

УДК 551.466.8

## ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПОТОКОМ РЕКИ КОДОР В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 2023 г. А. Н. Серебряный<sup>1, 2</sup> \*, Е. Е. Химченко<sup>1</sup>, В. В. Гончаров<sup>1</sup>,  
Л. Л. Тарасов<sup>2</sup>, О. Е. Попов<sup>3</sup>, Д. В. Белов<sup>1</sup>, И. П. Нешенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО “Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт экологии Академии наук Абхазии, Сухум, Абхазия

\*e-mail: serebryany53@list.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 17.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Представлены результаты проведенных в июне 2021 г. исследований внутренних волн в шельфовой зоне Черного моря на акватории, прилегающей к устью реки Кодор. Пространственные съемки с помощью ADCP “Rio Grande 600 kHz” выявили основные характеристики течений на акватории и наличие внутренних волн, сгенерированных потоком речной воды, впадающей в море. Внутренние волны были зарегистрированы на двух разрезах, ориентированных по нормали к береговой черте и простирающихся до глубин 100 м. Наблюдавшиеся волны имели черты нелинейных волн, располагались на приповерхностном термоклине и имели высоту до 3–6 м. Также были зарегистрированы короткопериодные внутренние волны заякоренной цепочкой термисторов в прибрежной зоне моря в виде цуга волн с кажущимся периодом около 3.5 мин. Проведен расчет дисперсионных кривых и собственных функций внутренних волн численным решением уравнения внутренних волн с учетом сдвига скорости в толще моря. Теоретические данные сопоставлены с экспериментальными. Они выявили существенное влияние потока речных вод на параметры сгенерированных внутренних волн, движущихся с потоком. Было подтверждено наблюдавшееся экспериментально уменьшение периодов волн и увеличение их групповой и фазовой скорости.

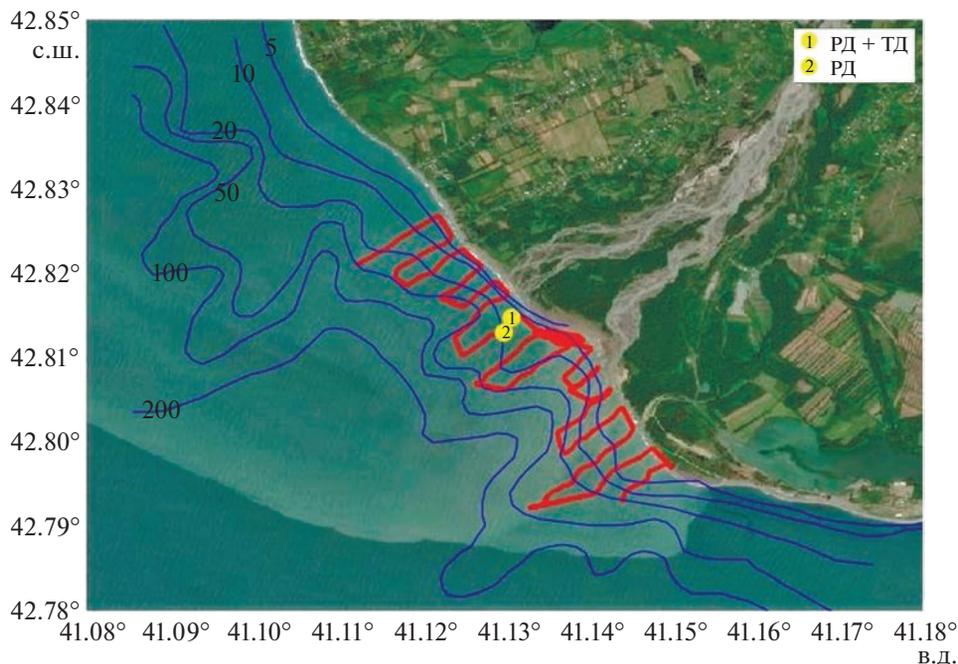
**Ключевые слова:** внутренние волны, речные воды, взвешенное вещество, акустическое объемное обратное рассеяние, ADCP, р. Кодор, шельф, Черное море

DOI: 10.31857/S0030157423060138, EDN: QIOUIV

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования внутренних волн (ВВ) остаются в фокусе внимания океанологов в течение нескольких десятков лет. За это время произошел существенный прогресс в изучении предмета. В частности, измерены параметры ВВ в различных районах Мирового океана, определены максимальные амплитуды ВВ [10, 20, 22, 24, 27, 34, 35] и регионы, где они встречаются [11, 25, 31, 33]. Исследовано влияние ВВ на распространение акустических сигналов в морской среде [4, 21, 29, 30, 39] и многие другие эффекты. В последнее время появилась новая страница в исследовании ВВ – это работы, посвященные механизмам их генерации в шельфовой зоне. В отличие от поверхностных волн, чья генерация связана в основном с ветровым воздействием, внутренние волны имеют много источников, но эта тематика до сих пор недостаточно изучена. Хорошо известен наиболее распространенный механизм их образования,

связанный с выходом на шельф приливных внутренних волн. Этот механизм отображен в многочисленных наблюдениях на шельфах океанов и морей [23, 35]. Возможна генерация внутренних волн проходящим над морем холодным атмосферным фронтом [1, 28], субмезомасштабными вихрями [6, 12, 18, 26, 28], а также при столкновении течений [14]. Получены доказательства еще нескольких механизмов образования внутренних волн в натуральных наблюдениях [36]. Особое внимание обращают на себя труды по генерации волн в море потоками опресненных вод впадающих в море рек [32]. Работая длительное время на абхазском шельфе [13, 15, 16, 19, 37, 38], мы столкнулись с этим явлением в прибрежной зоне устья реки Кодор, второй по протяженности и самой многоводной реки Абхазии. В данной работе мы представляем результаты измерений, проведенных в июне 2021 г., связанных с наблюдением ВВ, сгенерированных потоком впадающих в море речных вод Кодора.



**Рис. 1.** Район исследований на спутниковом снимке Sentinel-2 L2A от 21 июня 2021 г. Красными линиями показаны траектории галсов съемки катера с ADCP 20 июня 2021 г. в прибрежной зоне моря у устья Кодора. Голубые линии – изобаты 5, 10, 20, 50, 100 и 200 м. Желтые кружки – положение заякоренных станций.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

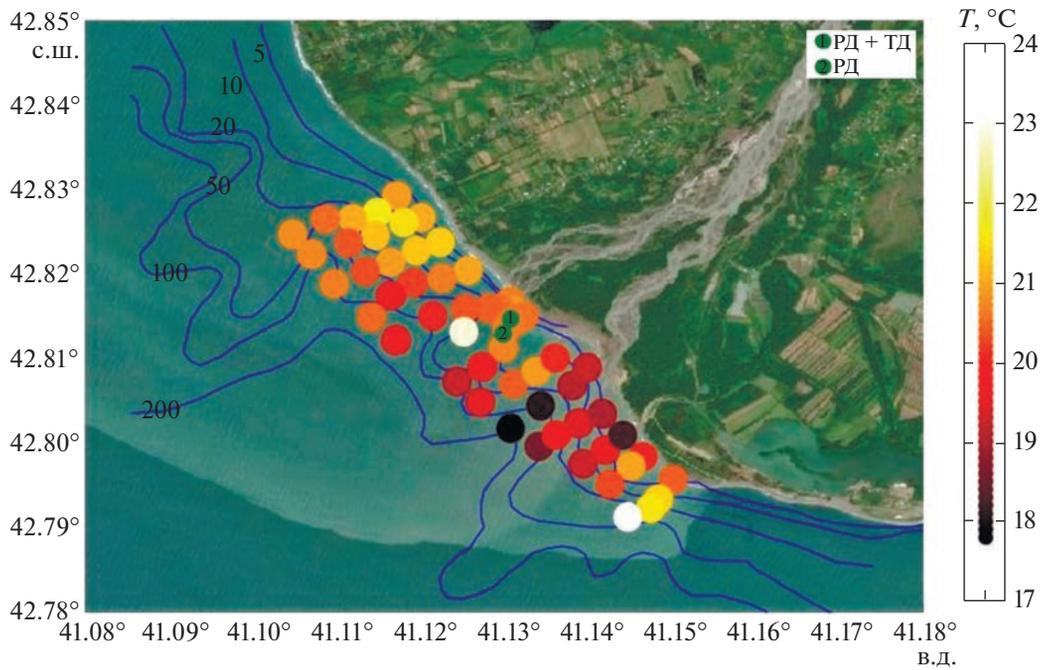
Исследования у устья Кодора проводились нами по методике “яхтенной океанологии”, которая подразумевает применение маломерных судов (моторных катеров или яхт), оборудованных компактными средствами измерения [13]. Съемки проводились в дневное время 20 и 26 июня 2021 г. 20 июня отмечалось более интенсивное поступление речных вод в море, поэтому мы детально остановимся на результатах именно этих измерений. Каждая съемка включала в себя работу двух моторных катеров на акватории. Один катер проводил непрерывную съемку с помощью акустического доплеровского профилометра течений (ADCP) “Rio Grande 600 kHz” в пределах акватории от береговой зоны до изобаты 100 м. Он проходил длинными галсами, ориентированными по нормали к берегу, связанными между собой короткими галсами, параллельными береговой черте (рис. 1). ADCP дает информацию о силе и направлении течений, а также об интенсивности обратно рассеянного акустического сигнала. Профилометр течений работал непрерывно на всех галсах, излучая и принимая акустические сигналы с периодом 0.8 с и с ячейкой осреднения сигнала по вертикали 0.5 м.

Одновременно на этой же акватории велась гидрологическая съемка с другого катера с зондом miniSVP, измеряющим вертикальные профили температуры и скорости звука (сделано 60 станций),

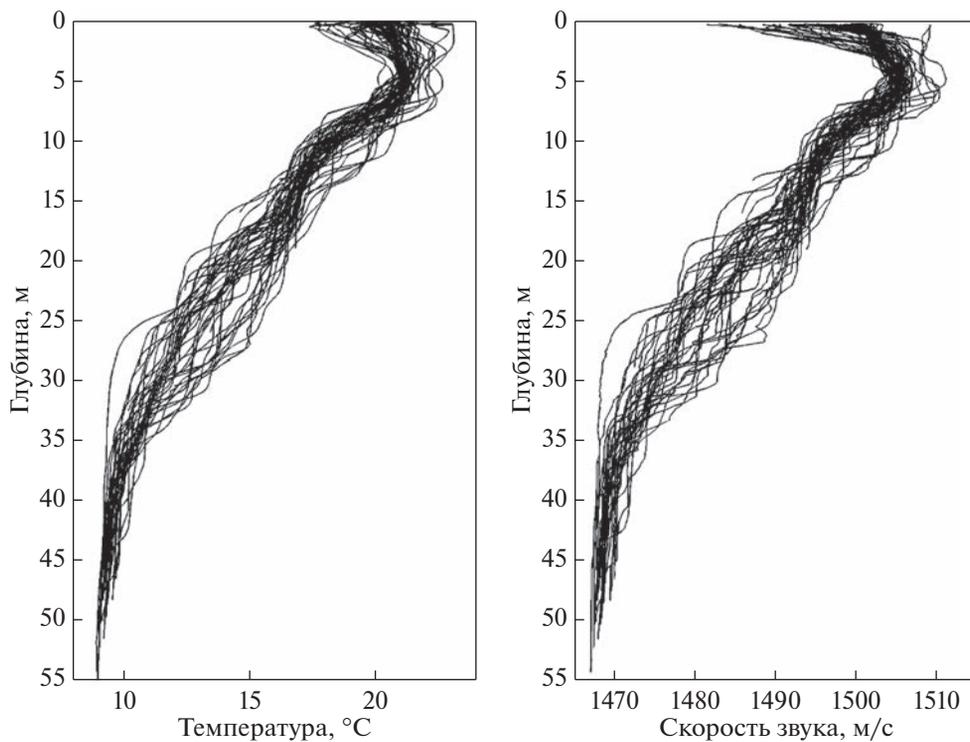
рис. 2. Кроме того, в прибрежной зоне для регистрации ВВ устанавливались заякоренные станции (гирлянды), оснащенные точечными датчиками температуры (ТД) “Star-Oddi” типа DST centi и/или распределенным датчиком температуры (РД) (положение гирлянд показано точками с нумерацией 1 и 2 на рис. 1, 2). 20 июня были установлены 2 станции (одна с РД и ТД, вторая – только с РД), а 26 июня – только 1 станция, оснащенная РД и датчиком давления (LevelLogger). Во время постановок интервал измерений по времени составлял 10 с. 20 июня на гирлянде было установлено 6 датчиков температуры, расположенных на горизонтах 1, 2, 3, 5, 7 и 10 м.

## 3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА АКВАТОРИИ МОРЯ У УСТЬЯ КОДОРА

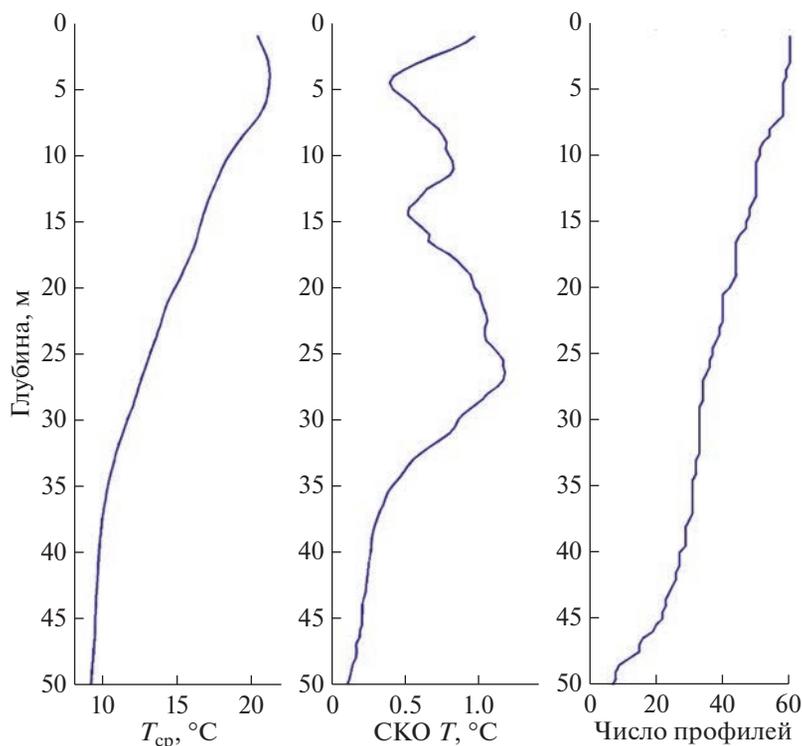
Известны результаты недавних детальных гидрохимических измерений вод плюма Кодора [9], а также измерения его гидрофизической структуры и попытки исследования динамики течений этого плюма [8]. Приведем результаты нашей гидрологической съемки. Представляется важным рассмотреть всю совокупность вертикальных профилей температуры и скорости звука, полученных на акватории во время съемки 20 июня (рис. 3). Для температурных профилей характерна особенность, связанная с присутствием приповерхностного слоя охлажденной воды (17°–20°С), вызванная реч-



**Рис. 2.** Район исследований на спутниковом снимке Sentinel-2 L2A от 21 июня 2021 г. Пространственное распределение температуры моря на глубине 1 м по результатам гидрологической съемки 20 июня и расположение сделанных гидрологических станций на акватории. Зеленые кружки – положение заякоренных станций.



**Рис. 3.** 60 вертикальных профилей температуры (слева) и скорости звука (справа), полученные во время съемки в прибрежной зоне 20 июня.



**Рис. 4.** Усредненный вертикальный профиль (слева), вертикальное распределение среднеквадратичных отклонений температуры (в центре), а также зависимость числа профилей от глубины, участвующих в статистике (справа).

ным стоком. Этот слой лежит в пределах от поверхности моря до глубин 4–5 м. Помимо пониженной температуры, для него характерна и меньшая соленость, что делает его слоем отрицательного вертикального градиента скорости звука, достигающего в отдельных точках экстремальных величин  $5 \text{ с}^{-1}$ . Ниже горизонта 5 м начинается область сезонного термоклина, простирающаяся до глубины 35–40 м. Волнообразная форма вертикальных профилей температуры и скорости звука объясняется воздействием фоновых короткопериодных ВВ, типичных для Черного моря. Также на профилях проявляется тонкая структура, связанная с процессами вертикального перемешивания.

Для каждого горизонта (с шагом 0.5 м) для всех профилей, которые достигали глубины 55 м, рассчитывались среднее значение температуры и ее среднеквадратичное отклонение (СКО). Результаты расчета представлены на рис. 4. Для глубины 45 м число профилей превышает 20, что формально считается допустимым для расчета статистических характеристик. Интересен характер изменения среднеквадратичных отклонений в зоне сезонного термоклина: наблюдается чередование по глубине максимумов и минимумов СКО, отличающихся более чем в 2 раза. Это свидетельствует о сложной динамике перемешивания речной и морской воды в приустьевой зоне. Для тем-

пературы СКО достигает максимума в  $1.2^\circ\text{C}$  на глубине 26.5 м.

Рассмотрим вертикальные профили температуры на разрезе напротив устья Кодора (рис. 5). Зондирования в точках на разрезе пронумерованы с 1 по 4. Для сравнения приведен профиль 5, полученный на самой удаленной западной точке акватории съемки как наименее подверженной речному стоку. Заметим, что частота Вэйсяля-Брента рассчитана на основе прямых измерений профилей температуры и скорости звука. Однако при пересчете в слое скачка могут возникать некоторые неточности, связанные с тем, что датчики температуры и скорости звука имеют разные постоянные времени. Для всех профилей разреза характерно присутствие более холодных вод в приповерхностном слое моря. Температура поверхности моря  $17^\circ\text{C}$  с глубиной возрастает до  $21^\circ\text{C}$ , после чего начинает уменьшаться, в соответствии с сезонной стратификацией. Исключения составляют только две ближайшие к берегу станции, где отмечена более теплая вода ( $20^\circ\text{C}$ ) у самой поверхности моря. Ее происхождение можно объяснить затоком узкой струи западного прибрежного течения, чье присутствие в поверхностном слое подтверждено данными ADCP. Подобно тому, что происходит с распределением температуры по глубине, происходит и с вертикальными профилями скорости звука. Однако,

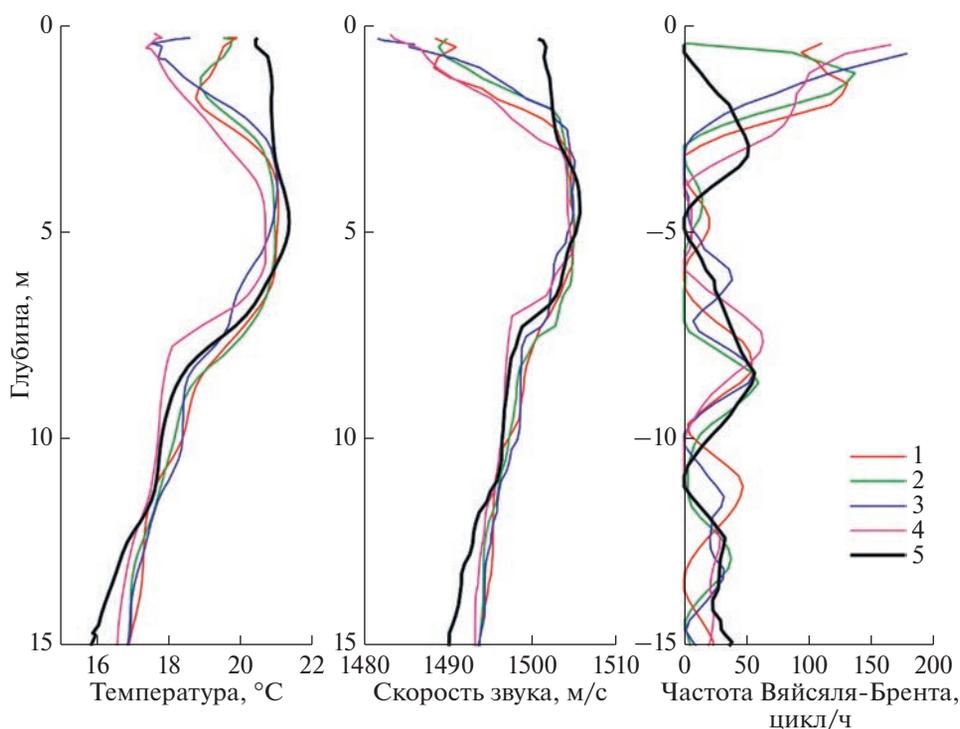


Рис. 5. Профили температуры, скорости звука и частоты Вьяйсяля-Брента (1–4) для разреза напротив устья левого рукава Кодора. Профиль 5, крайний западный из всей серии, принят за фоновый.

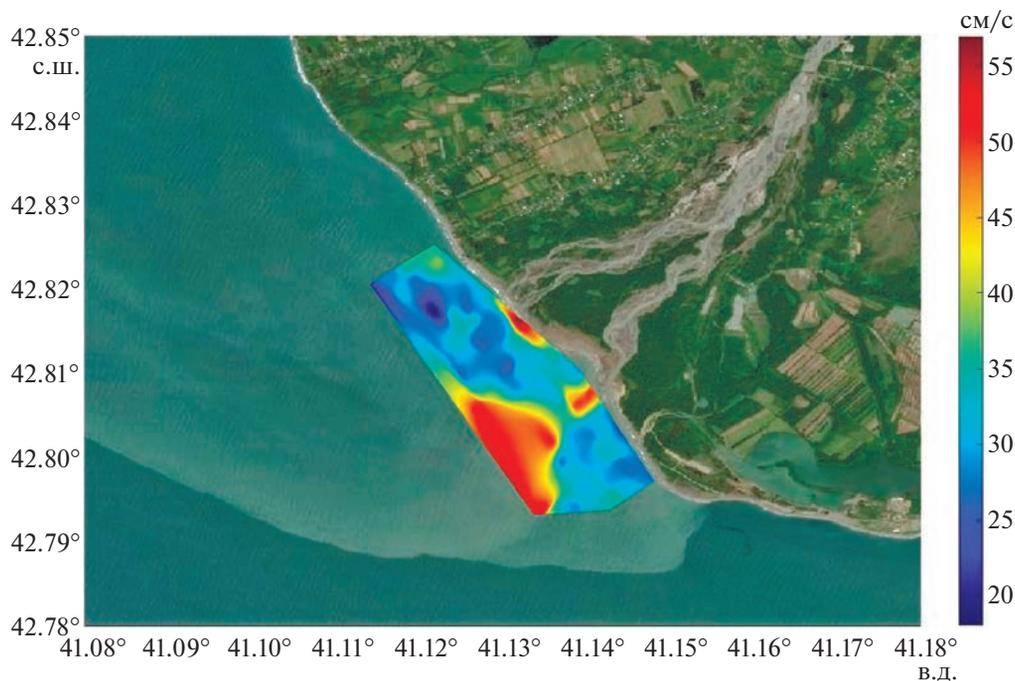
помимо понижения температуры, здесь оказывает влияние и уменьшение солёности верхнего слоя моря, что проявляется в перепаде скорости звука до 25 м/с в 4–5-метровом слое.

Перейдем к результатам съемки с ADCP. На рис. 6 приведено распределение скорости приповерхностного течения в исследуемой акватории. В прибрежной зоне обращает на себя внимание сильное приповерхностное течение напротив обоих рукавов Кодора, обусловленное впадающими в море речными водами. Скорости этих течений превышают 0.5 м/с. Причем течение больше выражено у левого рукава реки, оно распространяется на 500 м от берега. У правого рукава течение имеет заметную силу на расстоянии 100–200 м от берега.

Представляет интерес распределение течений на фоне поверхностной температуры акватории. ADCP имеет встроенный датчик температуры, что позволяет одновременно с данными течения регистрировать температуру поверхностного слоя моря (0.5 м). На рис. 7 представлена пространственная изменчивость течений (показана стрелками) вместе с распределением поверхностной температуры в исследуемой акватории. Фоновое течение на шельфе к северо-западу от устья Кодора было юго-восточным, при этом в приповерхностном слое скорость течения составляла 0.1–0.15 м/с. Напротив правого рукава Кодора отме-

чено появление составляющей течения от берега. Дальше в прибрежной зоне в сторону левого рукава образуется область завихренного течения. Напротив левого рукава появляется область относительно холодной воды (16°–18°C), обозначая распространение от берега струи речных вод, и одновременно в этом же районе происходит столкновение течений (струи речных вод с подтоком с юго-востока интенсивным северо-западным течением, достигающим 0.5–0.6 м/с). Это место выделяется на поверхности моря хорошо выраженным сулом (см. рис. 8). Струйное течение уходило на расстояние до 1 км в море. Недавно натурными наблюдениями было установлено, что столкновение течений может быть источником генерации ВВ [11]. Здесь, возможно, имеет место этот эффект, но мощный вынос опресненных вод в то же время подавляет его, что позволяет видеть генерацию ВВ впадающим в море речным потоком, доказательства чего будут приведены ниже.

Область столкновения течений, как уже было сказано, характеризуется сулом – развитым поверхностным хаотичным волнением. Сулой представляет опасность для маломерных судов, поскольку волны от него достигают в высоту 1 м, что мешает его пересекать, поскольку отдельные волны захлестывают катер через борт. Для сулая характерен так называемый “загадочный акустический эффект” [7], связанный с генерацией в



**Рис. 6.** Модуль скорости приповерхностного течения (горизонт 1.4 м) 20 июня на спутниковом снимке Sentinel-2 L2A от 21 июня 2021 г. Обращаем внимание, что в прибрежной зоне обе области максимальных течений расположены напротив левого и правого рукавов Кодора.

морской среде акустических шумов. Известны результаты исследования подводных шумов, сгенерированных сулоями от больших ВВ в Индийском океане [17]. Но в данном эксперименте мы не вели регистрацию подводного шума, хотя это может быть одной из задач последующих экспедиций.

#### 4. РЕГИСТРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ADCP НА РАЗРЕЗАХ НАПРОТИВ РУКАВОВ КОДОРА

На двух разрезах, сделанных с помощью ADCP напротив левого и правого рукавов Кодора, были зарегистрированы ВВ, чье происхождение связано с выносом в море пресных речных вод. Наибольшие ВВ были зарегистрированы на разрезе напротив левого рукава реки Кодор. Как уже упоминалось выше, в 2021 г. левый рукав Кодора характеризовался более мощным потоком, чем правый.

Рассмотрим сначала запись волн, зарегистрированных у левого рукава реки. За счет струи речных вод характер течения прибрежной акватории значительно отличается от соседних участков шельфа. Так, на расстоянии от 180 до 400 м от берега распространяется приповерхностное течение, направленное на юг, т.е. от берега. Это течение проникает до глубин 2–4.5 м, где скорость течения – 0.25–0.35 м/с. До этих же глубин

распространяется вода пониженной солености (от 6 до 16 епс) (мы делали оценки солености по измеренным данным температуры и скорости звука) и температуры (от 18° до 21°С). Глубже течение становится более интенсивным (до 0.5–1 м/с) и подворачивает на запад, что соответствует сильной струе вдольберегового северо-западного течения (см. рис. 9).

Вышеуказанные особенности течений сформировали картину распространения взвешенного вещества на исследуемой акватории. На рис. 10 приведена картина пространственного распределения коэффициента обратного рассеяния на акватории во время измерений 20 июня. Это, по сути, картина пространственного распределения взвешенного вещества. Коэффициент рассеяния достигает максимума 90–98 дБ в месте напротив впадения в море левого рукава Кодора. Во время съемки это было основным руслом реки. Область со значениями коэффициента рассеяния больше 80 дБ распространяется от береговой черты примерно на 1 и на 2 км вдоль берега на юго-восток.

Рассмотрим, как взвешенное вещество в плюме распределено по вертикали. На рис. 11 показана картина обратного акустического рассеяния на разрезе, нормальном к берегу напротив левого рукава Кодора. Хорошо видна граница речных вод на глубине около 5 м. На этом горизонте сформирован резкий пикноклин, что подтверждено гидрологической съемкой. Обращает на себя внима-

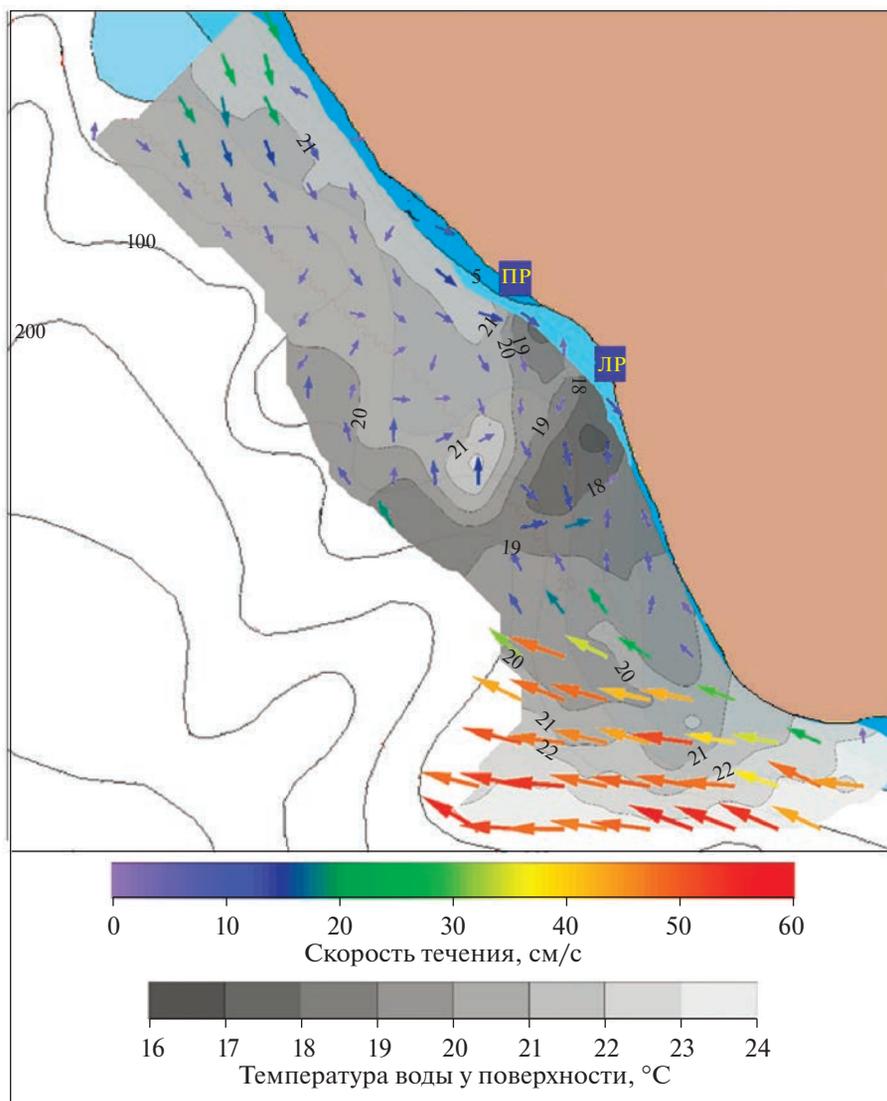


Рис. 7. Поверхностное течение и поверхностная температура на исследуемой акватории по данным съемки ADCP 20 июня.

ние, что по пикноклину движутся интенсивные ВВ. Можно выделить пакет из трех волн, распространяющихся от берега. По форме волны относятся к волнам углубления, для них характерны обостренные подошвы и сглаженные гребни. Их длины – около 200 м. Выделяется уединенная ВВ высотой 4–6 м над глубинами более 50 м. Для нее характерны большие орбитальные скорости, причем вертикальная компонента на переднем склоне волны достигает 0.2 м/с и регистрируется от приповерхностных слоев до глубин более 40 м. Генерация этой волны, по-видимому, обусловлена сдвиговой неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца из-за большой скорости впадающего в море речного потока. Ситуация напоминает механизм генерации ВВ поверхностной интрузией опресненных вод, наблюдавшийся в [3].

Проверим утверждение о генерации внутренних волн из-за механизма Кельвина-Гельмгольца. Широко известен критерий образования волн на стратифицированном сдвиговом течении, который гласит, что волны образуются, если число Ричардсона становится меньше 1/4. Для оценки числа Ричардсона используем наши данные о вертикальном градиенте плотности  $\rho$  и градиенте сдвига скорости течений  $U$  между горизонтами  $z$  в море 2 и 4 м. В формулу числа Ричардсона  $R_i = -(g/\rho)(d\rho/dz)/(dU/dz)^2$  подставляем измеренные нами данные (представлены в последующей части статьи на рис. 15). Плотность  $\rho = 1010.3 \text{ кг/м}^3$ ,  $(d\rho/dz) = 0.15 \text{ кг/м}^4$ ,  $(dU/dz)^2 = 0.0225 \text{ с}^{-2}$ . В результате получаем величину  $R_i = 0.065$ , что меньше 0.25.



Рис. 8. Фото сулоя в месте столкновения течений 20 июня.

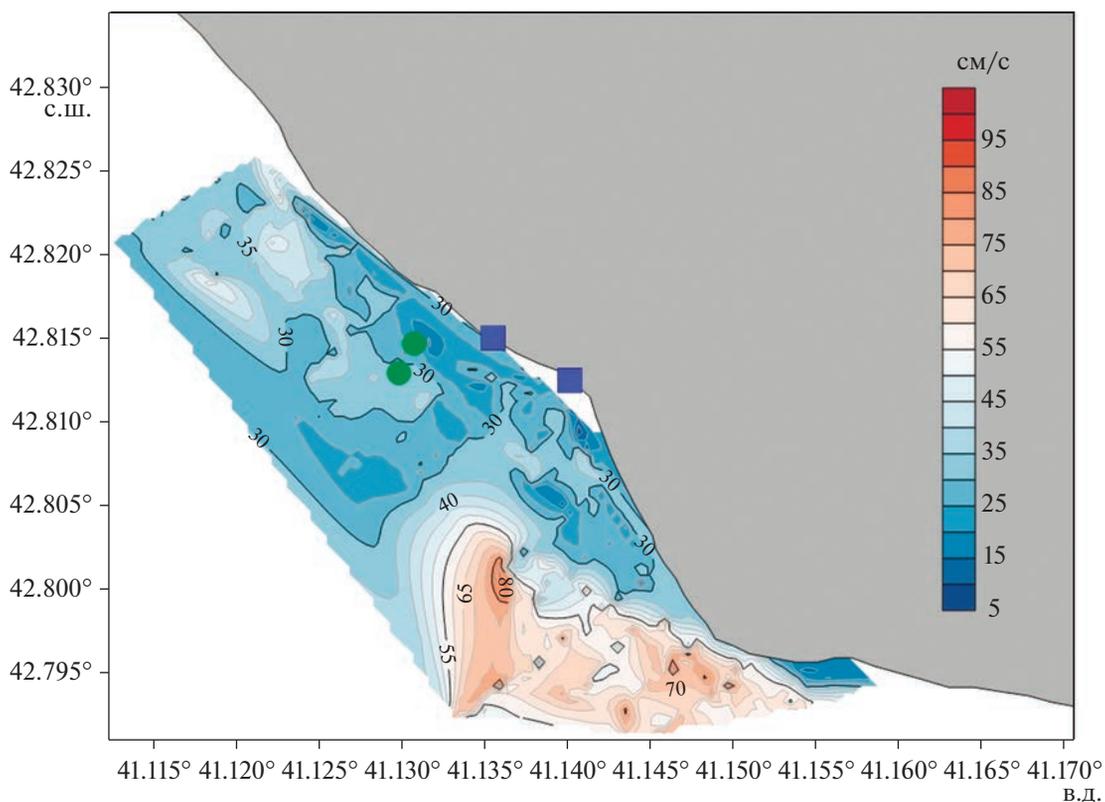
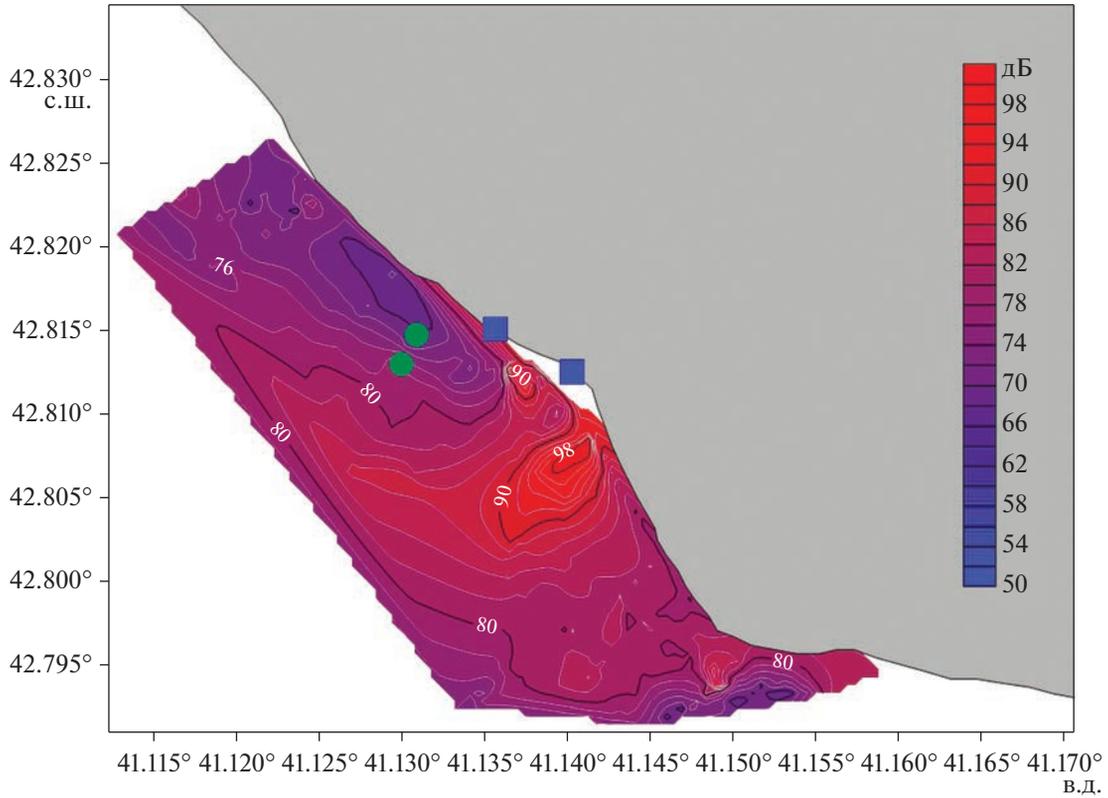


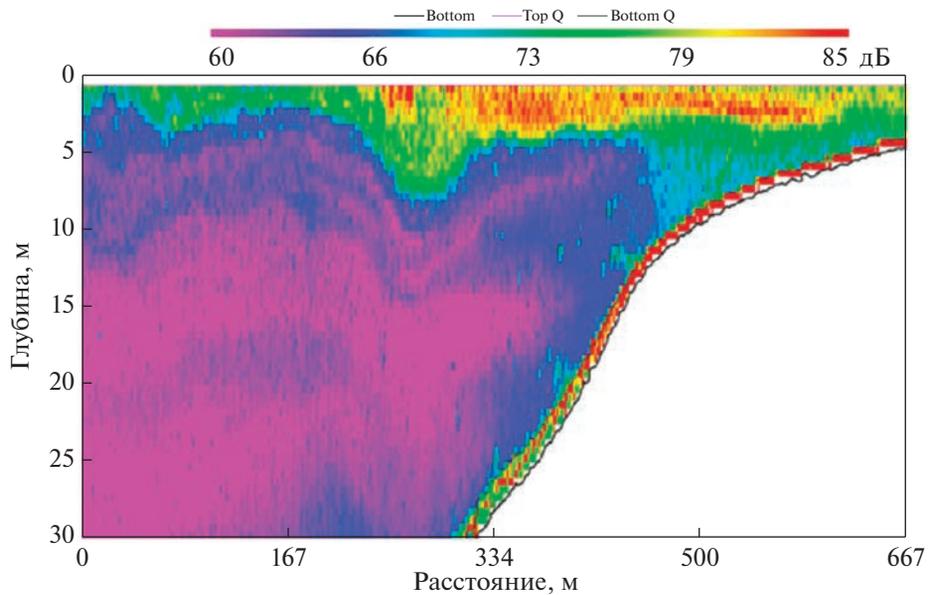
Рис. 9. Модуль скорости течения (горизонт 5.4 м) на съемке 20 июня. Зеленые кружки – положение заякоренных станций. Синими квадратами схематично отмечены места впадения рукавов реки в море.

Теперь рассмотрим сечение, полученное напротив правого рукава реки Кодор. На рис. 12 приведена запись обратного акустического рассеяния (а), а также меридиональной составляющей течения (б) на разрезе длиной более 700 м в на-

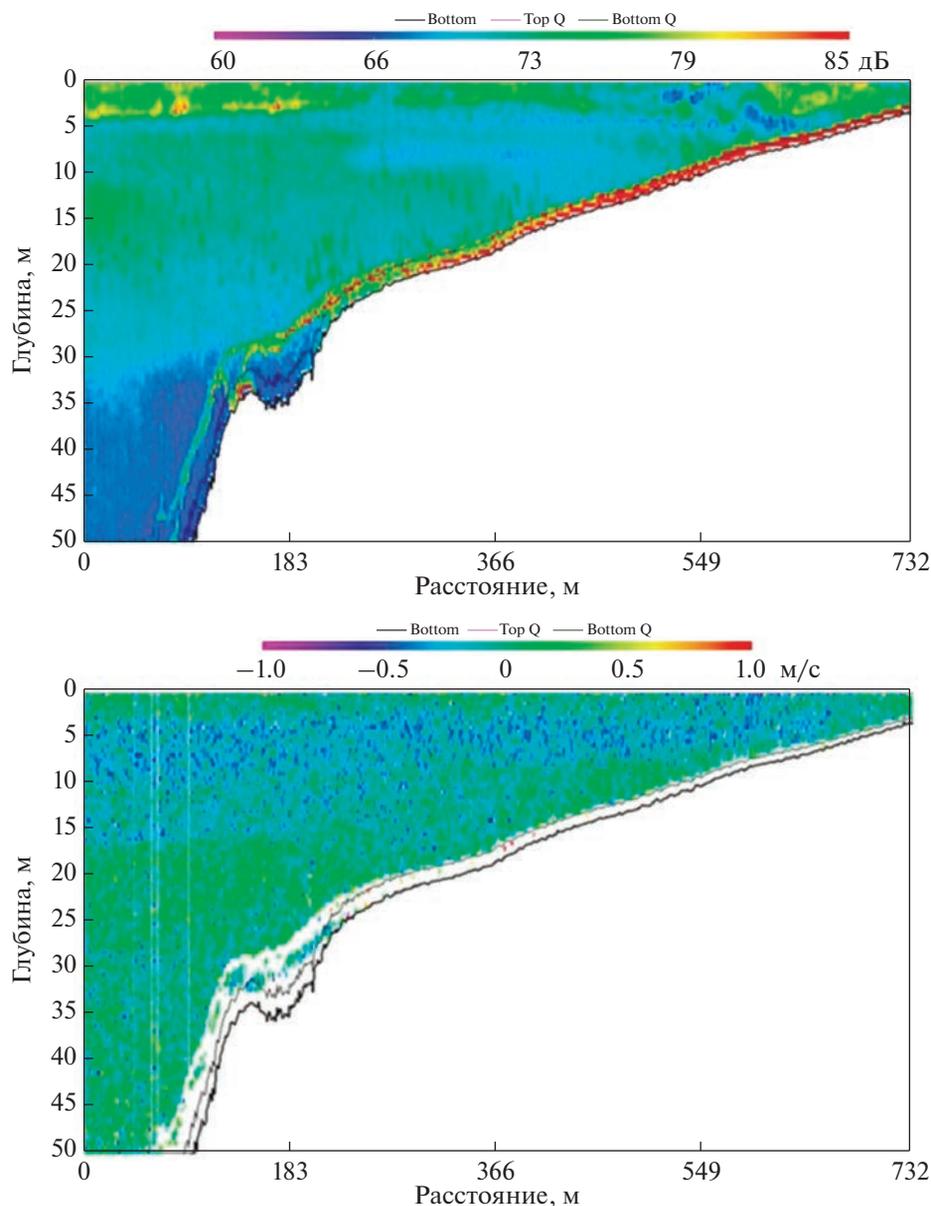
правлении по нормали к берегу от точки с изобатой 100 м до прибрежной мелководной зоны. На записи эхолотических контрастов на всем протяжении разреза просматривается область повышенного рассеяния в приповерхностном слое



**Рис. 10.** Распределение коэффициента обратного акустического рассеяния по акватории прибрежной зоны устья Кодора. Зеленые кружки – положение заякоренных станций. Синими квадратами схематично отмечены места впадения рукавов реки в море.



**Рис. 11.** Запись ВВ на крайнем южном разрезе (сигнал обратного акустического рассеяния). Параметры волн: высота – 3–6 м; длина – 200 м; орбитальная скорость (вертикальная составляющая) – 0.2 м/с.

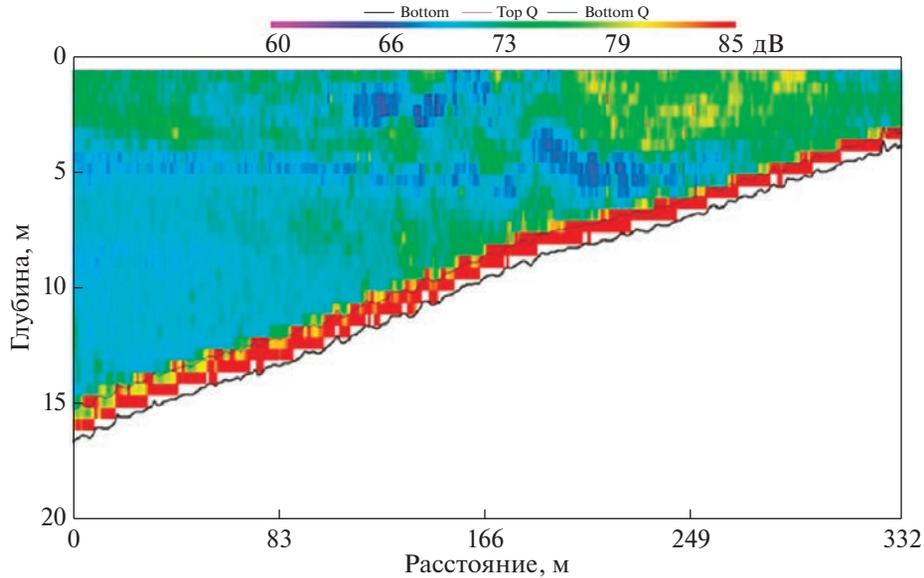


**Рис. 12.** Запись данных ADCP на разрезе напротив правого рукава реки Кодор: сигнал обратного акустического рассеяния (вверху) и меридиональная составляющая течений (внизу), на которой хорошо видно устойчивое течение от берега в верхнем слое моря.

до глубин 5 м (выделяется желтым цветом). Это область распространения в море опресненной воды. Меридиональная составляющая течений в приповерхностном слое моря до глубин около 10 м выявляет южный перенос вод, т.е. перенос вод от берега, вызванный речным стоком со скоростью до 0.5 м/с. На расстоянии около 500 м от берега поток опресненной воды расширяется, проникая вглубь до 20 м. На расстоянии около 200 м от берега в приповерхностном слое видна уединенная ВВ в виде гидравлического прыжка (рис. 13). Глубина точки, где была встречена волна, — 8 м,

а приповерхностный термоклин, образованный речной водой, находился на глубине около 5 м, т.е. располагался ближе ко дну, чем к поверхности моря. Вследствие этого ВВ имела форму волны поднятия. Она распространяется так же, как поток речных вод, — от берега.

Можно заметить интересную особенность: над задним склоном волны находится область более высокого обратного акустического рассеяния, чем над передним склоном. Объяснение этого эффекта, по-видимому, связано с тем, что скорость волны меньше, чем скорость генерирующе-



**Рис. 13.** Внутренняя волна (гидравлический прыжок), сгенерированная струей втекающих в море речных вод (фрагмент записи сигнала обратного рассеяния рис. 12 от 20 июня).

го ее потока, и волна, хоть и движется в том же направлении, что и поток, но замедляет его, что приводит к увеличению в приповерхностном слое за волной концентрации рассеивающих частиц взвешенного вещества, выносимого рекой. Зарегистрированные параметры ВВ – следующие: высота – 3 м, длина (правильнее говорить – горизонтальный размер, потому что волна уединенная) – 35 м, орбитальная скорость (вертикальная компонента) – 0.2 м/с.

Помимо измерений ВВ на разрезах с ADCP, 20 июня велась регистрация ВВ с помощью гирлянды датчиков температуры, установленной в прибрежной зоне моря недалеко от места впадения правого рукава реки Кодор (заякоренная станция 1 на рис. 1, 2). Измерения заякоренной гирляндой термисторов позволяют оценить высоты, а также периоды ВВ. На рис. 14 приведен фрагмент записи гирлянды термодатчиков с 10:00 до 11:30 20 июня. Около 10:30 произошел подход цуга короткопериодных ВВ высотой от 1 до 3 м. Цуг наблюдался в течение около 35 мин. Всего в нем было 10–11 волн с периодом 3.2–3.6 мин. Это очень короткие периоды даже для короткопериодных волн, обычно наблюдаемых в Черном море. Зарегистрированные трехминутные периоды волн указывают на то, что ВВ распространяются на сдвиговом течении. Это и приводит к тому, что мы заякоренной термогирляндой, стоящей на пути потока речных вод, регистрируем не реальные периоды волн, а “кажущиеся”. В отсутствие течения периоды ВВ были бы существенно длиннее. В следующем разделе мы покажем, насколько записанные периоды короткопериодных ВВ отличаются от реальных.

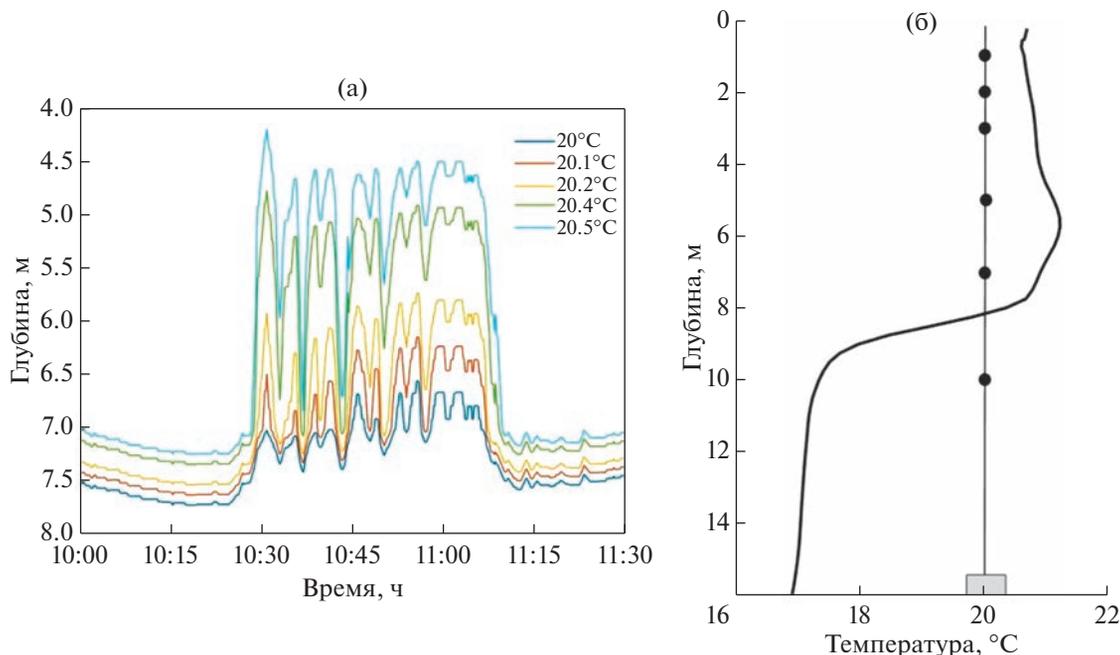
### 5. РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ И СОБСТВЕННЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ НАБЛЮДАВШИХСЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Для того чтобы понять, какие внутренние волны могут быть при таком достаточно сильном сдвиговом течении, был проведен расчет дисперсионных кривых и собственных функций внутренних волн для простой модели горизонтально однородной среды в приближении Буссинеска и без учета вращения Земли. Предполагалось также, что вектор сдвигового течения зависит только от глубины (ось  $z$ ) и имеет только одну компоненту  $\mathbf{U}_0 = \{U_0(z), 0, 0\}$  по оси  $x$ , совпадающей по направлению с вектором течения в приповерхностном слое. В этом случае глубинный профиль  $\Phi_m(z)$  вертикального смещения частиц воды  $\zeta_m(\mathbf{r}, z, t) = A_m \Phi_m(z) \exp[i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)]$   $m$ -й моды внутренней волны является собственным решением следующей краевой задачи (см. также [2, 5]):

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} - 2k_x \frac{U_0'}{\omega_d} \frac{d\Phi}{dz} + k^2 \frac{N^2 - \omega_d^2}{\omega_d^2} \Phi = 0,$$

$$\left. \frac{d\Phi}{dz} \right|_0 = \left. \frac{gk^2}{\omega_d^2} \right|_0 \Phi(0), \quad \Phi(-H) = 0.$$

Здесь предполагается, что координата  $z$  направлена вертикально вверх,  $z = 0$  – свободная поверхность жидкости,  $z = -H$  – граница с абсолютно жестким дном, горизонтальные координаты  $\{x, y\} = \mathbf{r}$ ,  $t$  – время;  $\mathbf{k} = \{k_x, k_y\}$  и  $\omega$  – горизонтальный волновой вектор и частота волны соответственно,  $\omega_d(z) = \omega - k_x U_0(z)$  – доплеровская



**Рис. 14.** Измерение внутренних волн на заякоренной станции: (а) смещение изотерм, вызванных цугом ВВ, зарегистрированным термогирляндой из 6 датчиков температуры в прибрежной зоне у устья Кодора 20 июня; (б) вертикальный профиль температуры, измеренный рядом с термогирляндой. Глубина места – 16–17 м. Расстояние до берега – почти 300 м.

частота;  $U_0' = dU_0/dz$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $N(z)$  – вертикальный профиль частоты Вайсяля-Брента. Численное решение этой краевой задачи будем искать по программе [28] для слоисто-однородной модели среды в виде  $J$  горизонтальных слоев с постоянными значениями скорости  $U_0j$  и частоты Вайсяля-Брента  $N_j$  (см. рис. 15). Равновесная плотность жидкости  $\rho_0$  при этом остается непрерывной на границах слоев  $z_j$  так же, как давление  $p_m = \rho_0 (\omega_d/k)^2 d\zeta_m/dz$  и вертикальное смещение частиц  $\zeta_m$ .

Гидрологические условия (горизонтально однородная среда) для нашего упрощенного расчета выбирались близкими к месту, где наблюдались внутренние волны у левого рукава реки и где был отмечен более интенсивный поток опресненных вод. На рис. 15 показано вертикальное распределение условной плотности, частоты плавучести (Вайсяля-Брента) и распределение сдвигового течения по глубине. Точками на рисунках показаны значения плотности и течения, полученные усреднением измеренных в эксперименте данных (см., например, рис. 5). По этим данным, предполагая их линейную зависимость от глубины в слоисто-однородной модели для частоты Вайсяля-Брента и течения, также показанная на рис. 15 сплошными линиями. Расчеты были проведены для условий, близких к эксперименту у левого ру-

кава реки, когда направление движения внутренних волн (волновой вектор  $\mathbf{k} = \{k_x, 0\}$ ) совпадает с направлением вектора течения  $\mathbf{U}_0$  в приповерхностном слое, т.е. от берега.

На рис. 16 представлены дисперсионные кривые для первых трех мод волн, движущихся: (а) на течении и (б) – когда течение совсем отсутствует ( $\mathbf{U}_0 = 0$ ).

Отметим, что рис. 16б полностью совпадает со случаем движения мод поперек течения ( $k = \{0, ky\}$ ), как и аналогичные рисунки ниже для фазовых скоростей мод (рис. 17б) и их профилей (рис. 18в). Изменения групповых скоростей мод от волнового числа (рис. 17г) при этом различны.

Поскольку в наших наблюдениях мы видели только внутренние волны первой моды, заострим наше внимание именно на данных, относящихся к первой моде. Длина зарегистрированных волн была 200 м, что соответствует волновому числу 5 цикл/км. Такая волна первой моды в отсутствие течения имеет частоту 6.5 цикл/ч, что равно периоду 9.2 мин. Для нашей волны, чье направление совпадает с направлением течения, частота составляет 18 цикл/ч, что соответствует периоду 3.3 мин. Таким образом, внутренние волны на попутном сдвиговом течении оказываются очень высокочастотными по сравнению со своими аналогами, распространяющимися в воде без течения.

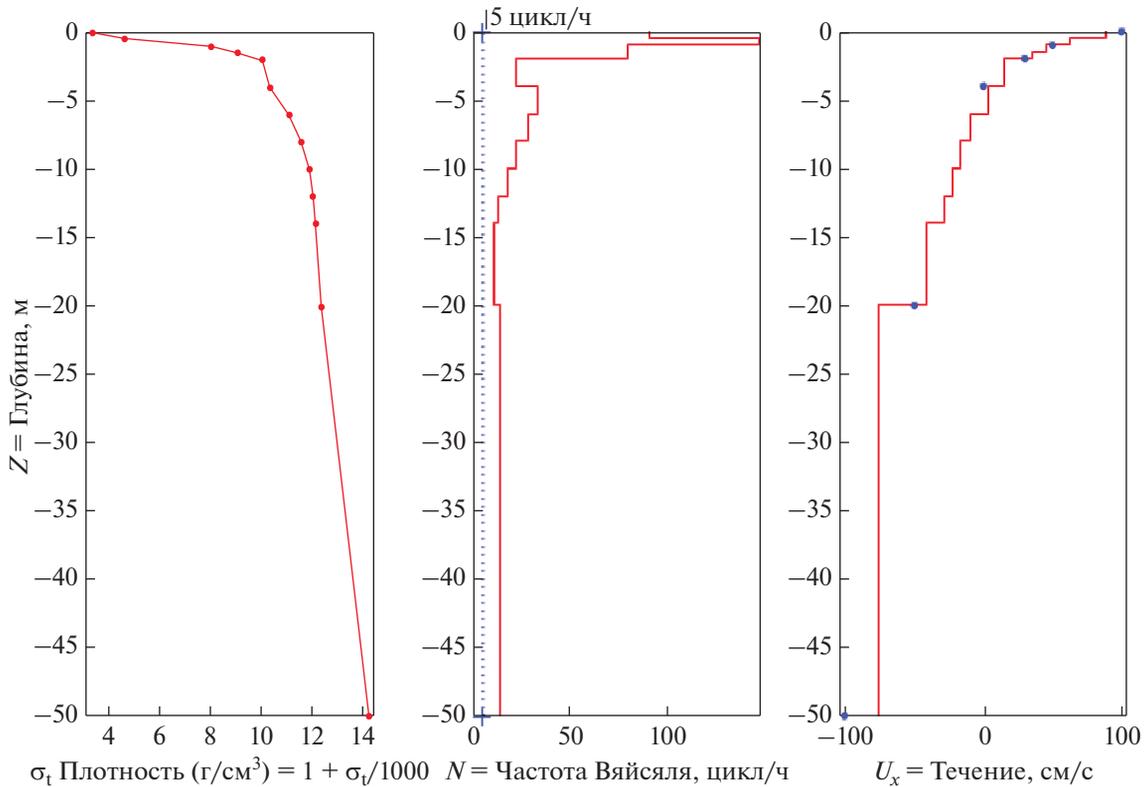


Рис. 15. Вертикальные профили условной плотности, частоты плавучести и сдвигового течения.

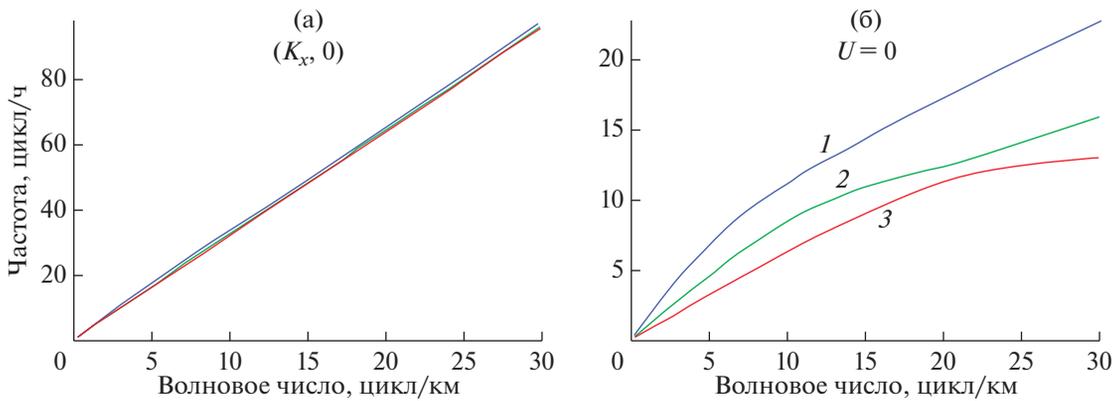


Рис. 16. Дисперсионные кривые первых 3-х мод внутренних волн, распространяющихся по течению в приповерхностном слое (а) и при его отсутствии (б).

Проведем аналогичное сопоставление и для других параметров внутренних волн — для фазовых и групповых скоростей. На рис. 17 представлены фазовые и групповые скорости волн, рассчитанные для наших условий с попутным сдвиговым течением (слева) и без него (справа). Отметим, что в этих случаях перпендикулярная волновому вектору (и течению) компонента групповой скорости равна нулю. Волна длиной 200 м имеет фазовую скорость 97.5 см/с, а групповую — 93 см/с. Те же характеристики для случая без течения составляют 38 см/с и 30 см/с соответствен-

но. Таким образом, проведенное численное моделирование демонстрирует, что наблюдавшийся попутный поток течения существенно увеличивает как фазовые, так и групповые скорости внутренних волн.

Наконец, рассмотрим, как влияет попутное течение на профили вертикального смещения в модах. На рис. 18 представлены профили  $\Phi_m(z)$  вертикального смещения трех первых мод внутренних волн длиной 200 м ( $\max \Phi_m(z) = 1$ ): (а) при наличии попутного течения, (б) — фрагмент (а) у поверхности и (в) — при отсутствии течения.

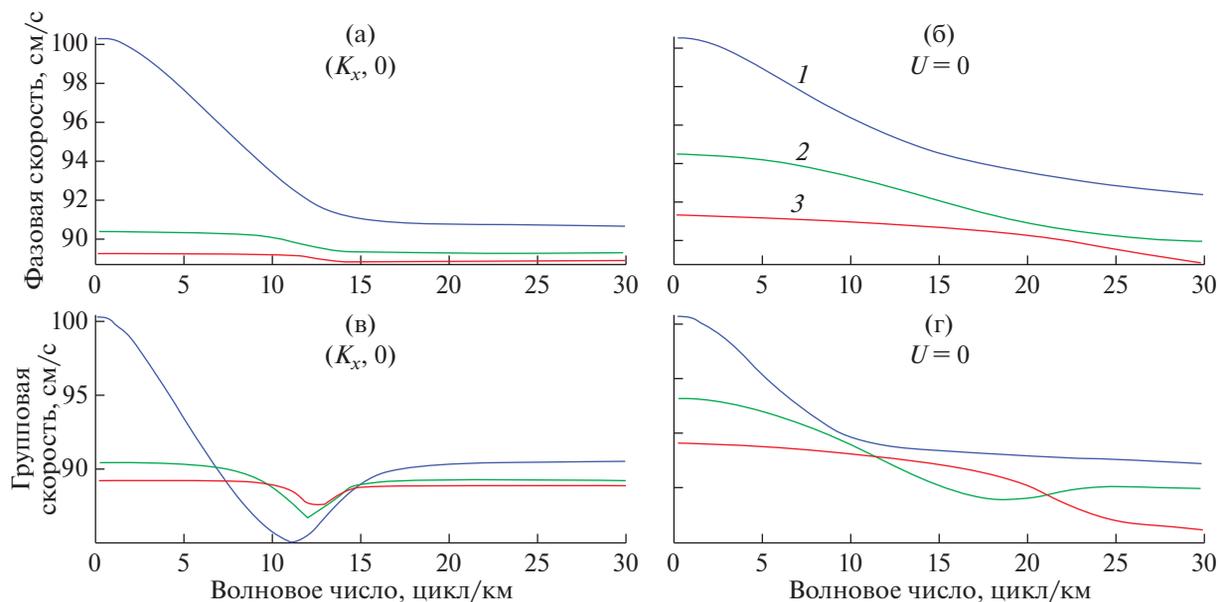


Рис. 17. Фазовые (а, б) и групповые (в, г) скорости первых 3-х мод: со сдвиговым течением (а, в) и при отсутствии течения (б, г).

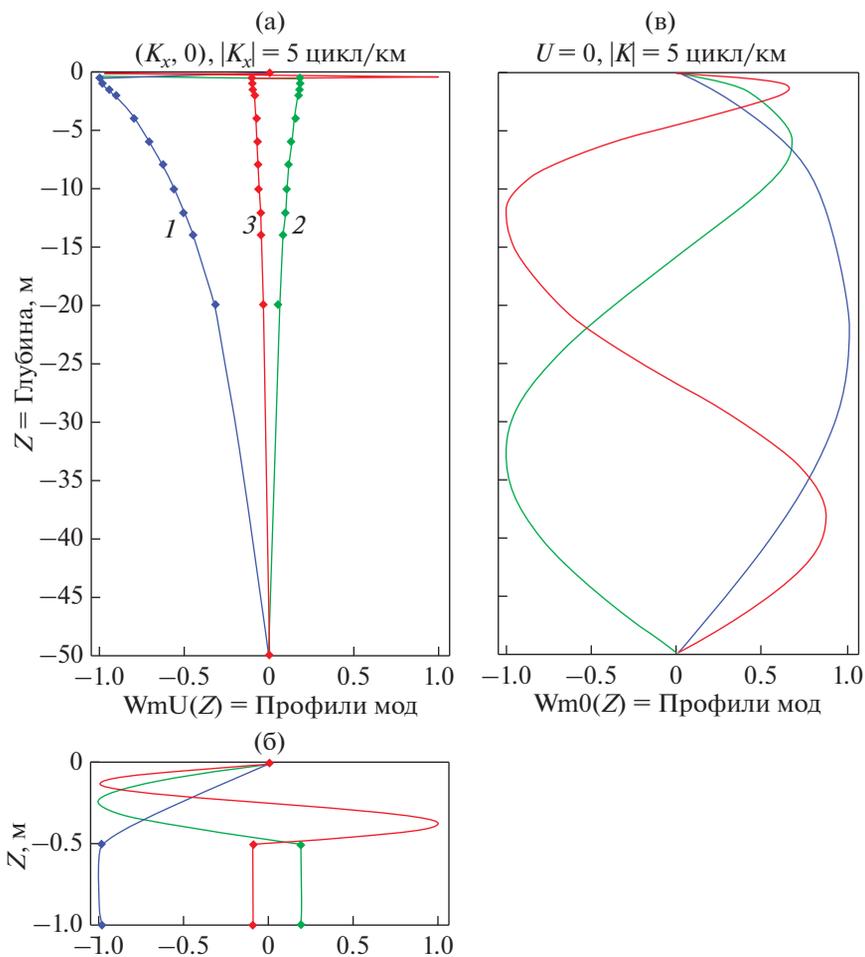


Рис. 18. Профили вертикального смещения частиц воды в модах 1–3: (а–б) с попутным течением, (в) без течения.

Вертикальное волновое число зависит от глубины  $k_z(z)$  и велико там, где велики значения как частоты Вьяйсяля-Брента  $N(z)$ , так и совпадающей с направлением волны компонентой скорости течения  $U(z)k_x/k$ . В данном случае — это приповерхностные слои воды. Имевшее место попутное сдвиговое течение, как видно из сопоставления на рис. 18, значительно изменяет собственную функцию внутренней волны первой моды, смещая максимум с горизонта 25 м в приповерхностный горизонт — 2 м, где распространяется речная вода.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Река Кодор впадает в море двумя рукавами, которые играют определяющую роль в формировании гидрологических условий и поля течений в прибрежной зоне. Струйное течение, образованное впадающими речными водами, распространяется в море на расстояние до 1 км, причем в прибрежной зоне напротив рукавов в приповерхностном слое достигает скоростей 0.5 м/с и более. Течение, вызванное выносом речных вод, на удалении от берега сталкивается с сильным северо-западным течением, в результате чего образуется область сулоя с обрушивающимися гребнями поверхностных волн. Сулой — характерная особенность динамики вод плюма опресненных вод в прибрежной зоне. Наблюдения с помощью ADCP на разрезах напротив рукавов реки Кодор выявили, что поток речной воды генерирует в приповерхностном слое моря достаточно интенсивные внутренние волны первой моды (высотой до 3–6 м), чье происхождение связано с механизмом возникновения сдвиговой неустойчивости по Кельвину-Гельмгольцу. Эти волны распространяются в приповерхностном слое моря и имеют характерные искажения своих профилей в виде сглаженных гребней и обостренных подошв, что свидетельствует о нелинейности волн.

Проведенное численное моделирование (решалась краевая задача Штурма-Лиувилля для внутренних волн при наличии сдвигового течения) показало, что сдвиговое течение, совпадающее по направлению с распространением внутренних волн, значительно влияет на их параметры, существенно увеличивая их фазовые и групповые скорости, а также деформируя собственные функции волны, смещая их максимум к поверхности. При всем этом периоды внутренних волн, зарегистрированных на заякоренных станциях, как на рис. 14, характеризуются величинами в единицы минут, что существенно меньше периодов черноморских внутренних волн короткопериодного диапазона. Отметим также, что описываемые ВВ зарегистрированы в границах плюма реки Кодор. Но сам плюм реки может излучать внутренние волны, это происходит на резкой границе опрес-

ненных вод с морской водой при движении границы плюма. Такие случаи были описаны неоднократно (см. [38]) при использовании спутниковых снимков высокого разрешения прибрежной акватории у устья Кодора. В работе [8], посвященной исследованию гидрофизической структуры и динамики течения плюма Кодора, где акцент делался на использовании снимков акватории прибрежной зоны с квадрокоптера, также был выявлен аналогичный случай генерации цуга короткопериодных внутренних волн движущейся границей плюма.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки РФ № FMWE-2021-0010, а также при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00715, обработка и анализ данных выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-00055.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Гончаров В.В., Лейкин И.А. Волны на течении со сдвигом скорости // Океанология. 1983. Т. 23. № 2. С. 210–216.
3. 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.
4. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А., Петников В.Г. и др. Акустические эффекты, обусловленные интенсивными внутренними волнами на шельфе // Акустический журнал. 2001. Т. 47. № 4. С. 494–500.
5. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. 304 с.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 155–164.
7. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
8. Осадчиев А.А., Барымова А.А., Седаков Р.О. и др. Гидрофизическая структура и динамика течения плюма р. Кодор // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 5–20.
9. Полухин А.А., Заговенкова А.Д., Хлебонашев П.В. и др. Гидрохимический состав стока рек Абхазии и особенности его трансформации в прибрежной зоне // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–31.
10. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. “Горячие точки” в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 3. С. 410–436.

11. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 6. С. 805–810.
12. Серебряный А.Н. Наблюдение на шельфе Черного моря внутренних волн больших амплитуд, сгенерированных антициклоническим вихрем // Сборник тезисов Восьмой всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 205–206.  
<https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1652881>
13. Серебряный А.Н. Яхтенная океанология: 15-летний опыт исследований на шельфе // Материалы XVII международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021)”. Том 1. М.: ИО РАН, 2021. С. 135–138.
14. Серебряный А.Н. Столкновение течений – новый механизм генерации внутренних волн в море // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 265–269.
15. Серебряный А.Н., Кенигсбергер Г.В., Елистратов В.П. и др. Акустическая диагностика гидрофизической изменчивости на абхазском шельфе Черного моря // Ученые записки физического факультета МГУ. 2017. Т. 5. С. 1750130.
16. 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.
17. Серебряный А.Н., Фурдуев А.В., Аредов А.А., Охрименко Н.Н. Генерация подводного шума сулоем внутренней волны большой амплитуды в океане // *Акустический журнал*. 2022. Т. 68. № 3. С. 312–322.
18. Серебряный А.Н., Химченко Е.Е., Замшин В.В. Генерация внутренних волн субмезомасштабным вихрем у мыса Святой Нос в Баренцевом море // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 115–121.
19. Химченко Е.Е., Серебряный А.Н. Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // *Океанологические исследования*. 2018. № 2. С. 69–87.
20. Apel J.R., Holbrook J.R., Tsai J., Liu A.K. The Sulu Sea internal soliton experiment // *J. Phys. Oceanogr.* 1985. V. 15. № 12. P. 1625–1651.
21. Colosi J.A., Duda T.F., Lin Y.T. et al. Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006 // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. V. 131. № 2. P. 1733–1748.
22. Guo C., Chen X. A review of internal solitary wave dynamics in the northern South China Sea // *Progress in Oceanography*. 2014. V. 121. P. 7–23.
23. Holloway P.E. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92 (C5). P. 5405–5416.
24. Huang X., Chen Z., Zhao W. et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea // *Scientific reports*. 2016. V. 6. P. 30041.
25. Jackson C.R., Apel J. An atlas of internal solitary-like waves and their properties // *Contract*. 2004. [Электронный ресурс] URL: [http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html)
26. Johannessen O.M., Sandven S., Chunchuzov I.P., Shuchman R.A. Observations of internal waves generated by an anticyclonic eddy: a case study in the ice edge region of the Greenland Sea // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. V. 71. № 1. P. 1652881.
27. Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N. Large-amplitude internal waves near Mascarene Ridge in the Indian Ocean // *Deep-Sea Research I*. 1995. V. 42. № 11/12. P. 2075–2091.
28. Koohestani K., Stepanyants Y., Allahdadi M.N. Analysis of internal solitary waves in the Gulf of Oman and sources responsible for their generation // *Water*. 2023. V. 15. P. 746.  
<https://doi.org/10.3390/w15040746>
29. Lynch J.F., Lin Y.T., Duda T.F., Newhall A.E. Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2010. V. 35. № 1. P. 12–27.
30. Mikryukov A., Popov O., Serebryany A. Acoustical observation of internal waves on the shelf of the Black Sea // *Hydroacoustics. Annual Journal*. 2009. № 12. P. 153–158.
31. Morozov E.G. Semidiurnal internal wave global field // *Deep Sea Research I*. 1995. V. 42. № 1. P. 135–148.
32. Nash J., Moum J. River plums as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // *Nature*. 2005. V. 437. № 7057. P. 400–403.
33. Osborne A.R., Burch T.L. Internal solitons in the Andaman Sea // *Science*. 1980. V. 208. № 4443. P. 451–460.
34. Pinkel R., Merrifield M., McPhaden M. et al. Solitary waves in the western Equatorial Pacific Ocean // *Geophys. Res. Letters*. 1997. V. 24. № 13. P. 1603–1606.
35. Ramp S.R., Tang T. Y., Duda T.F. et al. Internal solitons in the northeastern South China Sea. Part I: Sources and deep water propagation // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004. V. 29. № 4. P. 1157–1181.
36. Serebryanyy A. Processes responsible for the generation of internal solitons on a shelf: experimental evidences // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2022. P. EGU22-6963.
37. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O. et al. Internal waves study on a narrow steep shelf of the Black Sea using the spatial antenna of line temperature sensors // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. V. 8. P. 833.  
<https://doi.org/10.3390/jmse8110833>
38. Serebryany A., Khimchenko E., Zamshin V., Popov O. Features of the field of internal waves on the Abkhazian shelf of the Black Sea according to remote sensing data and in-situ measurements // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. № 10. P. 1342.  
<https://doi.org/10.3390/jmse10101342>

## Internal Waves Generated by the Inflow of the Kodor River in the Black Sea

A. N. Serebryany<sup>a, b, #</sup>, E. E. Khimchenko<sup>a</sup>, V. V. Goncharov<sup>a</sup>,  
L. L. Tarasov<sup>b</sup>, O. E. Popov<sup>c</sup>, D. V. Belov<sup>a</sup>, I. P. Neshenko<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Andreyev Acoustics Institute, Moscow, Russia*

<sup>c</sup>*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>d</sup>*Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia, Sukhum, Abkhazia*

<sup>#</sup>*e-mail: serebryany53@list.ru*

The results of studies of internal waves in the shelf zone of the Black Sea in the water area near the mouth of the Kodor River, conducted in June 2021, are presented. Spatial surveys were carried out with ADCP “Rio Grande 600 kHz”, which revealed the main characteristics of currents and the presence of internal waves generated by the river inflow in to the sea. Internal waves were recorded in two sections oriented along the normal to the coastline and extending to depths of 100 m. The observed waves had the features of nonlinear waves, were located on the near-surface thermocline, and had a height of up to 3–6 m. Also short-period internal waves in the form of a train of waves with an apparent period of about 3.5 min were recorded by a chain of thermistors in the coastal zone of the sea. The dispersion curves and eigenfunctions of internal waves were calculated by numerically solving the equation of internal waves, taking into account the velocity shift in the sea. Theoretical data are compared with experimental ones. A significant influence of the river inflow on the parameters of the generated internal waves moving with the flow was revealed. The experimentally observed decrease in wave periods and an increase in their group and phase velocities were confirmed.

**Keywords:** internal waves, river waters, suspended matter, acoustic backscattering, ADCP, r. Kodor, shelf, Black Sea