

УДК 551.466.8

© А. Н. Серебряный

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

Акустический институт им. Н. Н. Андреева, Москва

Институт космических исследований РАН, Москва

serebryany@hotmail.com

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН БОЛЬШИХ АМПЛИТУД НА БУКСИРУЕМЫЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЗАГЛУБИТЕЛЬ

Рассматривается эффект воздействия интенсивных внутренних волн на буксируемый гидродинамический заглубитель на примере исследований, проведенных у Маскаренского хребта в Индийском океане. Маскаренский хребет принадлежит к районам Мирового океана, где наблюдаются внутренние волны рекордных (100 м и более) амплитуд. В этом районе с НИС «Академик Николай Андреев» в течение нескольких суток проводились комплексные исследования внутренних волн, в основу которых были положены буксировки с использованием распределенных датчиков температуры. Осуществлены пересечения внутриволновых образований как на попутных с направлением их распространения галсах, так и на встречных. Выявлено, что благодаря значительным орбитальным течениям, сопровождающих интенсивные внутренние волны, заглубитель при буксировке совершает вертикальные движения, «сфазированные» с пересекаемыми им внутренними волнами. Вертикальные смещения заглубителя находились в пределах 3—11 м при пересечении внутренних волн высот 10—80 м. Приведены примеры проявления данного эффекта как в случае одиночных внутренних волн, так и пакетов короткопериодных внутренних волн. На основании экспериментальных данных получены уравнения линейной регрессии, связывающие амплитуды вертикальных смещений заглубителя с высотами вызывающих их внутренних волн. Рассмотренный эффект важен для любого буксируемого, а также самостоятельно движущегося подводного объекта. В настоящее время, когда в практику океанических и морских исследований активно входят подводные необитаемые и обитаемые аппараты, необходимо учитывать сложности, которые могут возникнуть при их встрече с внутренними волнами больших амплитуд.

**Ключевые слова:** уединенная внутренняя волна, цуг внутренних волн, Индийский океан, Маскаренский хребет, буксировка, гидродинамический заглубитель, распределенный датчик температуры.

A. N. Serebryany

P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

N. N. Andreyev Acoustics Institute, Moscow, Russia

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

## EFFECT OF LARGE-AMPLITUDE INTERNAL WAVES ON TOWED HYDRODYNAMICAL DEPRESSOR

The effect of intense internal waves on towed hydrodynamical depressor is considered on the basis of observations carried out at Mascarene Ridge in the Indian Ocean. Mascarene Ridge belongs to the regions of the World Ocean where internal waves of record (100 m or more) amplitudes are observed. For a few days the research vessel «Academician Nikolay Andreyev» had been carrying out comprehensive studies of internal waves in this area, which were based on towing line temperature sensors. Cross-sections of internal waves for both cases for coinciding with direction of their propagation and for opposite tacks were performed. It was revealed that due to strong orbital currents, accompanying internal waves, a towing depressor made significant vertical displacements synchronised with crossing internal waves. Vertical displacements of the depressor reached as much as 3—11 m during crossing internal waves which amplitudes were in frame of 10—80 m. Examples of manifestations of this effect, as in the case of solitary waves and packets of short-period internal waves are presented. The equations of linear regression, relating the vertical displacement of the depressor with heights of internal waves causing them are obtained. This effect is important for any towed and self-moving underwater object. At the present time, when the practice of ocean and marine research includes active using

*Серебряный А. Н. Воздействие внутренних волн больших амплитуд на буксируемый гидродинамический заглубитель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 39—45.*

*Serebryany A. N. Effect of large-amplitude internal waves on towed hydrodynamical depressor. Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016, 9, 2, 39—45.*

underwater unmanned and manned vehicles, it is necessary to take into account the difficulties that may arise during their meeting with the internal waves of large amplitudes.

**Key words:** solitary internal wave, train of internal waves, the Indian Ocean, Mascarene Ridge, towing, hydrodynamical depressor, line temperature sensor.

Гидродинамический заглубитель — средство, широко применяемое в океанографической практике для целей заглубления и поддержания буксируемых систем на фиксированных глубинах [1, 2]. За многие годы нами был накоплен большой опыт измерения океанских внутренних волн с использованием систем буксируемых распределенных датчиков температуры [3—5] с гидродинамическими заглубителями. Гидродинамический заглубитель работает надежно и хорош для заглубления буксируемых кабелей и датчиков для различных морских условий и для длительного времени буксирования. Во время проведения измерений внутренних волн в Индийском океане с помощью распределенных датчиков температуры мы обнаружили необычный и значительный эффект воздействия внутренних волн больших амплитуд на гидродинамический заглубитель, присоединенный к концу буксируемого кабель-троса. В моменты прохождения интенсивных внутренних волн заглубитель начинал смещаться вниз и вверх синхронно с профилями пересекаемых внутренних волн. Этот эффект имел место как для больших уединенных волн, так и для цугов короткопериодных внутренних волн. Также отмечалось, что показания судового лага (скорость относительно воды) воспроизводят волнообразные записи с характерным горизонтальным масштабом внутренних волн.

Маскаренский хребет в Индийском океане — особое место, в окрестностях которого возникают

внутренние приливы больших высот [6], которые в свою очередь генерируют нелинейные внутренние волны больших амплитуд, как в виде уединенных волн, так и пакетов солитоноподобных волн. Наблюдения на Маскаренском хребте [7] выявили две системы интенсивных внутренних волн возле подводной горы и над ней. Первая представляла собой мощный внутренний гидравлический скачок (в виде уединенного внутреннего возмущения второй моды) на «подветренном» склоне хребта. Непосредственно над банкой Сая-де-Малья располагалось другое интенсивное внутриволновое образование — группа интенсивных короткопериодных волн, генерируемая из уединенного возмущения во время его распространения над горой в фазу отлива (с большой долей уверенности мы можем полагать, что этот процесс есть распад первоначального возмущения на солитоны). Оба волновых явления (уединенное возмущение и цуг внутренних волн) существовали в течение длительного времени и возобновлялись приливными течениями полусуточной периодичности. Детальное описание происходивших внутриволновых процессов можно найти в работах [7, 8].

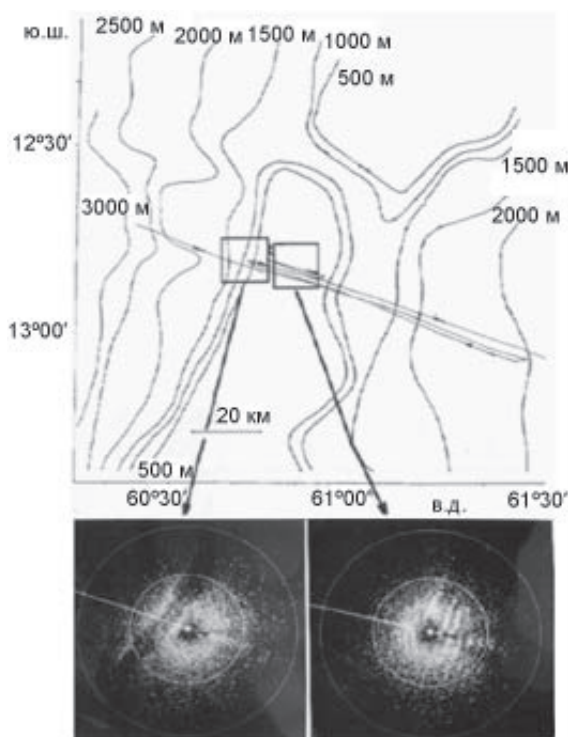


Рис. 1. Топография рельефа дна в исследуемом районе Маскаренского хребта и траектории осуществленных буксировок.

Квадратами схематично показаны места встреч с интенсивными внутриволновыми образованиями, дополнительно даны фото экрана судового радиолокатора во время прохождения судном-буксировщиком уединенной внутренней волны и пакета солитоноподобных внутренних волн. Курс судна — светлая линия-радиус из центра изображения.

Наблюдавшиеся внутренние волны имели большие амплитуды до нескольких десятков метров. Это давало нам возможность исследовать их посредством последовательных сечений при буксировке. На рис. 1 показаны траектории движения судна во время буксировок на фоне топографии дна исследуемого района, а также схематично — местоположения встреченных систем

интенсивных внутренних волн вместе с радиолокационными фотоизображениями поверхности океана пересекаемых интенсивных внутриволновых образований. Галсы и контргалсы буксировки были ориентированы почти по нормали как к изобатам подводного хребта, так и к гребням пересекаемых внутренних волн. Снимки экрана судового радиолокатора сделаны во время движения судна-буксировщика на северо-запад и на них хорошо видна ориентация курса судна (светлая линия-радиус из центра изображения) относительно гребней внутренних волн. В случае уединенной внутренней волны ее радиолокационное изображение на поверхности океана выглядело одиночной темной полосой, а пакет внутренних волн выглядел набором полос, существенно более тонких, но также вытянутых почти вдоль оси подводного хребта.

Основная часть нашей буксируемой системы состояла из буксируемого кабель-троса с распределенным датчиком температуры длиной 42 м, заглубителем гидродинамического типа механически соединенного с нижним концом кабель-троса, датчиком глубины для контроля за глубиной погружения нижнего конца распределенного датчика и положением заглубителя [3, 5]. Вся система буксировалась судном со скоростью 3.5—4.5 м/с. Обычно положение нижнего конца распределенного датчика температуры, вблизи которого располагался заглубитель, при данных условиях было на глубине ~100—106 м. Распределенный датчик температуры при этом находился в термоклин. Одновременно с измерениями параметров внутренних волн регистрировались показания корабельного лага.

**Воздействие на заглубитель уединенной внутренней волны.** На разрезе, сделанном навстречу уединенной волне, при вхождении в волну заглубитель ушел вниз на 14 м, а при выходе из зоны волны снова вернулся на исходный горизонт (рис. 2). Таким образом, траектория заглубителя представляла собой как бы зеркальное отображение профиля пересекаемой им уединенной внутренней волны. Наблюдавшаяся внутренняя волна имела горизонтальную асимметрию профиля (более крутой передний фронт и более пологий задний). Необходимо заметить, что траектория заглубителя при заглублении была круче, чем восходящая траектория к начальному горизонту. Кроме того, заглубитель совершал быстрые короткопериодные колебания относительно средней траектории во время заглубления. После достижения самой глубокой точки заглубитель стал плавно смещаться вверх, как бы отслеживая более плавный задний фронт волны. Необходимо заметить, что встреченная уединенная внутренняя волна не была обычной. Ее особенность заключалась в том, что она не была волной 1-й моды, при прохождении которой все слои водного столба смещаются синхронно по вертикали. Это была внутренняя волна 2-й моды. Охватываемый буксируемым датчиком приповерхностный слой океана при этом не уходил вниз при проходе волны, а наоборот, приподнялся, а затем опустился. Такие движения стратифицированной океанской среды, когда происходит поднятие верхних слоев водного столба и одновременно опускание нижних слоев, характерны для волны 2-ой моды типа волны «выпуклости» (convex) [9], которые гораздо чаще встречаются в океане, чем волны «вогнутости» (concave). Необходимо подчеркнуть, что данная уединенная волна оказалась одним из первых примеров наблюдения внутренних волн второй моды в реальных океанских условиях.

Таким образом, при встречном движении внутренней волны и буксирующего судна, уединенная внутренняя волна 64-метровой высоты заглубила решетку на 14 м. Эффект имел продолжительность во времени 8 мин, пространственный масштаб в горизонтальном



Рис. 2. Воздействие уединенной волны на заглубитель: случай, когда направление буксировки противоположно направлению распространения внутренней волны. 1 — профиль внутренней волны; 2 — запись вертикальных смещений заглубителя. «0» вертикальной оси соответствует средней точке участка термоклина, охватываемого распределенным датчиком в начальной точке разреза при встрече с волновым образованием. Запись вертикальных смещений заглубителя на всех рисунках смещена относительно «0» шкалы для удобства изображения.

направлении — 2.4 км (средняя скорость буксировки была 4.8 м/с). На обратном галсе эта волна была прописана вновь, но уже направление движения судна и волны совпадали (рис. 2). В противоположность предыдущему случаю при вхождении в область волны заглубитель не ушел вниз, а приподнялся почти на 20 м, при этом повторяя общие черты формы внутренней волны во время всего времени прохождения через волну.

Уединенная волна, измеренная на этом галсе, значительно изменила свою форму по сравнению с первым сечением, описанным выше (оно было сделано на 1.5 ч ранее). Ее высота достигла 88 м и горизонтальный масштаб также возрос. Соответственно взаимодействие заглубителя с волной стало длительнее (продолжалось до 18 мин).

Таким образом, гидродинамический заглубитель ведет себя различным образом в зависимости от ориентации буксировки относительно направления распространения уединенной внутренней волны. Во всех случаях воздействие уединенной внутренней волны на буксируемый заглубитель было значительным.

**Воздействие на заглубитель цуга солитоноподобных внутренних волн.** Другой интересный пример представляет собой взаимодействие между заглубителем и цугом внутренних волн на встречном друг относительно друга движении, который был зарегистрирован над подводной возвышенностью (рис. 4). Цуг состоял из 10—12 волн с амплитудами до 25—28 м, распространявшихся во встречном по отношению к буксировке направлении. Заглубитель проявил отклик в виде квазипериодических 4—5 метровых вертикальных смещений, подобных по форме противофазным отображениям внутренних волн цуга. Во время прохождения цуга каждое вертикальное смещение вниз термоклина, вызванное внутренней волной, сопровождалось смещением вверх заглубителя. Следует заметить, что в реакции заглубителя на внутренние волны был 20-секундный временной сдвиг. Таким образом, на встречном галсе, как и в случае пересечения уединенной внутренней волны, заглубитель «повторяет» форму внутренних волн в противофазе, но в более коротких пространственных и временных масштабах.

Пересечение попутного цуга внутренних волн (запись не показана) выявило синхронное повторение его формы в вертикальных смещениях заглубителя, так что гребни волн соответствовали высшим точкам в положении заглубителя, а впадины — низшим точкам.

**Регрессионный анализ наблюдаемых особенностей.** Явно видимая корреляция между траекториями буксируемого заглубителя и записями наблюдавшихся внутренних волн позволяет с уверенностью говорить, что причиной необычного поведения заглубителя являются именно внутренние волны.



Рис. 3. Воздействие уединенной волны на заглубитель: случай, когда направление буксировки совпадает с направлением распространения внутренней волны.

1 — профиль внутренней волны;

2 — запись вертикальных смещений заглубителя.

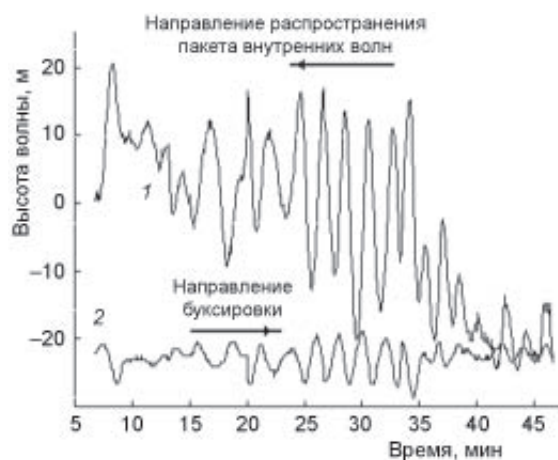


Рис. 4. Воздействие цуга внутренних волн на заглубитель: случай, когда направление буксировки противоположно направлению распространения цуга волн.

1 — запись цуга внутренних волн;

2 — запись вертикальных смещений заглубителя.

Представляется интересным сделать некоторые количественные оценки. Для наших данных возможно провести регрессионный анализ.

Проверим закон линейной регрессии для данных синхронной записи высот внутренних волн и амплитуд вертикальных смещений буксируемого заглубителя. Анализ будет проведен для четырех сечений цугов внутренних волн, которые были сделаны на различных галсах. Направление одного галса было встречным, а трех — попутным по отношению к направлению распространения цугов волн. Результаты регрессионного анализа представлены на рис. 5.

Получены следующие уравнения регрессии:

$$A_1 = 2.64 - 4.16h; A_2 = 7.68 - 5.43h; A_3 = 6.53 + 3.24h; A_4 = 0.80 + 5.27h.$$

Знак минус в первом уравнении указывает на противоположное смещение заглубителя относительно смещения слоев, вызванных внутренними волнами.  $A$  — высота внутренней волны в метрах;  $h$  — амплитуда смещений заглубителя в метрах. Коэффициент корреляции для всех случаев лежит в пределах между 0.77 и 0.97. Принимая во внимание ошибку измерения датчика глубины (ее величина 0.2—0.4 м), мы можем считать полученную корреляцию достаточно высокой.

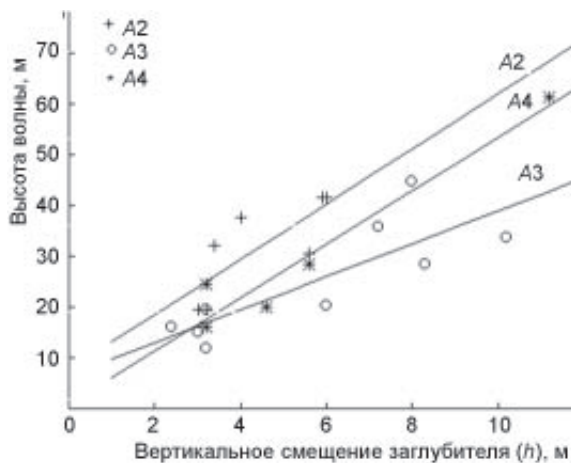


Рис. 5. Сравнение амплитуд вертикальных колебаний заглубителя с высотами внутренних волн для случая трех цугов и соответствующие им регрессионные прямые.

**Обсуждение.** Для объяснения наблюдаемого эффекта знакопеременного вертикального смещения заглубителя во время пересечения внутренних волн больших амплитуд мы привлечем дополнительную важную информацию об изменчивости поверхностного течения, которая была получена по записи корабельного лага. Мы напоминаем, что лаг измеряет скорость судна относительно воды.

На первом галсе (рис. 2, б) при вхождении в передний склон уединенного возмущения скорость лага упала на 0.2 м/с от средней скорости буксировки 4.3 м/с. Во второй фазе прохождения изменившаяся скорость судна восстановилась и затем увеличилась на 0.17 м/с, превысив среднюю скорость буксировки. Время увеличения скорости было дольше периода ее уменьшения.

На втором галсе (судно развернулось и прошло внутреннюю волну сзади, рис. 3, в противоположном по сравнению

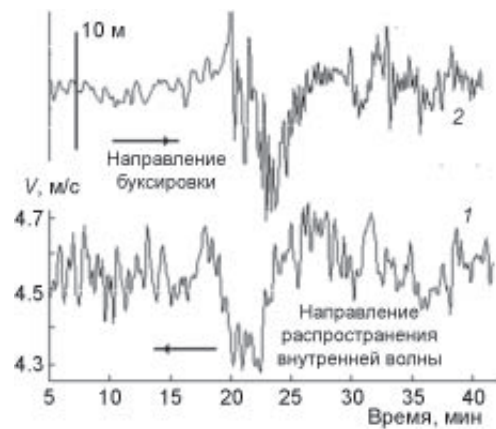


Рис. 6. Запись лага (1) и вертикальных смещений термоклина (2) при встрече с уединенной внутренней волной (случай встречного движения).

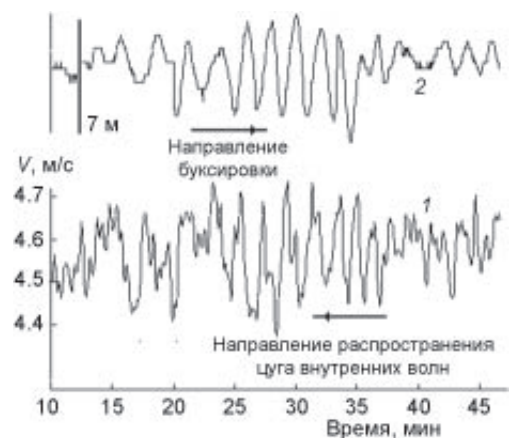


Рис. 7. Запись лага (1) и вертикальных смещений термоклина (2) при встрече с цугом внутренних волн (случай встречного движения).

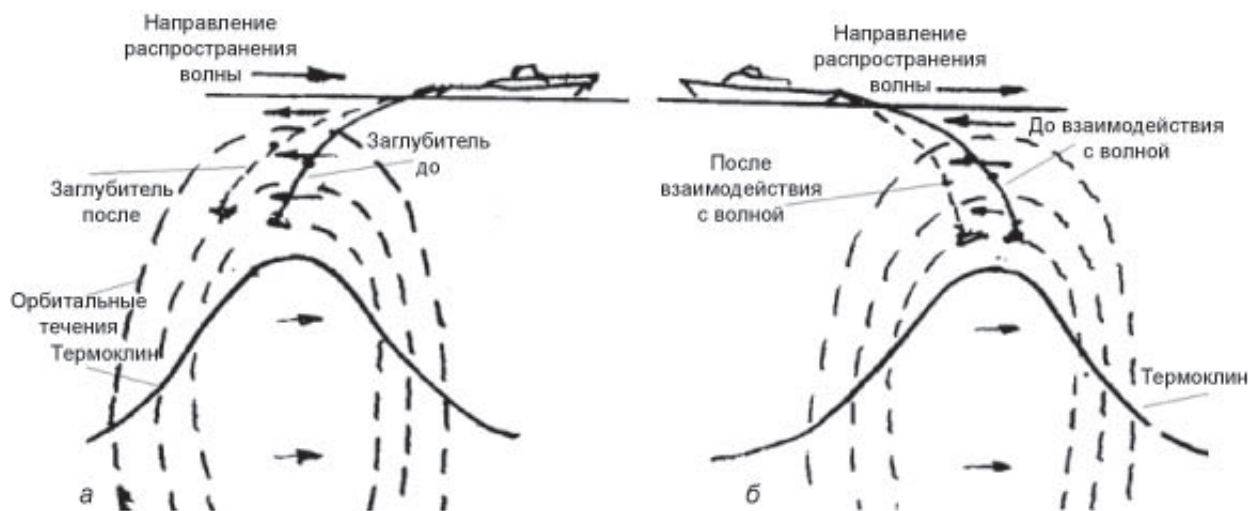


Рис. 8. Схема, демонстрирующая взаимодействие буксируемого заглубителя с системой орбитальных течений, сопровождающих уединенную внутреннюю волну для случая, когда буксировка совпадает с направлением распространения внутренней волны (а) и противоположна (б).

Положение буксируемого кабель-троса с датчиками и заглубителем перед взаимодействием с внутренней волной показано сплошной линией, и после взаимодействия — пунктирной линией.

с предыдущим случаем направлении) скорость судна возросла в момент вхождения в уединенную волну и уменьшилась при выходе из волны. Во время встречи с цугом внутренних волн лаг регистрировал короткопериодные колебания скорости течения (рис. 7). Амплитуда этих осцилляций достигала 0.35 м/с. Заглубитель в это время совершал смещения с амплитудами до 8 м. Описанные выше значительные флуктуации скорости судна в моменты пересечения внутренних волн дают нам ключ к объяснению наблюдаемых эффектов смещений заглубителя. Хорошо известно, что внутренние волны сопровождаются орбитальными течениями, которые в нашем случае внутренней волны-возвышения ориентированы в верхнем слое противоположно к направлению распространения волны (рис. 8).

Соответственно этой схеме, если волна распространяется против направления буксировки, в момент пересечения судно должно ощущать уменьшение скорости водного потока. Гидродинамический заглубитель также начинает «чувствовать» это уменьшение в течениях, и, благодаря изменению баланса действующих на него сил (гидродинамические силы и сила тяжести заглубителя с тросом), начинает заглубляться. Во время буксировки существуют две гидродинамические силы, которые контролируют глубину заглубителя вместе с силой тяжести самого заглубителя [1]. Первая компонента — есть сила сопротивления  $Q = C_x(\rho/2)SV^2$  и вторая — заглубляющая сила  $Y = C_y(\rho/2)SV^2$ . Здесь  $\rho$  — плотность воды;  $S$  — характерная эффективная площадь заглубителя;  $C_x$ ,  $C_y$  — коэффициенты сопротивления и заглубления,  $V$  — скорость буксировки (скорость потока). В данном случае сила сопротивления потока  $Q$  уменьшается также как и заглубляющая сила  $Y$ , в то время как сила тяжести заглубителя остается неизменной, и это приводит к заглублению решетки. Орбитальные течения наблюдавшихся внутренних волн были так велики, что это вызывало изменения гидродинамических сил, что и приводило к заметным вертикальным смещениям заглубителя.

\*\*\*

Рассмотренный эффект важен для любого буксируемого, а также самостоятельно движущегося подводного объекта. В настоящее время, когда в практику океанических и морских исследований активно входят подводные необитаемые и обитаемые аппараты, необходимо учитывать сложности, которые могут возникнуть при встрече подводных аппаратов с внутренними волнами больших амплитуд. Внутренние волны с высотами в несколько десятков метров достаточно широко распространены в морях и океанах [10]. В некоторых районах вблизи резких поднятий дна океана внутренние волны достигают 100 м и более. Такие волны не только создают потенциальную опасность для подводных аппаратов, но также через интенсивные собственные орбитальные течения могут воздействовать на суда

надводного плавания как находящихся на ходу, так и в дрейфе. Даже в случаях внутренних волн относительно небольших амплитуд (около 10 м) проходящие над ними суда малого тоннажа изменяют свою скорость на 15—20 % синхронно с фазами пересекаемых волн, что многократно отмечалось нами при работах на шельфах российских морей, проводимых с помощью ADCP.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 14-50-00095).*

### Литература

1. *Егоров В. И.* Подводные буксируемые системы. Л.: Судостроение, 1981. 304 с.
2. *Kuroda Y., Mitsudera H.* Observation of internal tides in the East China Sea with an underwater sliding vehicle // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 10801—10816.
3. *Сабинин К. Д., Назаров А. А., Серебряный А. Н.* Короткопериодные внутренние волны и течения в океане // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1990. Т. 26, № 8. С. 847—853.
4. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал.* 2007. Т. 53, № 3. С. 410—436.
5. *Клевков А. И., Назаров А. А., Серебряный А. Н.* Буксируемый измеритель температуры // *А.с. СССР № 1342196.* 1994. Б.и. № 22, с. 182.
6. *Морозов Е. Г., Фомин Л. М.* Экстремальные приливные внутренние волны около Маскаренского хребта // *ДАН СССР.* 1989. Т. 305, № 6. С. 1478—1481.
7. *Копуаев К. V., Sabinin K. D., Serebryany A. N.* Large-amplitude internal waves near Mascarene Ridge in the Indian Ocean // *Deep-Sea Research I.* 1995. V. 42, N 11/12. P. 2075—2091.
8. *Коняев К. В., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н.* Два пути возникновения интенсивных внутренних волн вблизи подводного хребта // *Доклады РАН.* 1994. Т. 338, № 4. С. 537—540.
9. *Yang Y. J., Fang Y. C., Tang T. Y., Ramp S. P.* Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves // *Nonlin. Processes Geophysics.* 2010. V. 17. P. 605—617.
10. *Сабинин К. Д., Серебряный А. Н., Назаров А. А.* Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // *Океанология.* 2004. Т. 44, № 6. С. 805—810.

Статья поступила в редакцию 05.05.2015 г.