

УДК 551.466.8

## РЕГИСТРАЦИЯ КОСЯКОВ РЫБ, ПРИВЛЕКАЕМЫХ СОЛИТОНАМИ ИНТЕНСИВНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

© 2020 г. академик РАН В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, А. Н. Серебряный<sup>1,2,\*\*</sup>, В. В. Замшин<sup>1</sup>

Поступило 20.03.2020 г.

После доработки 23.03.2020 г.

Принято к публикации 23.03.2020 г.

Приводятся результаты обнаружения необычного эффекта, связанного с привлечением стай рыб интенсивными внутренними волнами в шельфовой зоне Чёрного моря. При проведении исследований с помощью акустического доплеровского профилометра течений (ADCP) на шельфе вблизи г. Геленджик обнаружен косяк рыб, положение которого было привязано к цугу интенсивных внутренних волн, движущихся к берегу. Цуг состоял из аномально больших для Чёрного моря внутренних волн с высотами до 16 м, орбитальные течения которых интенсивно взмучивали донные осадки, в состав которых входили кормовые компоненты, привлекательные для рыб. Наибольший эффект взмучивания производился двумя головными волнами цуга, имевшими максимальные амплитуды, в районе которых были обнаружены стаи рыб сопровождавшие внутренние волны в течение 2.5 ч, до стадии их затухания при подходе к берегу.

*Ключевые слова:* интенсивные внутренние волны, солитоны внутренних волн, стаи рыб, шельф, сигнал обратного рассеяния, ADCP, дистанционное зондирование

**DOI:** 10.31857/S2686739720060031

### ВВЕДЕНИЕ

Влияние физических явлений, происходящих в океанской и морской среде, на поведение обитающих в ней организмов представляет большой интерес, но недостаточно изучено. Самым известным в этом плане оказывается феномен океанских гидрологических фронтов, а также апвеллингов, свойство которых привлекать рыбные косяки широко используют в рыбном промысле.

Другой важный элемент океанской гидродинамики – внутренние волны, распространяющиеся в водной стратифицированной толще [1, 2], которые также оказывают влияние на поведение морских обитателей. Наблюдения, проведенные в Южно-Китайском море, выявили интересный эффект привлечения характерными для этого района огромными 150-метровыми внутренними волнами гринд – морских млекопитающих семейства дельфиновых [3]. Сопутствующие уединенным волнам, зоны дивергенции на заднем

фронте волны выносили из глубин к поверхности зоопланктон, мелких рыб и кальмаров, служащих для гринд кормовой базой. На шельфе Атлантики у мыса Гаттерас были отмечены скопления дельфинов в придонной области в моменты выхода туда холодных вод повышенной солености, обогащенных питательными веществами [4]. Перенос на шельф придонных вод с материкового склона в том районе производится внутренними борами – внутренними приливными волнами, подвергшимися сильной нелинейной трансформации [5].

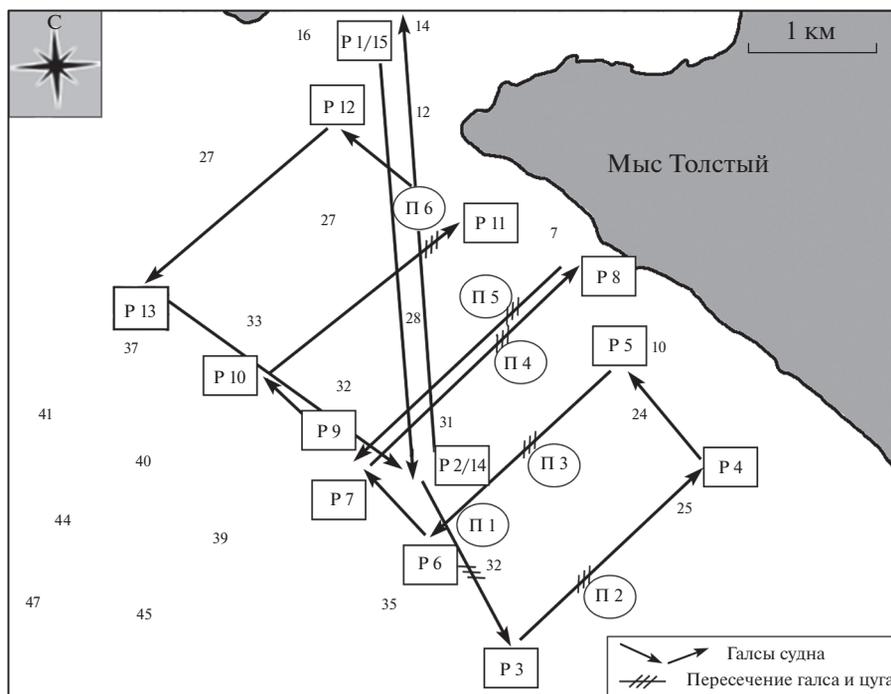
Начиная с 2012 г., в прибрежных акваториях Чёрного моря проводились комплексные наземно-космические исследования антропогенных воздействий на морскую среду, в ходе которых измерялись различные ее параметры [6–10]. Измерения проводились с борта различных космических аппаратов с помощью многоспектральной оптической и радиолокационной аппаратуры дистанционного зондирования [6–9], а также с борта научно-исследовательских судов с использованием различных датчиков [8, 9], в том числе с помощью буксируемых акустических доплеровских профилометров течений ADCP [6, 8, 9]. Приборы ADCP находят успешное применение для решения различных задач океанологии [10, 11] и, в том числе, хорошо регистрируют внутренние волны [2, 5, 12], а также позволяют выявлять стаи рыб в водной толще [13].

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

\*\*E-mail: serebryany@hotmail.com



**Рис. 1.** Схема проведения экспериментальных исследований с помощью буксируемого ADCP в районе геленджикского шельфа у мыса Толстый с указанием траектории и точек разворота судна, а также мест обнаружения сопровождаемых скоплениями рыб цуга интенсивных внутренних волн.

В данном сообщении рассматривается район проведения экспериментальных работ вблизи г. Геленджик, который достаточно хорошо изучен [6, 7]. В этом районе с помощью ADCP нами был зарегистрирован необычный случай сопровождения движущегося к берегу пакета интенсивных внутренних волн косяком рыб (по всей видимости, черноморской ставриды). Ниже приводится описание этого явления.

### ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

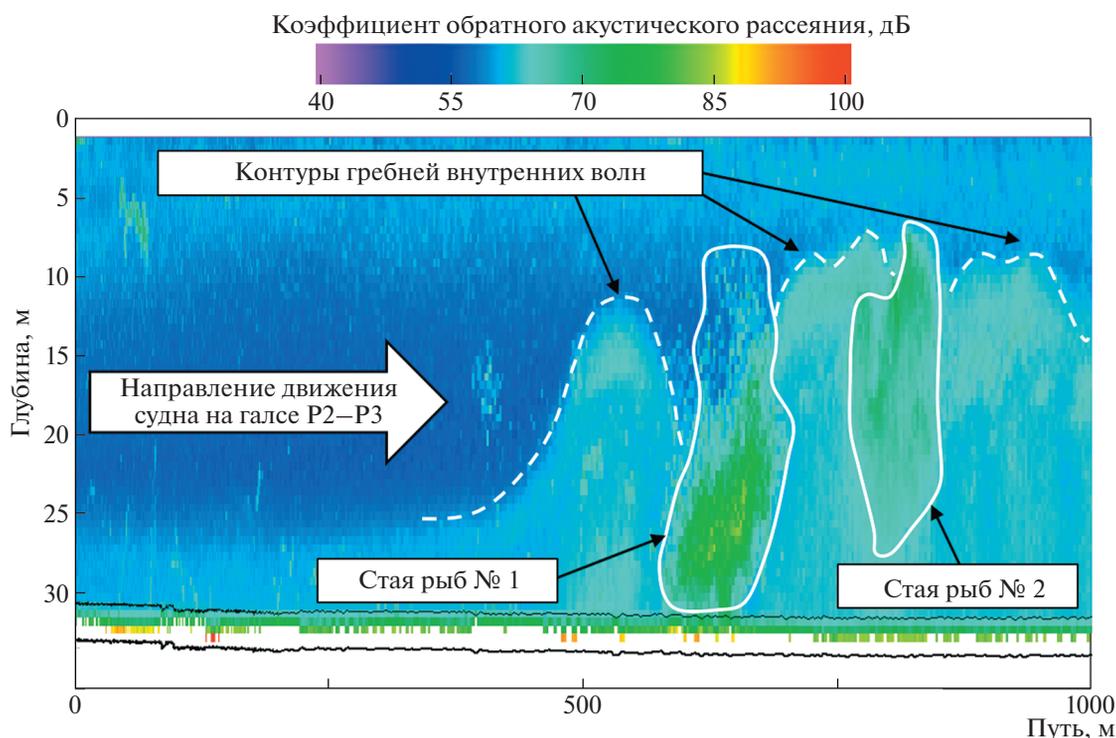
Схема проведения измерений приведена на рис. 1, где стрелками показаны галсы судна, при этом точки разворота судна обозначены как P1...P15.

В ходе проведения натурных ADCP-измерений 7 октября 2015 г. нами был обнаружен цуг необычно больших внутренних волн с амплитудами, рекордными для бесприливного Чёрного моря [14]. Генерация этого аномального цуга, как показал последующий анализ [15], была вызвана проходящим над морем атмосферным фронтом. Цуг состоял из четырех и более волн солитоноподобного типа с характерной формой обостренных гребней и сглаженных подошв. Подробное описание характеристик волн в цуге дано в работах [14, 15], поэтому здесь укажем лишь его наиболее

существенные параметры. Длины волн составляли величины от 101 до 131 м. Волны двигались из мористой части акватории по направлению к берегу (с ЮЗ на СВ). Высоты волн составляли величины в пределах 11–16 м [14, 15].

Большие высоты зарегистрированных в этом эксперименте внутренних волн были причиной интенсивных орбитальных течений, достигавших значений 0.2–0.15 м/с. В свою очередь, орбитальные течения имели значительную вертикальную составляющую, вызвавшую интенсивное взмучивание лежащих на дне осадков, которые, являясь кормовой базой, привлекли внимание стаи черноморской ставриды, “оседлавших” две головные волны цуга.

На рис. 2 показана запись эхолокационных контрастов, сделанная ADCP при пересечении цуга на встречном курсе судна под углом около 30° относительно фронта головной волны на галсе P2–P3 (см. рис. 1). На сечении цуга обращают на себя внимание области усиленного рассеяния звука, расположенные между гребнями волн, обусловленные присутствием стай рыб. Указанные области (отмечены на рис. 2 как “Стая рыб № 1” и “Стая рыб № 2”) – акустическое изображение фрагментов стай рыб, привлеченных восходящим от дна потоком, содержащим кормовые компоненты. Места пересечения судном сопровождаемых скоплениями рыб цуга внутренних волн по-



**Рис. 2.** Картина эхолокационного контраста по данным ADCP при прохождении через пакет нелинейных внутренних волн на галсе P2–P3. Сразу за головной волной в придонной области находится плотное скопление черноморской ставриды (стая рыб № 1). Далее на расстоянии одной длины волны расположена вторая стая рыб с меньшей плотностью (стая рыб № 2).

казаны на рис. 1 штрихами и обозначены как П1...П6.

Вертикальный поток, как уже упоминалось, возник вследствие значительной вертикальной составляющей орбитальных течений наблюдаемых внутренних волн, достигающей 0.2 м/с [14].

Коэффициент обратного акустического рассеяния в области присутствия стаи рыб № 1 составлял величину 75–83 дБ и превосходил на ~20 дБ фоновое значение, характерное для остальной водной толщи на всем галсе. Размеры зарегистрированной по ADCP части этой стаи составляли по горизонтали ~80 м и по вертикали ~14 м. Стая черноморской ставриды при глубине места 33 м располагалась в придонной области глубже 15 м.

Рядом с первой стаей на расстоянии длины внутренней волны у подошвы третьей волны было зарегистрировано второе скопление рыб с меньшей плотностью особей (коэффициент обратного акустического рассеяния 66–71 дБ). По размерам это скопление похоже на первую стаю черноморской ставриды, но расположилось оно выше – между горизонтами 7 и 23 м.

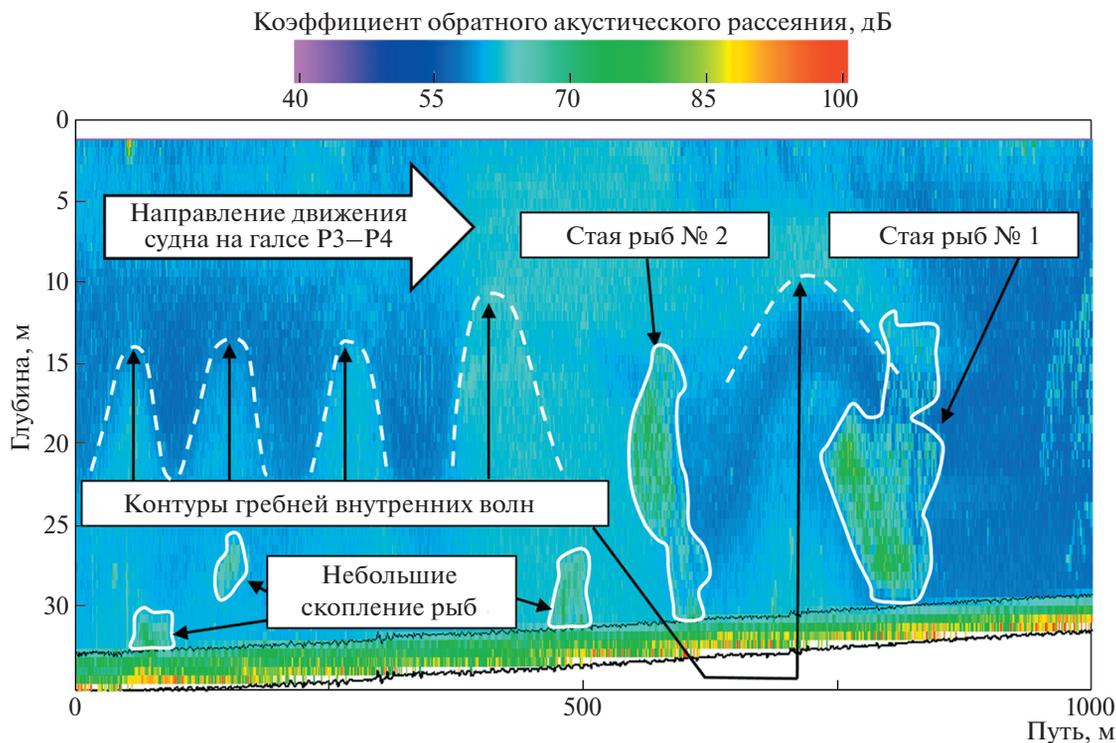
Интересно, что обнаруженный косяк рыб, разделившийся на две стаи, сопровождал головную часть цуга внутренних волн достаточно длительное время и регистрировался 6 раз (см. рис. 1,

точки П1...П6), при этом стаи рыб обнаруживались с различных сторон гребней. Кроме того, регистрировались и более мелкие скопления рыб. Например, на галсе P3–P4, наблюдалась картина эхолокационных контрастов, связанных со скоплениями рыб, представленная на рис. 3.

В ходе проведения судовых измерений выполнялись поперечные сечения по шельфу с шагом около 1 км вдоль побережья со смещением по фронту головной волны на северо-запад (см. рис. 1), при этом присутствие рыбных скоплений регистрировалось на каждом сечении. Скопления рыб, хотя и менее плотные, чем обнаруженные на первых сечениях, сопровождали внутренние волны при их движении к берегу в течение ~2.5 ч, пока цуг не дошел до глубин 26 м, переместившись на расстояние около 2 км, где он стал терять свои большие амплитуды.

Ширина фронта головной волны согласно оценкам, сделанным, в том числе, с использованием космического радиолокационного изображения, полученного со спутника Sentinel-1, составляла не менее 4 км [14, 15].

Таким образом, полученные экспериментальные данные, свидетельствуют о том, что наблюдаемое явление привлечения стай рыб внутренни-



**Рис. 3.** Картина эхолокационных контрастов на галсе судна Р3–Р4. Стаи рыб концентрировались у головных внутренних волн. У последующих волн наблюдались небольшие скопления рыб, которые регистрировались в виде компактных областей повышенных значений коэффициентов звукорассеяния.

ми волнами на шельфе происходило на километровых масштабах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внутренние волны – типичное явление для Чёрного моря, они здесь часто наблюдаются, но обычно их амплитуды невелики и не превышают нескольких метров. Однако, иногда “включаются” особые природные источники генерации интенсивных внутренних волн [1], как было в нашем случае [15]. При этом генерируемые солитоноподобные внутренние волны достигают больших для Чёрного моря амплитуд и оказывают существенное воздействие на водную среду, в первую очередь, ведя к интенсивному внутреннему перемешиванию стратифицированных вод [14, 15]. Распространяясь на придонном термоклине шельфа, они взмучивают донные осадки. В то же время известно, что прибрежные воды Чёрного моря привлекают рыб, ищущих корм. В нашем случае цуг интенсивных внутренних волн, движущихся к берегу, оказался привлекательным для стаи черноморской ставриды, которая сопровождала его в течение нескольких часов. Записи ADCP позволили не только наблюдать скопления рыб, но и выявить их привязку к двум головным волнам цуга, которые имели максимальные ам-

плитуды и создавали максимальные вертикальные скорости, перенося из придонного слоя в середину водной толщи кормовые компоненты для рыб (по-видимому, скопления планктона, лежащего на придонном термоклине, а также другие придонные кормовые компоненты).

Как и в других упоминавшихся случаях, внутренние волны привлекают обитателей моря (дельфинов, рыб и др.) своим гидродинамическим воздействием, вынося для них кормовую базу. Этот эффект, имеющий место при наличии интенсивных внутренних волн, в том числе оказался возможным в бесприливном Чёрном море.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (темы государственного задания № 0149–2019–0011 и № 0588–2019–0030), а также РФФИ (проект № 19–05–00715).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебряный А.Н., Иванов В.А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6. № 3 С. 34–45.
2. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Спектральные характеристики и кинематика короткопе-

- риодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
3. Moore S.E., Lien Ch.-E. Pilot Whales Follow Solitary Internal Waves in the South China Sea // Marine Mammal Science. 2007. V. 23 (1). P. 193–196.
  4. Lockhart S.B., Muglia M., Dubbs L. Detection of Dolphin Burst-pulses off Cape Hatteras, North Carolina, Correlated to Oceanographic Features// J. Acoust. Soc. America. 2019. V. 145. P. 1856.
  5. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
  6. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Исследование полей течений и загрязнений прибрежных вод на геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из космоса. 2012. Т. № 4. С. 3–11.
  7. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н. и др. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование Земли из космоса. 2017. Т. № 6. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>
  8. Бондур В.Г., Иванов В.А., Воробьев В.Е., Дулов В.А., Долотов В.В., Замшин В.В., Кондратьев С.И., Ли. М.Е., Малиновский В.В. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 1. С. 103–115. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
  9. Bondur V.G., Zamshin V.V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // In book K.V. Anisimov et al. (eds.), Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development-2016”, 2018. P. 625–637. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>
  10. 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.
  11. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морских среды // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
  12. Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских волн на Гавайском шельфе // ДАН. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104. <https://doi.org/10.7868/S0869565213130173>
  13. Patro R., Zedel L., Spanu-Tollefsen C. Monitoring Fish Movement Using an ADCP // J. Acoust. Soc. America. 2000. V. 108. P. 2489. <https://doi.org/10.1121/1.4743187>
  14. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В. Аномальный цуг внутренних волн рекордных высот на шельфе Черного моря, генерируемый атмосферным фронтом // ДАН. 2018. Т. 483. № 4. С. 431–436. <https://doi.org/10.31857/S086956520003282-3>
  15. 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. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515531114-127>

## REGISTERING FISH SHOALS ATTRACTED BY SOLITONS OF INTENSIVE INTERNAL WAVES

Academician of the RAS V. G. Bondur<sup>a,\*</sup>, A. N. Serebryany<sup>a,b,##</sup>, and V. V. Zamshin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>\*</sup>E-mail: [vgbondur@aerocosmos.info](mailto:vgbondur@aerocosmos.info)

<sup>##</sup>E-mail: [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com)

The results of revealing an unusual effect associated with attracting fish shoals by intensive internal waves in the shelf zone of the Black sea were presented. During the research using an Acoustic Doppler current profiler (ADCP) in the shelf zone near the city of Gelendzhik, a shoal of fish was detected that followed a train of intense internal waves moving to the shore. The wave train consisted of 16 m internal waves unusually large for the Black sea. Orbital currents due to these waves intensively stirred up the sediments that contained some nutrients attractive to fish. The greatest effect of turbulence was produced by two head waves of the train, which had maximum amplitudes, near which the shoals of fish were discovered that accompanied internal waves for 2.5 hours, until their attenuation when approaching the shore.

**Keywords:** intensive internal waves, internal wave solitons, shoals of fish, continental shelf, backscattering signal, ADCP, remote sensing