А.Н. Серебряный^{1,2}

НАБЛЮДЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОРЕ ПОСРЕДСТВОМ ADCP

*¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН
Россия, 117997, 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, Москва, ул. Шверника, 4,
Тел.: 8(499) 723-63-00, E-mail: serebryany@akin.ru*

Представлены результаты экспериментальных данных об аномальных морских явлениях на черноморском шельфе, собранных на основе 15-летнего опыта работы с ADCP.

Ключевые слова: ADCP, Черное море, шельф, внутренние волны, стая рыб, волна-убийца, шквал, моретрясение, солевые пальцы

Введение. Доклад, продолжающий тему о доплеровском акустическом профилометре течений (ADCP) как универсальном приборе акустической океанологии, рассмотренную на предыдущих школах [1], и частично отраженную в литературе [2], будет посвящен новому, ранее не обсуждавшемуся, вследствие его необычности, аспекту. В связи с проведенным за 15 лет большим объемом измерений в шельфовых зонах морей мы попадали в различные ситуации, часть из которых сопровождалась необычными природными явлениями. ADCP “Rio Grande 600 kHz” надежно работал во всех случаях, и это дало возможность нам собрать уникальный материал по этим явлениям, которые и будут представлены в докладе.

1. Рекордные по амплитуде внутренние волны Черного моря. В ходе проведения исследований течений на геленджикском шельфе 7 октября 2015 г. нами был обнаружен цуг необычно больших внутренних волн с амплитудами 14–16 м, рекордными для бесприливного Черного моря [3]. Генерация этого аномального цуга, как показал последующий анализ, была вызвана проходящим над морем атмосферным фронтом [4]. Среди зарегистрированных механизмов генерации интенсивных внутренних волн на Черном море [5, 6] этот источник ранее не был замечен. Цуг состоял из четырех солитоноподобных волн с характерной формой обостренных гребней и сглаженных подошв, движущихся по

шельфу к берегу со стороны открытого моря (рис. 1). Цуг наблюдался в течение нескольких часов, пока он не достиг прибрежной зоны. Орбитальные течения волн достигали 0.2 м/с, благодаря чему происходило интенсивное взмучивание лежащих на дне осадков, а также веществ, служащих кормом для рыб. Это привело к другому необычному явлению, о котором будет сказано ниже.

Рис. 1. Цуг аномально больших черноморских внутренних волн с высотами 16–14 м. Наблюдение 7 октября 2015 г. на шельфе вблизи м. Толстый.

2. Наблюдение стай рыб, сопровождающих внутренние волны.

Цуг внутренних волн рекордных амплитуд оказался причастным к привлечению стаи рыб в шельфовой зоне моря. Ранее подобное явление не отмечалось на черноморском шельфе. На рис. 2 показана запись эхолокационных контрастов, сделанная ADCP при пересечении цуга на встречном курсе под углом около 30 град относительно фронта головной волны. Две области повышенного рассеяния, обозначающие стаи рыб черноморской ставриды, расположены на передних фронтах двух головных волн цуга. Размер первой стаи на сечении был 80×4 м, второй немного меньше.

Эти скопления рыб сопровождали внутренние волны при их движении к берегу в течение 2.5 часов, пока цуг не дошел до глубин 26 м, переместившись на расстояние около 2 км, и не стал терять свои большие амплитуды.

3. Наблюдение волны-убийцы. Волны-убийцы или “freak waves” привлекают внимание исследователей на протяжении более двух последних десятилетий после регистрации в 1995 г. «новогодней волны» в Северном море с платформы Дропнер. Эти волны характеризуются

Рис. 2. Скопление рыб около двух головных внутренних волн хорошо проявляется на записи ADCP в виде областей повышенного обратного рассеяния звука на пространственном сечении цуга [7].

большими амплитудами и внезапностью появления. Волны-убийцы к настоящему времени были зарегистрированы во многих точках Мирового океана [8]. В том числе их появление отмечалось в Черном море. Критерий, по которому волна относится к freak волнам, выглядит следующим образом: $H/H_s > 2$, где H – высота волны, H_s – значительная высота волны [8].

10 октября 2010 г. при работе с ADCP, установленной на моторной яхте, при проведении разреза поперек шельфа в районе м. Толстый была встречена уединенная 4-метровая поверхностная волна, которую мы относим к категории “freak waves”. В предшествующие сутки море штормило, но к утру 10 октября наступил штиль. При этом с юго-запада по шельфу к берегу проходили волны зыби высотой около 1 м. Яхта двигалась по шельфу от берега над трубой очистных сооружений г. Геленджика, при этом велась регистрация ADCP и эхолотом. ADCP работал в режиме “bottom track” и был настроен на вертикальную величину ячейки 0.5 м, что позволяет достаточно точно регистрировать профиль рельефа дна. Частота регистрации сигналов прибора была 1 Гц. Яхта двигалась со скоростью около 2.5 м/с. При полном безветрии яхта двигалась по курсу немного покачиваясь на встречных метровых волнах зыби. Неожиданно одна из очередных волн зыби подняла яхту на необычно большую высоту, что было отмечено на записи ADCP как уединенный 4.5-метровый выброс глубины дна моря. По вышеуказанному критерию эта волна на фоне волн 1–1.3 м относится к freak волнам. После встречи с яхтой эта волна продолжила движение на берег. Движение яхты по курсу было продолжено, и на пути, как и прежде, встречались волны только высоты, близкой к 1 м. В месте встречи с

большой волной глубина моря составляла около 30 м. Вскоре безветрие закончилось, ветер стал усиливаться, в связи с чем работа на разрезе была закончена.

4. Генерация интенсивного подповерхностного течения проходящим над морем шквалом. 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 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 юго-восточный, 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. До встречи с шквалом в толще регистрировалось западное течение 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 до 8 м. Оно совпадало по направлению с направлением ветра в шквале и наблюдалось до тех пор, пока шквал не утих. На рис. 3 приведены записанные ADCP данные о направлении и силе течения, а также обратного акустического рассеяния при встрече со шквалом.

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 приповерхностном слое моря, обусловленного увеличением в нем концентрации воздушных пузырьков. 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 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 300 м по всему его фронту. В более глубоководной части шельфа, где присутствует сезонный термоклин, проходящий над морем шквал, безусловно, генерирует интенсивные внутренние волны.

Рис. 3. Картина обратного акустического рассеяния (вверху) и широтная составляющая течений (внизу) на разрезе 12.10.2012 при проходе шквала над морем.

5. Особенности гидрологических характеристик в прибрежной зоне после моретрясения. В Черном море 21 сентября 2016 г. в 22:27 по местному времени на расстоянии 57 км от Сухума произошло землетрясение силой 4.6 баллов по шкале Рихтера. В период, предшествующий землетрясению и после, нами проводились измерения в прибрежной зоне моря в районе м. Сухумский с помощью заякоренной гирлянды автономных точечных датчиков температуры, а также ADCP. Сопоставление записей термоксы до землетрясения с записями после выявило интенсивный подъем холодных вод, спустя сутки после землетрясения (см. рис. 4). На горизонте 15 м 20-градусная вода сменилась 12-гра-

Рис. 4. Изменчивость температурной структуры в море до и после землетрясения 21.09.2016 г.

дусной. В то же время течение в прибрежной зоне было незначительным (около 0.1 м/с). После этого стало наблюдаться усиление течений до 0.25 м/с, причем оно происходило с инерционной периодичностью, близкой к 17 ч.

6. Неопознанные подводные явления. В заключении доклада остановимся на зарегистрированных с помощью ADCP интересных явлениях, однозначная трактовка которых на данный момент затруднительна.

6.1. Регистрация импульсного усиления течения в толще моря. При измерениях ADCP, установленной на неподвижной океанологической платформе МГИ у Южного берега Крыма в августе 2010 г., было зарегистрировано кратковременное усиление вдольберегового западного течения в виде уединенного всплеска почти по всей 30-метровой толще воды под платформой. На фоне среднего течения величиной 0.10–0.15 м/с произошло 3-минутное усиление течения до 1 м/с. На рис. 5 представлены данные записи ADCP. По аналогии с поверхностными волнами можно предположительно говорить о внутренней волне типа “freak wave”. Окончательный вывод по этому явлению можно будет сделать после более детального анализа всех собранных экспериментальных данных.

Рис. 5. Импульсное усиление течения в августе 2010 г: временная запись течения (осреднение по глубине, сверху) и запись широтной составляющей течения по глубине (внизу).

6.2. Наблюдение клиновидных включений чистой воды вблизи границы гидрологического фронта. При подходе в прибрежную зону гидрологического фронта со стороны Кодора [9] на сигнале обратного

рассеяния, зарегистрированного ADCP в толще моря, появились конусообразные области аномально пониженного рассеяния. В этих конусах значения коэффициента обратного рассеяния были в пределах 52–55 дБ (представлены голубым цветом на рис. 6), в то время как фоновая окружающая среда характеризовалась коэффициентом 70 дБ. Наиболее значимых по размеру было около пяти образований. Наибольшее из них имело размер у поверхности моря около 20 м и монотонно сужалось с глубиной, достигая у дна величины в 2 м. Была замечена следующая особенность: чем глубже образование и тоньше диаметр конуса, тем меньше коэффициент рассеяния. У соседнего конуса, не достигшего дна, основание вверху имело размер около 10 м, нижняя точка была шириной 2 м.

Рис. 6. Клиновидные области аномально низкого рассеяния («солевые пальцы») на записи обратно рассеянного акустического сигнала ADCP.

Наблюдаемая у этих узких образований тенденция двигаться ко дну указывает на то, что они сформированы водой более холодной и соленой, чем окружающие их воды. Мы предполагаем, что наблюдаемые конусы относительно чистой воды на данных ADCP есть проявление филаментов вод открытого моря, источником которых является находящаяся поблизости фронтальная зона. Наиболее вероятная трактовка конусов, по нашему мнению, – это наблюдение в реальной морской среде известного явления «солевых пальцев».

Заключение. Пятнадцатилетний опыт работы с ADCP в шельфовых зонах морей позволил нам собрать большой массив данных о происходящих там процессах, а также зарегистрировать ряд необычных явлений, описанию которых посвящен этот доклад. Универсальность ADCP и надежность его работы при регистрации наблюдавшихся аномальных явлений подчеркивают уникальность этого прибора и его незаменимость при работе в море. В докладе было показано разнообразие зарегистрированных аномальных явлений, наблюдавшихся в разных районах Черного моря. Это наблюдение внутренних волн рекордных амплитуд и необычное сопровождение их на шельфе косяком рыб. Наблюдение поверхностной волны-убийцы высотой около 4.5 м при относительно тихой погоде на геленджикском шельфе. Доказательные данные о воздействии проходящего над морем шквала на характер течения в поверхностном слое моря. Кроме того, дана информация о течениях в прибрежной зоне после подводного землетрясения, происшедшего в море вблизи побережья Абхазии. Также приведены примеры двух необычных гидродинамических явлений, для идентификации которых требуется проводить дополнительный анализ. Это наблюдение кратковременного значительного импульсного усиления течения (до 1 м/с) на крымском шельфе (внутренняя волна типа волны-убийцы?), а также наблюдение процесса, напоминающего «солевые пальцы», на границе гидрологического фронта на абхазском шельфе.

Работа частично выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (тема государственного задания № 0149-2019-0011), а также грантом РФФИ № 19-05-00715.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В. Аномальный цуг внутренних волн рекордных высот на шельфе Черного моря, генерируемый атмосферным фронтом // Доклады АН. 2018. Т. 483. № 4. С. 431–436.
4. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В., Тарасов Л.Л., Химченко Е.Е. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 119–128.
5. 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.
6. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной

- зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
7. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В. Регистрация косяков рыб, привлекаемых солитонами интенсивных внутренних волн // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 2. С. 94–98.
8. Диденкулова Е.Г., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы в 2011–2018 годах // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 1. С. 97–100.
9. Серебряный А.Н., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Елистратов В.П., Химченко Е.Е. Фронт в прибрежной зоне моря с узким шельфом: поверхностные проявления и внутренняя динамика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 167–183.

A.N. Serebryany^{1,2}

OBSERVATION OF ANOMALOUS PHENOMENA IN THE SEA USING ADCP

*¹Shirshov Institute of Oceanology RAS
Nakhimovskiy prosp., 36, Moscow, Russia, 117997,
Tel.: 8 (499) 124-59-96, E-mail: serebryany@hotmail.com*

*²Andreyev Acoustics Institute
Shvernika Str., 4, Moscow, Russia, 117036,
Tel.: 8(499) 723-63-00, E-mail: serebryany@akin.ru*

The results of experimental data on anomalous marine phenomena on the Black Sea shelf, collected on the basis of 15 years of experience using ADCP, are presented.

Keywords: ADCP, Black Sea, shelf, internal waves, fish shoal, freak wave, squall, seaquake, salt fingers

Acknowledgment: This work was partially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic of state assignment No. 0149-2019-0011), as well as by the RFBR grant No. 19-05-00715.

References

1. Serebryany A.N. ADCP kak moshhnyj instrument akusticheskoy okeanologii: novye rezul'taty. Akustika okeana. Doklady 15-oj shkoly-seminara akad. L.M. Brehovskih, M.: GEOS, 2016, pp. 244–249.
2. 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, pp. 105–117.
3. Bondur V.G., Serebryany A.N., and Zamshin V.V. Anomal'nyj cug vnutrennih voln rekordnyh vysot na shel'fe Chernogo morja, generiruemyj atmosferym frontom. Doklady AN, 2018, Vol. 483, No. 4, pp. 431–436.

4. Bondur V.G., Serebryany A.N., Zamshin V.V., Tarasov L.L., and Himchenko E.E. Intensivnye vnutrennie volny anomal'nyh vysot na shel'fe Chernogo morja. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 119–128.
5. Ivanov V.A. and Serebryany A.N. Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo morja. *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.
6. Ivanov V.A. and Serebryany A.N. Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoj zone besprilivnogo morja. *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648–656.
7. Bondur V.G., Serebryany A.N., and Zamshin V.V. Registracija kosjakov ryb, privlekaemyh solitonami intensivnyh vnutrennih voln. *Doklady RAN. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 492, No. 2, pp. 94–98.
8. Didenkulova E.G. and Pelinovskij E.N. Volny-ubijcy v 2011–2018 godah. *Doklady RAN. Nauki o Zemle*, 2020, Vol. 491, No. 1, pp. 97–100.
9. Serebryany A.N., Popov O.E., Kenigsberger G.V., Elistratov V.P., and Himchenko E.E. Front v pribrezhnoj zone morja s uzkim shel'fom: poverhnostnye projavlenija i vnutrennjaja dinamika. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 167–183.