density vertical profile averaged over the record period; *d* – cross-wavelet power spectrum of the 5.8°C and 6.4°C isotherms’ oscillations; *e* – calculated profile of the 2nd normalized vertical mode of IW with the 20 min duration; *f* – vertical profile of the Brunt-Väisälä frequency

Вертикальные профили температуры и плотности на рис. 3, *b, c* указывают на наличие высокоградиентного термоклина в слое 20–25 м, который совпадает с пикноклином.

Рис. 3, *d* демонстрирует результаты применения вейвлет-анализа к колебаниям изотерм 5,8 и 6,4°C. Расчеты кросс-вейвлет-спектра вертикальных смещений изотерм показывают статистически значимое увеличение взаимной спектральной мощности с полной фазовой рассогласованностью в диапазоне длительностей 10–20 мин в окрестности 60-й, 180-й и 300-й минут измерений, что указывает на регистрацию ВВ второй моды. Области фазовой рассогласованности обозначены на рис. 3, *d* белыми прямоугольниками.

Из рис. 3, *e* видно, что максимумы амплитуд ВВ второй моды располагаются на горизонтах 18 и 50 м, узловая точка – на горизонте 25 м. Положения

верхнего максимума и узловой точки, полученные по результатам анализа записи колебаний температуры, весьма близки к их теоретическому положению на профиле ВВ второй нормализованной вертикальной моды. Расположение же нижнего максимума на записи не удастся выявить, как было указано выше, в связи с узким диапазоном глубин, охватываемым зондированиями. Выявленное совпадение положений максимума амплитуды и узловой точки противофазных колебаний на теоретическом профиле и в данных контактных наблюдений может служить подтверждением регистрации ВВ второй моды. Дополнительное подтверждение найдем на рис. 2, *f*, где значения частоты Вэйсяля – Брента больше 4 цикл/ч (при которых могут существовать волны длительно-стью 20 мин) наблюдаются в широком диапазоне глубин 10–45 м.

Таким образом, результаты анализа данных контактных наблюдений в Баренцевом море позволили выявить одновременное присутствие как волн «сжатия», так и волн «растяжения» на записи колебаний температуры ВВ второй моды.

Подобный анализ был выполнен для всего массива наблюдений, его результаты приведены в таблице, согласно которой колебания, идентифицируемые как ВВ второй моды, проявлялись только в двух районах, 1 и 5 (рис. 1). Анализ остальных измерений не позволил выделить присутствие ВВ второй моды, несмотря на значительную продолжительность измерений. Колебания ВВ второй моды в Белом море наблюдались только в районе Западной Соловецкой Салмы в виде одиночных волн. В 2009 г. они прослеживались в слое 10–22 м, в 2012 г. – в слое 5–33 м, в эти годы узловые точки с минимальной амплитудой наблюдались немного ниже среднего положения термоклина. В Баренцевом море, около о. Харлов, рассматриваемые колебания были зарегистрированы в виде одиночных или последовательных волн в слое 18–27 м.

В Белом море все зарегистрированные случаи проявления ВВ второй моды в соответствии с классификацией, приведенной в [3], являются волнами «растяжения». В Баренцевом море регистрировались как волны «растяжения», так и волны «сжатия». Стоит отметить, что районы проведения измерений находились на расстоянии 15–25 миль от неоднородностей донной топографии: в Белом море это свал глубин на границе Западной Соловецкой Салмы и Бассейна, в Баренцевом море – свал глубин севернее м. Святой Нос. Указанные неоднородности можно считать областями генерации ВВ второй моды за счет взаимодействия с ними приливного потока.

Из таблицы видно, что ВВ второй моды являются редким явлением. Они были обнаружены только в четырех из 12 рассмотренных случаев многочасовых наблюдений. Для выявленных случаев оказалось, что перемежаемость ВВ второй моды в 40–120 раз меньше, чем перемежаемость ВВ первой моды, что указывает на очень низкую распространенность ВВ второй моды в рассмотренных районах северных российских морей.

Статистические характеристики и перемежаемость внутренних волн по данным контактных измерений
Statistical characteristics and intermittency of the internal waves based on contact measurements

Номер района работ / Number of the region under study	Дата измерений / Date of measurements	Общее время измерений, мин / Total time of measurements, min	Средняя высота второй моды, м / Average height of the second mode IW, m	Средняя длительность второй моды, мин / Average duration of the second mode IW, min	Перемежаемость ВВ второй моды, % / Intermittency of the second mode IW, %	Перемежаемость ВВ первой моды, % / Intermittency of the first mode IW, %
1	июнь 2009 г. / June, 2009	810	2	8	0,9	90
	август 2010 г. / August, 2010	3105	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
	июль 2011 г. / July, 2011	1080	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
	июль 2012 г. / July, 2012	1450	2,5	15	1,0	79
	август 2012 г. / August, 2012	1350	1	7	0,5	63
	август 2013 г. / August, 2013	780	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
2	июль 2012 г. / July, 2012	1540	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
	июль 2014 г. / July, 2014	1470	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
3	июль 2012 г. / July, 2012	1440	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
4	июль 2014 г. / July, 2014	1500	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			
5	август 2016 г. / August, 2016	4810	2	20	0,6	81
6	август 2017 г. / August, 2017	4040	Колесания второй моды не обнаружены / No oscillations of the second mode are found			

Заключение. По результатам комплексного (вейвлет- и модового) анализа многолетнего архива *CTD*-измерений с высокой дискретностью по времени были впервые описаны случаи регистрации нелинейных внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях. Установлено, что внутренние волны второй моды являлись преимущественно волнами «растяжения», содержали 1–2 колебания со средней длительностью 10 мин и средней амплитудой 2 м. Расчет перемежаемости показал, что внутренние волны второй моды в сезонном приповерхностном пикноклине прибрежных районов Белого и Баренцева морей являются весьма редким явлением на фоне широкого распространения внутренних волн первой моды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. СПб. : Гидрометеоздат, 1992. 271 с.
2. О разработке цифрового атласа наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А. С. Епифанова [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 17–26. doi:10.46960/1816-210X_2019_4_17
3. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves / Y. J. Yang [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2010. Vol. 17, iss. 6. P. 605–614. doi:10.5194/npg-17-605-2010
4. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea / Y. J. Yang [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. Vol. 114, iss. C10. C10003. doi:10.1029/2009jc005318
5. *Konyaev K. V., Sabinin K. D., Serebryany A. N.* Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42, iss. 11–12. P. 2075–2081. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00067-4)
6. *Da Silva J. C. B., New A. L., Magalhaes J. M.* On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2011. Vol. 58, iss. 3. P. 229–240. doi:10.1016/J.DSR.2010.12.003
7. *Magalhaes J. M., da Silva J. C. B., Buijsman M. C.* Long lived second mode internal solitary waves in the Andaman Sea // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 10234. doi:10.1038/s41598-020-66335-9
8. *Shroyer E. L., Moum J., Nash J. D.* Mode 2 waves on the continental shelf: Ephemeral components of the nonlinear internal wavefield // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C7. C07001. doi:10.1029/2009JC005605
9. *Серебряный А. Н., Химченко Е. Е.* Внутренние волны второй моды в Черном море // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488, № 5. С. 555–559. doi:10.31857/S0869-56524885555-559
10. *Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K.* Baroclinic tides: Theoretical Modeling and Observational Evidence. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 351 p. doi:10.1017/CBO9780511535932
11. *Зимин А. В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. М. : ГЕОС, 2018. 220 с.
12. *Свергун Е. И., Зимин А. В.* Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. doi:10.7868/S2073667317020022
13. *Зимин А. В., Свергун Е. И.* Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 66–72. doi:10.7868/S207366731804

14. *Жегулин Г. В.* Оценка статистической взаимосвязи гидрологических и гидрооптических характеристик по данным измерения короткопериодных внутренних волн в глубоководном районе Баренцева моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 85–94. doi:10.7868/S2073667319010106
15. *Kelly S. M.* The Vertical Mode Decomposition of Surface and Internal Tides in the Presence of a Free Surface and Arbitrary Topography // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46, iss. 12. P. 3777–3788. doi:10.1175/jpo-d-16-0131.1
16. Internal-Tide Spectroscopy and Prediction in the Timor Sea / *S. M. Kelly [et al.] // Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, iss. 1. P. 64–83. doi:10.1175/JPO-D-14-0007.1
17. *Жегулин Г. В., Зимин А. В., Родионов А. А.* Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 4. С. 47–59.

Об авторах:

Свергун Егор Игоревич, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30); аспирант третьего года обучения Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9), **WoS ResearcherID: AAC-7289-2020, Scopus Author ID: 57195066881**, egor-svergun@yandex.ru

Зимин Алексей Вадимович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук; профессор Санкт-Петербургского государственного университета (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9); ведущий научный сотрудник Института водных проблем Карельского научного центра РАН (185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, д. 50), **WoS ResearcherID: C-5885-2014, Scopus Author ID: 55032301400**, zimmin2@mail.ru

Жегулин Глеб Викторович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), **Scopus Author ID: 57195070290**, jegulin-gleb@rambler.ru