

УДК 551.466.8

ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРОХОДЯЩИМ НАД МОРЕМ ШКВАЛОМ

© 2023 г. А. Н. Серебряный^{a, b, *}, А. Н. Свядковский^b

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия

^bАО “Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева”, ул. Шверника, 4, Москва, 117036 Россия

*e-mail: serebryany@hotmail.com

Поступила в редакцию 16.07.2022 г.

После доработки 06.09.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Приводятся данные необычного случая измерения течения, возникшего при прохождении над морем шквалистого ветра. Измерения проводились 12 октября 2011 г на акватории шельфа Черного моря вблизи Геленджика в пределах границ от траверза Голубой бухты до мыса Толстого на яхте, оснащенной ADCP “Rio Grande 600 kHz”. Выявлено необычное интенсивное подповерхностное течение (до 1 м/с), проникающее вглубь на 8 м, сгенерированное сильным шквалом, прошедшим над шельфовой зоной.

Ключевые слова: акустический доплеровский профилометр течений (ADCP), шквал, шельф, прибрежная зона, ветер, шквал, волны, колебания термоклина, Черное море

DOI: 10.31857/S000235152301011X, EDN: ENHLJR

ВВЕДЕНИЕ

Акустические профилометры вообще, и модель “Rio Grande 600 kHz”, в частности, зарекомендовали себя с самой лучшей стороны для исследования на морском шельфе не только течений, но и других процессов, включая внутренние волны, вихри, внутритермоклинные линзы и др. Принципы работы ADCP (акустического доплеровского профилометра течений) изложены в описаниях фирмы-изготовителя и с ними можно ознакомиться там [1, 2]. Наш опыт работы с ADCP в первые годы обобщен в работах [3, 4]. Дальнейшие работы в ежегодных морских экспедициях позволили собрать богатый материал, демонстрирующий ADCP как мощный инструмент акустической океанологии [5, 6]. Нами были зарегистрированы в том числе и явления, которые можно отнести к разряду аномальных, вследствие сложности и редкости их наблюдений в натуральных условиях [7]. Среди этих явлений было наблюдение сильного подповерхностного течения, сгенерированного проходящим над морем шквалом. Описанию этого наблюдения посвящена данная работа.

Осенью 2011 г. нами проводились исследования режима течений на геленджикском шельфе Черного моря с использованием ADCP “Rio Grande 600 kHz”, закрепленного на малом моторном судне (яхте типа Ассоль). Подошедший внезапно шквал заставил прекратить работы, и яхта пошла в бухту. При этом прибор продолжал рабо-

тать. В результате была получена важная информация о генерации поверхностного течения шквалом. В статье дается описание параметров возникающего течения в море при прохождении над ним шквала.

РЕГИСТРАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОДЕ ШКВАЛА НАД МОРЕМ

При проведении съемок яхтой, оборудованной ADCP, в районе Голубой бухты 12 октября 2011 г. стала ухудшаться метеорологическая обстановка, и с юга стали подходить волны зыби. В связи с этим было принято решение закончить работы и двигаться вдоль берега в направлении м. Тонкий для захода в Геленджикскую бухту. Яхта “Вита” двигалась на восток со скоростью около 2 м/с, находясь на удалении в 0.7 км от берега. Глубины моря на галсе были в пределах 17–25 м. В этот момент яхту догнал шквал. Его появление сопровождалось сильным порывистым юго-западным ветром до 20 м/с и более и проливным дождем. Действие шквала продолжалось около 15 мин. В это время яхта продолжала движение, но ее курс изменился с восточного на северо-восточный (см. рис. 1), а скорость сначала увеличилась до 2.2 м/с, а затем упала до 1.5 м/с. Несмотря на сильную качку, ADCP продолжал работать и регистрировать течение в морской толще и другие параметры. Напомним, что при отклонении прибора на 15° от вертикали прибор не регистрирует обратно

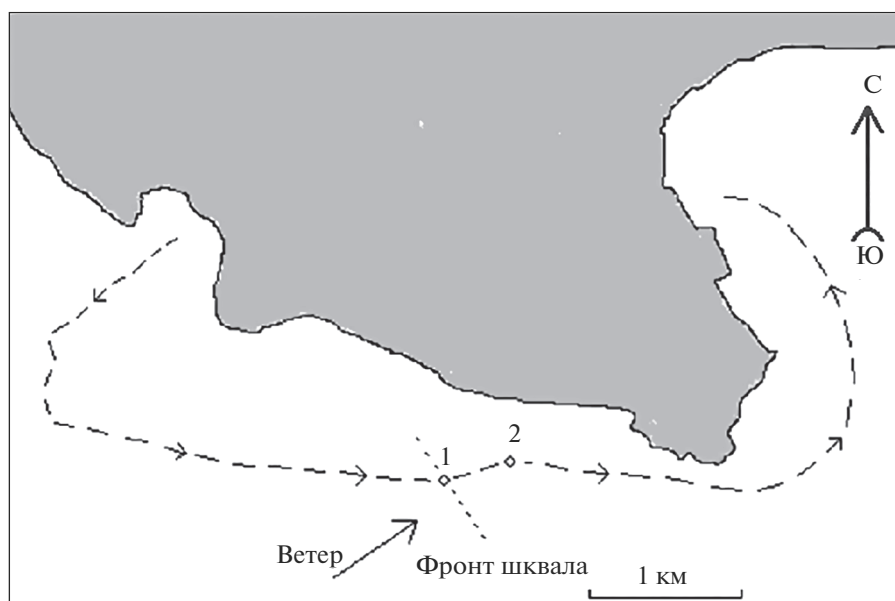


Рис. 1. Траектория движения яхты с ADCP в прибрежной зоне. Точкой 1 показан момент встречи со шквалом. Точка 2 означает момент прохода заднего фронта шквала.

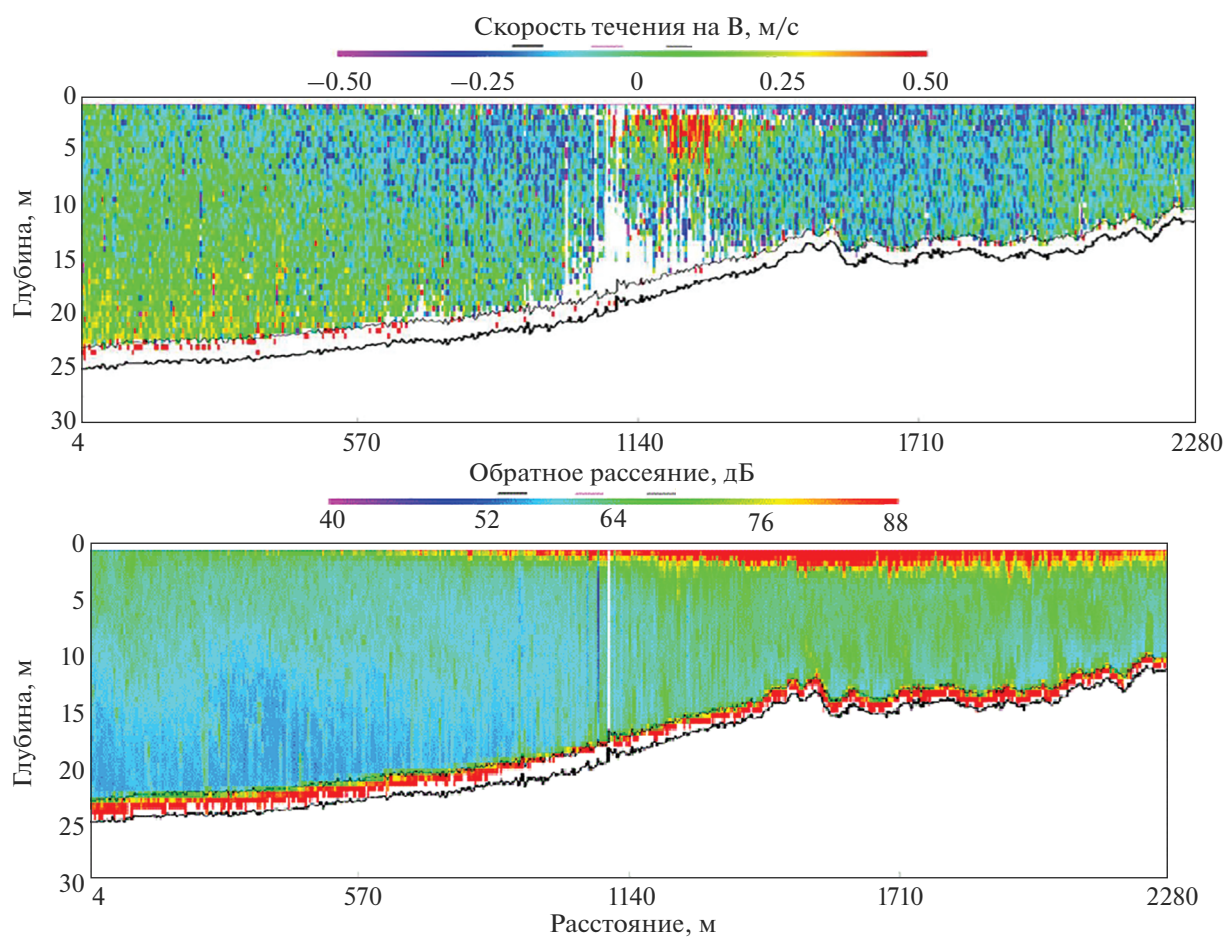


Рис. 2. Широтная составляющая течений на разрезе 12.10.2012 при проходе шквала над морем (вверху). Обратное акустического рассеяния на разрезе (внизу).

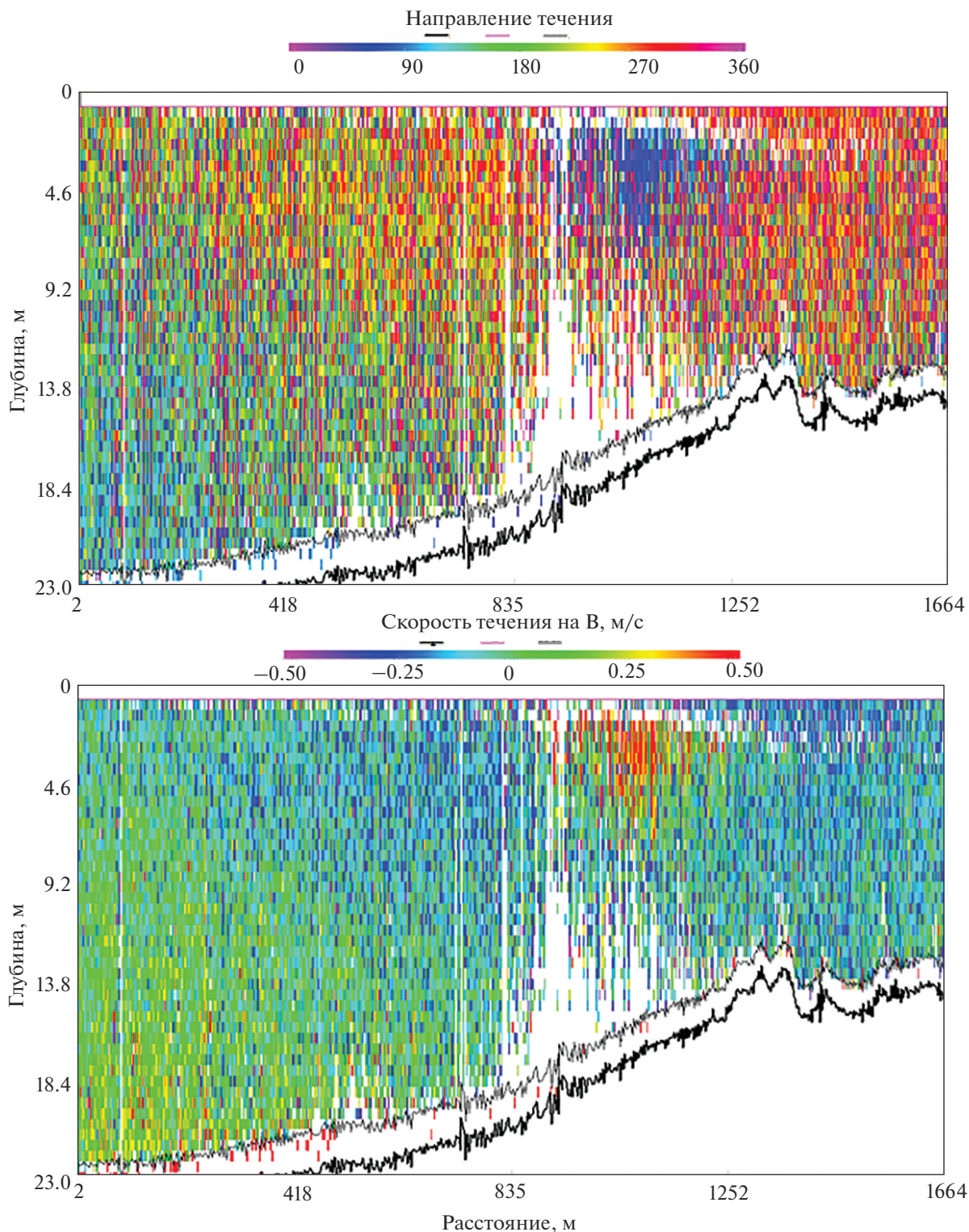


Рис. 3. Картина направления течения (вверху) и широтная составляющая течений (внизу) на разрезе при проходе шквала над морем зарегистрированная ADCP.

рассеянный сигнал, что на записи проявляется в виде пропуска.

До встречи со шквалом в толще моря регистрировалось западное течение силой около 0.15 м/с.

При появлении шквала было зарегистрировано появление интенсивного северо-восточного течения 0.7 м/с в верхней части водной толщи. Это течение охватывало глубины от поверхности мо-

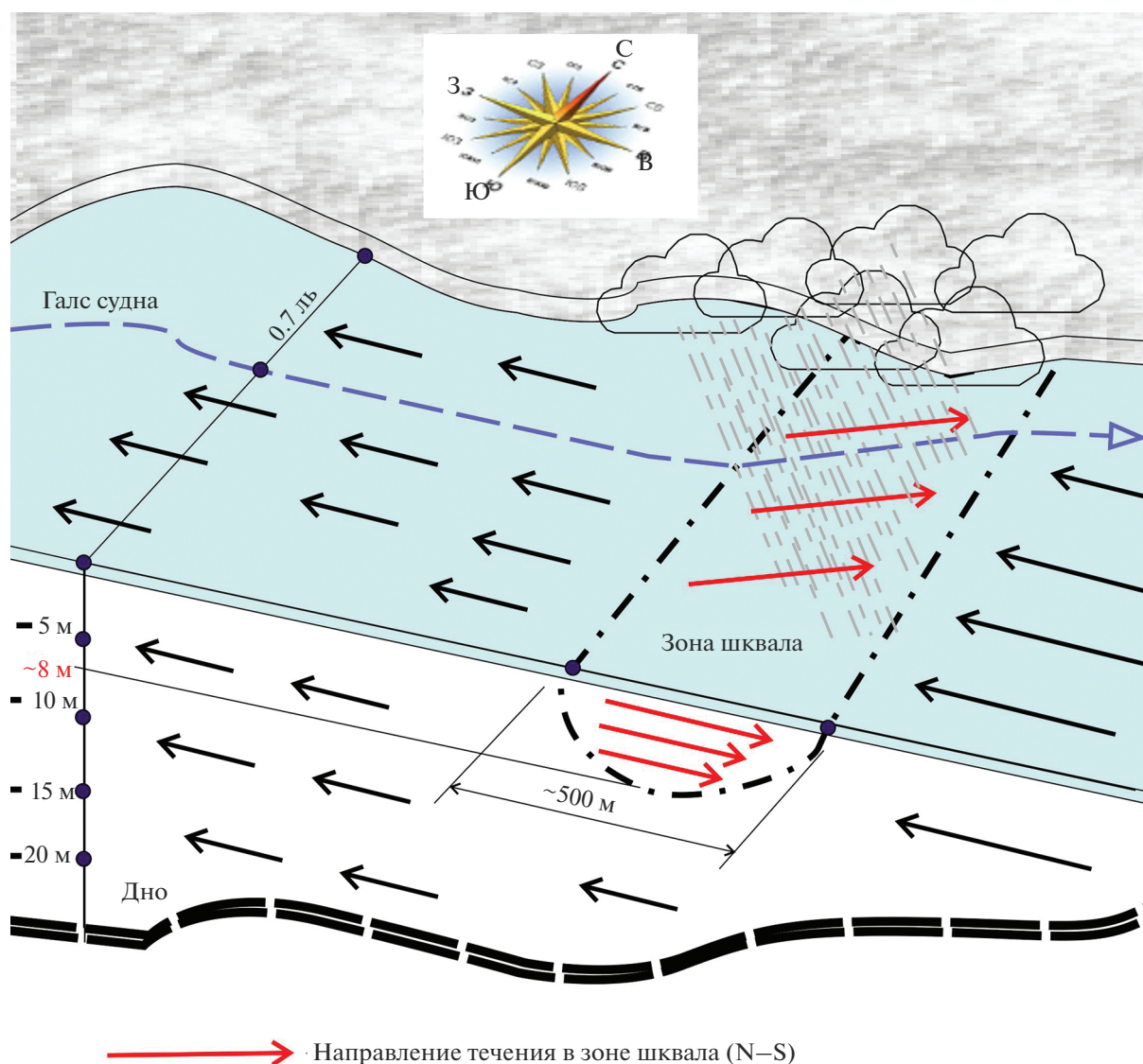


Рис. 4. Трехмерная качественная картина поля течений при прохождении шквала в прибрежной зоне моря.

ря до 8 м. Течение совпадало по направлению с направлением ветра в шквале и наблюдалось до тех пор, пока шквал не утих.

На рис. 2 приведены записанные ADCP данные о силе течения (показана широтная составляющая течения), а также обратного акустического рассеяния при встрече со шквалом. Показанный фрагмент разреза охватывает время с 13 ч 16 мин по 13 ч 57 мин. Запись была настроена на величину ячейки 0.5 м. За это время яхта прошла почти 2 км вдоль берега, двигаясь со средней скоростью около 2.3 м/с. Северо-восточный шквалистый ветер был встречным для фонового вдольберегового западного течения. Это способствовало усилению поверхностного волнения и интенсификации обрушения волн, о чем свидетельствовало появление зоны усиленного рассеяния в приповерх-

ностном слое моря, обусловленного увеличением в нем концентрации воздушных пузырьков (см. рис. 2).

При проходе шквала скорость яхты упала до 1.3–1.5 м/с. После скорость яхты снова возросла до 2 м/с. Проход шквала сопровождался появлением в приповерхностном слое моря сильного течения направленного, как и шквал на восток (см. рис. 3). На рис. 3 эта область показана синим цветом (направление течения лежало в секторе углов 50–90°. Амплитуды течения достигали 0.9–1 м/с, а на горизонте 5 м течение даже превышало 1 м/с. Широтная составляющая течений также показана на рис. 3 в том же масштабе, что и картина направления течений.

Представляет интерес сделать некоторые оценки о возникающем сильном течении, сгене-

рированном шквалом. В частности, о скорости проникновения его на глубину и времени жизни этого течения. Скорость передвижения шквала над морем намного превышала скорость сгенерированного им течения (более чем в 20 раз). Мы зарегистрировали это течение только в период начального прохождения шквала над яхтой — в течение четырех минут. На последующей части разреза, когда шквал продолжался это течение быстро затухло, что видимо было связано с появившимся сильным вдольбереговым встречным западным противотечением. Тем не менее, на разрезе во время действия шквала в приповерхностной части моря появился слой усиленного обратного рассеяния акустического сигнала толщиной до 3–4 м. Его возникновение было вызвано большой концентрацией сгенерированных воздушных пузырьков от обрушивавшихся при сильном ветре поверхностных волн (рис. 2). Таким образом, время жизни наблюдавшегося сильного течения в море было равно времени интенсивного воздействия зоны шквала на поверхность в начальный период прохождения зоны шквала над яхтой и составило около 4 мин. Оно быстро затухло (всего за 2 мин). Скорость заглубления интенсивного течения, порожденного шквалом, по проведенной нами оценке составила 3.8 м/мин или около 6 см/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Логично обобщить наши данные по всему фронту шквала, из чего складывается картина, что проходящий над морем шквал генерирует сильное течение в приповерхностном слое, направление которого совпадает с направлением движения шквала. Это течение силой до 0.7 м/с и более проникает на глубину до 8 м при силе ветра в шквале 20 м/с и движется вместе с шквалом в виде полосы поперечным размером около 500 м по всему его фронту. На рис. 4 представлена схематично трехмерная картина этого процесса. В более глубоководной части шельфа, где присутствует сезонный термоклин, проходящий над морем шквал, безусловно генерирует интенсивные внутренние волны, но экспериментальных доказательств этого у нас нет поскольку мы находились в прибрежной зоне при прохождении шквала, где не было термоклина. Но можно предположить, что в глубокой части моря, сильное течение, порожденное шквалом, генерирует на находящемся ниже термоклине внутренние волны во многом подобно тому как это происходит при генерации волн движущимися интрузиями поверхностных вод [8, 9]. В целом ADCP “Rio Grande 600 kHz” показал себя надежным прибором, хорошо отработав даже при сильной качке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность капитану яхты “Вита” А.В. Болдину за умелые действия по управлению малым судном в непростых условиях проходящего шквала. Отдельно выражаем признательность рецензентам, чьи замечания способствовали улучшению содержания статьи, а также С.Н. Деевой за помощь в подготовке важного рисунка.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке государственного задания по теме № FMWE-2021-0010 в части обработки результатов эксперимента, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00715).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee Gordon R.* Acoustic Doppler Current Profiler. Principles of Operation. A Practical Primer. 2nd edition for Broadband ADCPs. San Diego, RD Instruments. 1996. 54 p.
2. *Work Horse Technical Manual.* RD Instruments. 2003.
3. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 3. С. 639–648.
4. *Рыбак С.А., Серебряный А.Н.* Нелинейные внутренние волны над наклонным дном: наблюдение акустическим профилометром // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 1 С. 85–91.
5. *Серебряный А.Н.* ADCP как мощный инструмент акустической океанологии: новые результаты // Акустика океана. Доклады 15-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 244–249.
6. *Serebryany A.* Monitoring of processes on a sea shelf using ADCP // Hydroacoustics of shallow sea. Eds. *E. Kozaczka, G. Grelowska.* Warszawa: Polish Academy of Sciences Institute of Fundamental Technological Research, 2013. P. 105–117.
7. *Серебряный А.Н.* Наблюдение аномальных явлений в море посредством ADCP // Акустика океана. Доклады 17-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ИОРАН, 2020. С. 394–403.
8. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
9. *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. P. 286–296.

Generation of an Intense Subsurface Current by a Squaal Passing over the Sea

A. N. Serebryany^{1, 2, *} and A. N. Svadkovskiy²

¹*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nakhimovskiy Prosp., 36, Moscow, 117997 Russia*

²*Andreyev Acoustics Institute, 4 Shvernik Str., Moscow, 117036 Russia*

**e-mail: serebryany@hotmail.com*

The data of an unusual case of measuring the current that occurred during the passage of a squally wind over the sea are presented. The measurements were carried out on October 12, 2011 in the waters of the Black Sea shelf near Gelendzhik within the boundaries from the Golubaya Bay beam to Cape Tolstoy on a yacht equipped with ADCP “Rio Grande 600 kHz”. An unusual intense subsurface current (up to 1 m/s) was revealed, penetrating 8 m deep, generated by a strong squall that passed over the shelf zone.

Keywords: acoustic doppler current profiler, squaal, shelf, coastal zone, thermocline oscillations, the Black Sea