**А.Н. Серебряный^{1,2}, Г.В. Кенигсбергер³, Е.Е. Химченко¹,
О.Е. Попов⁴, Д.М. Денисов², Л.Л. Тарасов²,
В.В. Медведовский³, В.Н. Чекайда²**

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ НА ШЕЛЬФЕ АБХАЗИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

¹*Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36,
Тел.: 8(499)124-59-96, E-mail: serebryany@hotmail.com*
²*АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева»
Россия, 117036, г. Москва, ул. Шверника, 4; Тел.: 8(499)723-6300*

³*Институт экологии Академии наук Абхазии
Абхазия, 117036, г. Сухум, ул. Красномаяцкая, 67,
Тел.: 8(840)223-53-88, E-mail: kenigsbergerg@mail.ru*

⁴*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский переулок, 3,
E-mail: olegp@mail.ru*

Представлен обзор экспериментальных исследований по акустической диагностике процессов на черноморском шельфе Абхазии, проводимых в рамках проекта российско-абхазского сотрудничества за период 2017–2019 г. Выявлены особенности прибрежного вдольберегового течения на шельфе с крутым дном во время весенней стратификации – наличие сдвигового течения и возможность в нем триггер-эффекта. Показано влияние реки Кодор на систему прибрежных течений и ее изменчивость в зависимости от силы стока реки. Изучен вброс взвешенного вещества рекой в шельфовую зону моря. Представлены новые данные о внутренних волнах на крутом шельфе, полученные с помощью пространственной антенны автономных распределенных датчиков температуры.

Ключевые слова: акустическая диагностика, ADCP, Черное море, шельф, течения, внутренние волны

Введение

Нами продолжают экспериментальные исследования по акустической диагностике процессов на черноморском шельфе Абхазии, проводимые в рамках проекта российско-абхазского сотрудничества, которые были начаты в 2013 г. В докладе будут представлены основные результа-

ты, полученные в 2017–2019 гг. В перечень изучаемых процессов входят исследования особенностей прибрежных течений и внутренних волн на шельфе с крутым дном, а также исследование динамики вод моря вблизи места впадения крупных рек (на примере реки Кодор).

Особенности прибрежных течений у берега с крутым уклоном дна. Ранее уже отмечались особенности, связанные с усилением прибрежных вдольбереговых течений до максимальных величин (1 м/с и более), связанные с близким подходом в прибрежную зону стрежня Основного Черноморского течения (ОЧТ). Так, в сентябре 2016 г. наблюдалось периодическое появление сильного с-з течения до 0.8 м/с, обусловленное действием инерционных движений, сдвигающих ОЧТ к берегу. Сейчас мы хотим обратить внимание на другую важную особенность прибрежных течений, выявленную в последние годы, напрямую связанную с сезонностью. Течения здесь всегда преимущественно имеют вдольбереговую северо-западную направленность. Так, в июне 2018 г. течения наблюдались в 78% времени, а в июне 2019 г. – в 74%. Также характерно, что по направленности течение в летне-осенний период однородно по глубине. Однако в весеннее время (май–июнь) возникают периоды, когда течение становится двухслойным сдвиговым, как представлено на рис. 1, для 18 июня 2019 г., где видно, что придонное течение направлено на северо-запад, а в поверхностной части водной толщи (выше горизонта 5–6 м при глубине места 13 м) – на юго-восток, т.е. в противоположном направлении. Глубина смены знака течений совпадает с положением термоклина, а двухслойный характер течения можно объяснить динамикой подходящих в прибрежную зону инерционных внутренних волн.

Рис. 1. Направление течений по данным ADCP для участка записи от 18 июня 2019 г. с 06:23 до 16:05. Характерное прибрежное сдвиговое течение: западное – в придонной области, восточное – в приповерхностной.

Весной 2018 г. также наблюдалось наличие сильного сдвигового течения, охватывающего всю 13-метровую водную толщу. Верхний 6-метровый слой двигался на восток, а нижний слой – в противоположном направлении, на запад. Более того, наблюдалось кардинальное изменение в течение часа системы течений – верхний слой стал двигаться на запад, а нижний – на восток (рис. 2). Произошел своего рода «триггер-эффект» – переключение направленности двухслойного сдвигового течения. Причем западное течение сохраняло большую интенсивность по сравнению с восточным на протяжении всего времени наблюдения, не зависимо от того, находилось оно в верхнем или нижнем слое моря. Происхождение этого эффекта пока не понятно. Оно требует дальнейшего изучения.

Рис. 2. Направление течений по данным ADCP для участка записи от 20 июня 2018 г. с 06:52 до 15:27. Наблюдаемый «триггер-эффект» в прибрежных течениях.

Особенности динамики прибрежных вод у места впадения большой реки. Было проведено обобщение собранных данных об особенностях структуры вод и течений, прилегающих к месту впадения в море реки Кодор, по результатам проведенных измерений с малого моторного судна, оснащенного ADCP “RioGrande 600 kHz”. Особенность гидрологической структуры исследованной акватории – присутствие плюма распресненных вод, несущих с собой в море большое количество взвешенного вещества. Выброс речных вод в море хорошо просматривается на спутниковых изображениях оптического диапазона. Спутниковые снимки дают информацию о распространении речных вод над шельфом в поверхностном слое моря, но остается вопрос о том, что происходит с речными водами в глубине. Измерения с помощью ADCP позволяют дать ответ на этот вопрос и зарегистрировать характерные особенности распространения взвешенного вещества в водной толще. Были проведе-

ны измерения как в случае сильного, так и слабого стока речных вод в море [1]. Съёмки делались в приустьевом участке моря путем прохождения вдоль побережья по набору сечений, ориентированных по нормали к берегу. В результате были получены разрезы, на которых измерены течения и характеристики коэффициента обратного акустического рассеяния от поверхности до дна моря в пределах глубин менее 100 м. Объединение данных всех разрезов дало возможность построить пространственные картины течений и поверхностной температуры на полигоне, а также пространственного распределения взвешенного вещества. На рис. 3 приведены примеры пространственного распределения коэффициента рассеяния в случае слабого и сильного речного стока. При сильном стоке выделяются области выноса взвешенного вещества напротив места впадения реки в море.

Рис. 3. Пространственное распределение коэффициента акустического рассеяния в прибрежной зоне по результатам съемки ADCP при слабом (слева) и сильном (справа) стоке Кодора.

Проведенное сопоставление измеренных характеристик при сильном и слабом стоке речных вод выявило следующие основные черты динамики прибрежных вод. Воды Кодора образуют плум в море площадью в среднем около 1×2 км, от которого распространяются шлейфы распресненных вод. Шлейфы в зависимости от фонового вдольберегового течения могут распространяться в море на десятки километров как в западном, так и в юго-восточном направлении. Они сопровождаются движущимися локальными гидрологическими фронтами, генерирующими цуги интенсивных короткопериодных внутренних волн, аналогично процессу генерации внутренних волн интрузией распресненных поверхностных вод, описанному в [2]. Характер течений в прибрежной зоне при условиях интенсивного речного стока очень неоднородный как по величине, так и по направлению. Главной чертой системы прибрежных течений в это время является узкая область сильного течения от берега напротив места впадения реки. Она проявляется присутствием

развитого сулоя – области усиленного поверхностного волнения с обрушивающимися гребнями волн, прохождение которого, особенно в весеннее время на малом судне, представляет сложную задачу. Для водной толщи этой области характерно наличие интенсивных короткопериодных волн с амплитудами до 3–5 м и длинами 40–50 м. Все вышеназванные особенности типичны для режима интенсивного стока речных вод, который наблюдается после сильных дождей или в паводковый период. При слабом стоке влияние реки на течения существенно меньше и ограничивается узкой прибрежной зоной. В это время не наблюдаются ни сулои на поверхности моря на траверсе впадения реки, ни внутренние волны в прилегающей приповерхностной толще моря. При этом в динамике прибрежных вод доминируют фоновые вдольбереговые течения, на характер которых оказывает большое влияние меандрирование ОЧТ и прохождение субмезомасштабных топографических вихрей.

Внутренние волны на шельфе с крутым уклоном дна. В октябре 2019 г. был проведен специализированный эксперимент по исследованию внутренних волн, особенностью которого было использование наряду с другими средствами измерений, обычно применяемых в нашей практике, пространственной антенны распределенных датчиков температуры (РДТ). Антенна состояла из 3 автономных РДТ [3] длиной 10 м, расположенных в углах треугольника со сторонами 115, 50 и 70 м и помещенных в слой термоклина. Глубина моря в месте постановки антенны была в пределах 56–86 м. Измерения проводились в течение 10 суток. Записи РДТ зарегистрировали почти регулярные вертикальные колебания термоклина с периодичностью 17 ч, вызванные подходящими в прибрежную зону инерционными внутренними вол-

нами с амплитудами до 5–8 м. К гребням длинных волн были привязаны пакеты короткопериодных внутренних волн с периодами 3–8 мин. На рис. 4 приведен частотный спектр, рассчитанный по длительной записи РДТ. На спектре выделяются пики инерционных и короткопериодных внутренних волн. Проведенный анализ записей антенны РДТ выявил основное на-

Рис. 4. Частотный спектр внутренних волн по данным РДТ.

правление прихода коротких внутренних волн с юго-восточной стороны открытого моря. Полный результат анализа характеристик внутренних волн и их особенностей представлен в [4].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (тема государственного задания № 0149-2019-0011), а также РФФИ (проекты №19-52-40007 и № 19-05-0715).

Литература

1. Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л., Кенигсбергер Г.В. Вброс взвешенного вещества рекой Кодор на шельф Черного моря по данным ADCP // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ИО РАН, 2019. С. 85–89.
2. 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.
3. Денисов Д.М., Серебряный А.Н. Автономный измеритель внутренних волн на основе распределенного датчика температуры // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 159–160.
4. Serebryany A., Popov O., Khimchenko E., Denisov D., Tarasov L., Kenigsberger G. Internal Waves Study on Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using Spatial Antenna of Line Temperature Sensors // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. (в печати).

**A.N. Serebryany^{1,2}, G.V. Kenigsberger³, E.E. Khimchenko¹,
O.E. Popov⁴, D.M. Denisov², L.L. Tarasov²,
V.V. Medvedovskiy³, V.N. Chekida²**

ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF PROCESSES ON THE SHELF OF ABKHAZIA: RESULTS OF RECENT STUDIES

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

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

*³Institute of Ecology, Academy of Sciences of Abkhazia
Krasnomayatskaya str., 67, Sukhum, Abkhazia, 384900,
Tel.: 8(840)223-53-88, E-mail: kenigsberger@mail.ru*

*⁴Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS
Pyzhevsky per., 3, Moscow, Russia, 119017,
E-mail: olegp@mail.ru*

A review of experimental studies on the acoustic diagnostics of processes on the Black Sea shelf of Abkhazia carried out as part of the Russian-Abkhazian cooperation project for the period 2017–2019 is presented. The features of the coastal alongshore flow on a steep-bottom shelf during spring stratification

are revealed – the presence of a shear flow and its possibility to have a trigger effect. The influence of the Kodor river on the system of coastal currents and its variability depending on the strength of the river flow is shown. The injection of suspended matter by the river into the shelf zone of the sea was studied. New data on internal waves on a steep shelf, obtained using a spatial antenna of autonomous distributed temperature sensors, are presented.

Keywords: acoustic diagnostics, ADCP, Black Sea, shelf, currents, internal waves

Acknowledgment: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (subject of the state assignment No. 0149-2019-0011), as well as the RFBR (projects No. 19-52-40007 and No. 19-05-0715).

References

1. Serebryany A.N., Tarasov L.L., and Kenigsberger G.V. Vbros vzveshennogo veshchestva rekoi Kodor na shel'f Chernogo morya po dannym ADCP (Discharge of suspended matter by the Kodor River to the Black Sea shelf according to ADCP data). Geology of seas and oceans. Proceedings of XXIII International Conference on Marine Geology, Vol. III, Moscow: IO RAS, 2019, pp. 85–89.
2. Ivanov V.A. and Serebryany A.N. Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo morya (Internal waves on shallow shelf of non-tidal sea). Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.
3. Denisov D.M. and Serebryany A.N. Avtonomnyi izmeritel' vnutrennikh voln na osnove raspredelennogo datchika temperatury (Stand-alone internal wave meter based on a line temperature sensor). Pribory i tekhnika eksperimenta, 2019, No. 2, pp. 159–160.
4. Serebryany A., Popov O., Khimchenko E., Denisov D., Tarasov L., Kenigsberger G. Internal Waves Study on Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, (in press).