

Акустическая диагностика гидрофизической изменчивости на абхазском шельфе Черного моря

А.Н. Серебряный^{1,2,*}, Г.В. Кенигсбергер³, В.П. Елистратов³, К.Д. Сабинин², О.Е. Попов⁴,

А.Н. Свадковский², Л.Л. Тарасов², Д.М. Денисов², Е.Е. Химченко¹, В.Н. Чекайда²

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН. Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36

²АО «Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева». Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

³Гидрофизический институт АН Абхазии. Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Красномаяцкая, д. 67

⁴Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

(Статья поступила 09.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Представлены результаты российско–абхазского научного сотрудничества, проводимого при поддержке РФФИ с 2013 г., по исследованию изменчивости морской среды на абхазском шельфе Черного моря акустическими и контактными методами. Основной целью исследований было изучение динамики прибрежных вод шельфа с крутым склоном в условиях весенне–летней стратификации. Проводились измерения на стационарной трассе в прибрежной зоне методом акустической автогенерации (метод Фурдуева), но основной объем данных был получен с помощью акустического доплеровского профилометра течений ADCP «Rio Grande 600 kHz», закрепленным на эстакаде. Также делались пространственные съемки в различных участках шельфа ADCP, установленном на малом моторном судне. Получены представительные данные о направлении течений в прибрежных водах, их изменчивости по вертикали и во времени, а также о вертикальной структуре скорости звука и температуры. Также собран материал о временной и пространственной (по вертикали) изменчивости сигнала обратного акустического рассеяния, дающего информацию о загрязненности вод. Особенное внимание было уделено исследованию внутренних волн, которые помимо измерений акустическим профилометром регистрировались также заякоренными вертикальными гирляндами термисторов. Зарегистрированы короткопериодные (от единиц до десятков минут) и длиннопериодные колебания термоклина с периодом близким к инерционному. Выявлены особенности внутренних волн, близко подходящих к берегу. Специальные исследования по мониторингу системы прибрежных течений проводились в районах впадения в море рек Гумиста и Кодор.

PACS: 43.30; 43.80; 47.35

УДК: 551.466.8

Ключевые слова: акустическая диагностика, ADCP, течения, внутренние волны.

ВВЕДЕНИЕ

С 2013 г. начались совместные российско–абхазские исследования изменчивости гидрофизических параметров морской среды на северо–восточном шельфе Черного моря, проводимые при поддержке РФФИ и Академии наук Абхазии. Эти работы имели своей основной направленностью проведение морских натурных экспериментов, используя базу Гидрофизического института Академии наук Абхазии (ГИАНА), научного учреждения, которое в течение многих лет со дня основания было сухумской научной станцией Акустического института. Особенность сложившейся ситуации к началу работ была в том, что по объективным причинам в предыдущие два десятилетия в данном районе не проводились целенаправленные исследования водной среды. Начало работы над совместным проектом, благодаря которому удалось для исследований района привлечь современную океанологическую технику, дало возможность, как бы снова «переоткрыть» этот ранее популярный у ученых район акватории Черного моря.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Первые экспедиционные исследования были проведены осенью 2013 г. В 2014–15 гг. морские измерения проводились в весенне–летний и осенний периоды. Основной объем измерений проводился на акватории вблизи мыса Сухумский. Для проведения морских измерений на черноморском шельфе мы около 10 лет практикуем способ работы, который можно назвать «яхтенной океанологией», и который заключается в использовании судов малого тоннажа (яхты, моторные лодки), снабженных современной океанологической техникой компактных размеров [1]. Были сделаны съемки на пространственных разрезах над шельфом с помощью акустического доплеровского профилометра течений (ADCP «Rio Grande 600 kHz»), установленного на малом моторном судне, что дало возможность собрать информацию об особенностях поля течений и интенсивности обратно рассеянного акустического сигнала на акватории узкого шельфа, которым характеризуется абхазское побережье. Были сделаны несколько походов для проведения съемок в прибрежной зоне вблизи впадения в море рек Гумиста и Кодор. Долговременные многосуточные измерения изменчивости течений в прибрежной зоне велись с помощью смотрящего вниз ADCP, закрепленного на южной сто-

*E-mail: serebryany@hotmail.com

роне эстакады ГИАНА, где глубина моря составляет 13 м (рис. 1). Измерение временной изменчивости температурной структуры моря и внутренних волн велись с помощью двух или трех заякоренных термокос (каждая из которых содержала 11 датчиков температуры), расположенных в линию напротив эстакады. Кроме того, в отдельных точках прибрежной зоны велись измерения вертикальных профилей температуры и скорости звука минизондом SVP. Велись также работы по изучению изменчивости морской среды методом акустической автогенерации (так называемый метод Фурдуева). Для этого была установлена стационарная трасса длиной несколько сотен метров вблизи эстакады. Эксперименты на стационарной акустической трассе продемонстрировали возможность уверенно выявлять методом гидроакустического автогенератора гидрофизическую изменчивость морской среды в трех диапазонах с временным масштабом изменчивости 3–12 мин, 24–50 с, и 4–7 с [2]. Самые крупномасштабные флуктуации фазы связаны с внутренними волнами, средние — с наличием крупной зыби на поверхности моря, и самые малые — с присутствием ветровой волны.



Рис. 1: Эстакада ГИАНА, с которой проводились многослойные измерения течений и вертикального распределения температуры и скорости звука

2. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ И ИХ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Проведенные измерения выявили частое присутствие сильных течений (до 1 м/с) в прибрежной зоне и по шельфу, что объясняется близким подходом к берегу в данном районе Основного Черноморского течения. В эти моменты были зарегистрированы подходы в прибрежную зону локальных гидрологических фронтов, проявляющихся на морской поверхности вытянутыми вдоль побережья полосами пены. В прибрежной зоне были обнаружены антициклонические вихри, появление которых связано с топографией береговой линии

и влиянием дна. Проходящие вихри вызывают смену вдольберегового течения с традиционного северо-западного на юго-восточное. Выявлена закономерность между направленностью течения и увеличением мутности вод в прибрежной зоне.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ В РАЙОНАХ ВПАДЕНИЯ РЕК

Особый интерес представляют прибрежные зоны моря, подверженные влиянию речного стока. Здесь система прибрежных течений существенно изменяется из-за выноса в море большой массы пресных и охлажденных вод. Рассмотрим пример измерений системы прибрежных течений у места впадения в море р. Кодор. Измерения проводились в октябре 2015 г. Намеченная схема съемки предполагала хождение катера меандрами вдоль побережья так, чтобы галсы, ориентированные по нормали к берегу, имели максимальную длину для регистрации ADCP по возможности большей информации. По результатам съемки (рис. 2) видно, что поле течений имеет сложный характер.

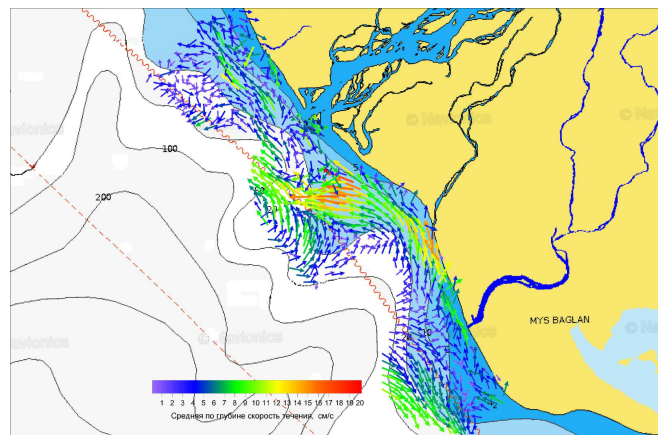


Рис. 2: Система течений в шельфовой зоне Черного моря вблизи впадения р. Кодор. Измерения 27.10.2015

Узкий поток вдольберегового северо-западного течения встречается с выносимыми в море водами Кодора, при этом происходит вихреобразование. В то же время, течения на удалении от берега перестраиваются таким образом, что основной поток распресненной воды переносится в юго-восточном направлении. Интересны данные ADCP по обратно рассеянному сигналу. Речные воды выносят с собой большое количество взвешенного вещества, что вызывает существенное усиление обратно рассеянного сигнала. На рис. 3 показаны данные сечения, которое находилось напротив впадения р. Кодор. На сечении хорошо прослеживается повышенная концентрация взвешенного вещества в приповерхностном слое моря. По мере удаления от берега имеет место углубление и расширение области «мутной воды».

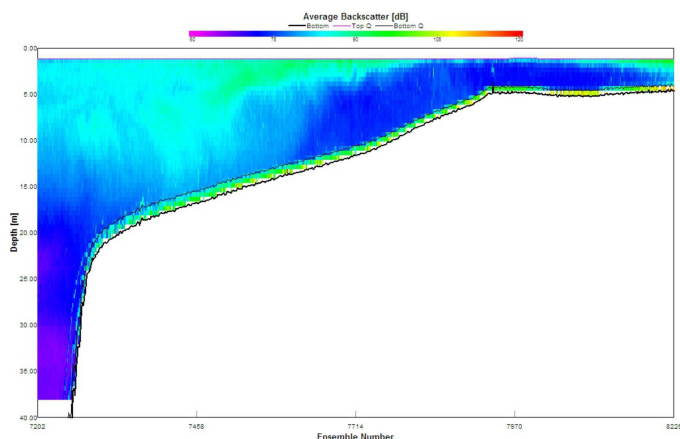


Рис. 3: Картина обратного акустического рассеяния на разрезе в прибрежной зоне моря (27.10.2015) напротив впадения р. Кодор

4. ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Режим внутреннего волнения прибрежной зоны Абхазии обладает свойствами, характерными для внутренних волн всего Черного моря, но также имеет свои особенности. Обобщая все данные измерений за период 2013–2016 гг., можно отметить почти постоянное присутствие в шельфовой зоне инерционных колебаний термоклина. Также часто регистрируются и короткопериодные внутренние волны с периодами от единиц до десятков минут. На абхазском шельфе в отличие от других шельфовых районов Черного моря отмечена повышенная интенсивность инерционных колебаний. Неоднократно были зарегистрированы инерционные внутренние волны высот до 20 м [3]. Эта особенность по-видимому обусловлена наличием узкого шельфа и близостью глубокой воды. На рис. 4 представлена временная запись термисторной цепочки, которая была установлена на глубине 41 м во время осенней экспедиции в 2013 г. Водная толща достаточно хорошо прогрета, температура от поверхности до глубины 25 м составила 21–22°C, термоклин приглубый и занимает положение на глубине 30–35 м. На протяжении всего периода наблюдений среднее положение термоклина в целом имеет тренд к поднятию. На записи хорошо просматриваются интенсивные внутренние волны с периодом близким к локальному инерционному (около 17,3 ч). Высоты этих инерционных волн составляют 5–7 м.

Во время весенних наблюдений в 2014 г. у эстакады был зарегистрирован цуг короткопериодных внутренних волн типа «солибора» (рис. 5). До подхода цуга термоклин в прибрежной акватории был приповерхностным. Однако подход волн-углублений сопровождался еще большим поднятием термоклина к поверх-

ности моря. Такие особенности процесса обусловлены близостью холодной воды, поднимающейся из глубоководной части моря.

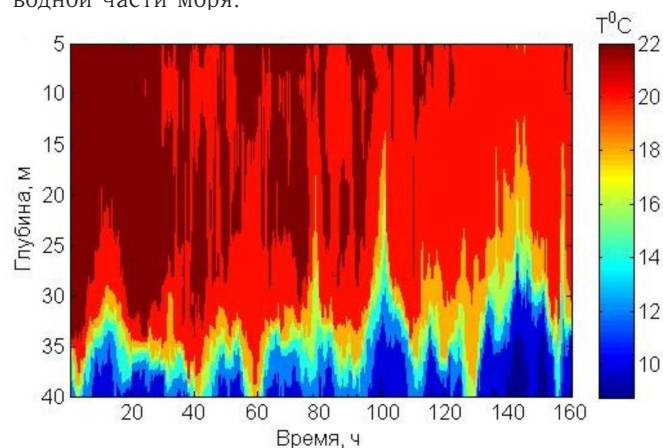


Рис. 4: Колебания температуры по измерениям термисторной цепи в 2013 г.

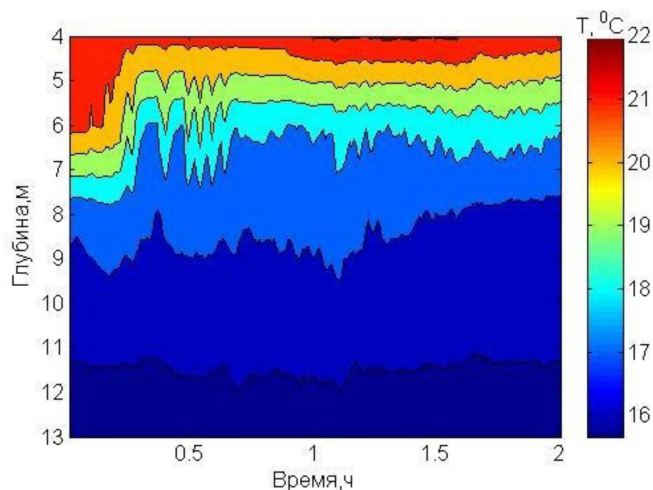


Рис. 5: Временной разрез температуры водной толщи при прохождении внутреннего бора 28.05.2014

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, за четыре года российско-абхазского научного сотрудничества удалось получить информативный массив важных данных об особенностях гидрофизической изменчивости полей шельфа Абхазии.

Работа была проведена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-02-90301 Абх_а, № 15-52-40012 Абх_а, № 17-52-40016 Абх_а, № 16-35-00454 мол_а).

- [1] Серебряный А. Н. ADCP как мощный инструмент акустической океанологии: опыт десяти лет исследований на шельфе российских морей. Акустика океана. Доклады 14-ой школы-семинара акад. Л. М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 231.
- [2] Елистратов В. П., Кенигсбергер Г. В., Моисеенков В. И., Серебряный А. Н. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2014. № 6.
- [3] Серебряный, А. Н., Химченко, Е. Е. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. 11, № 3. С. 88.

Acoustic diagnostics of hydrophysical variability on Abkhazian shelf of the Black Sea

A. N. Serebryany^{1,2,a}, G. V. Kenigsberger³, V. P. Elistratov³, K. D. Sabinin², O. E. Popov⁴, A. N. Svadkovsky², L. L. Tarasov², D. M. Denisov², E. E. Khimchenko¹, V. N. Chekaida²

¹P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS. Moscow 117997, Russia

²JSC N. N. Andreev Acoustical Institute. Moscow 117036, Russia

³Hydrophysical Institute of Abkhazian Academy of Sciences. Sukhum, Abkhazia

⁴A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS. Moscow 119017, Russia

E-mail: ^aserebryany@hotmail.com

The results of observation of the variability of marine environment by acoustic and contact methods on the Abkhazian shelf of the Black Sea are presented. Russian–Abkhazian scientific cooperation have been supported by RFBR since 2013. The main goal of the research was to study the dynamics of the coastal waters of the shelf with a steep slope in conditions of spring-summer stratification. Measurements were carried out on a stationary track in the coastal zone by the method of acoustic autogeneration (Furduyev's method), but the main part of data was obtained by ADCP «Rio Grande 600 kHz» acoustic Doppler profilometer, which was fixed at trestle. Also, in various sections of shelf were made spatial surveys with ADCP installed on a small motor vessel. Representative data of currents direction in coastal waters, their variability in water bulk and in time, as well as vertical structure of sound velocity and temperature were obtained. The material on temporal and spatial (in vertical) variability of backscattering acoustic signal, which provides information about water contamination, was also obtained. Particular attention was paid to the investigation of internal waves, which, in addition to measurements by an acoustic profilometer, were also recorded by anchored vertical thermistor chains. Short-period (from units to tens of minutes) and long-period oscillations of the thermocline with a period close to the inertial one were recorded. The features of internal waves which propagate close to the shore were revealed. Special studies to monitor the coastal currents were conducted in the areas of the Gumista and Kodor rivers flowing into the sea.

PACS: 43.30; 43.80; 47.35

Keywords: acoustic diagnostics, ADCP, currents, internal waves.

Received 09 July 2017.

Сведения об авторах

1. Серебряный Андрей Нинелович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, нач. отдела; e-mail: serebryany@hotmail.com.
2. Кенигсбергер Генрих Викторович — зам. директора; e-mail: kenigsbergerg@mail.ru
3. Елистратов Валерий Петрович — вед. науч. сотрудник; e-mail: sgiana@mail.ru
4. Сабинин Константин Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник.
5. Попов Олег Евгеньевич — ст. науч. сотрудник; e-mail: olegp@mail.ru.
6. Свадковский Андрей Николаевич — вед. инженер; e-mail: svadkovski@mail.ru.
7. Тарасов Леонид Львович — науч. сотрудник; e-mail: tarasov@akin.ru.
8. Денисов Дмитрий Михайлович — ст. науч. сотрудник; e-mail: denisov.dimitry@gmail.com.
9. Химченко Елизавета Евгеньевна — мл. науч. сотрудник; e-mail: ekhymchenko@gmail.com.
10. Чекайда Владимир Никифорович — науч. сотрудник; e-mail: tchekaida@yandex.ru.