

## ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА НА ГЕЛЕНДЖИКСКОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНЕЕ ВРЕМЯ

Е. Е. Химченко<sup>1</sup>, А. Н. Серебряный<sup>1,2</sup>, О. Е. Попов<sup>3</sup>, В. В. Очередник<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: ekhym@ocean.ru;*

<sup>2</sup> *АО «Акустический институт им. акад. Н. Н. Андреева»,  
Россия, 117292, Москва, Шверника, д. 4;*

<sup>3</sup> *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,  
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3*

В работе представлены результаты натурных наблюдений за внутренними волнами на полигоне «Геленджик» в период 14–23 июня 2023 г. Измерения проводились одновременно на четырех разнесенных в пространстве заякоренных термокосах, установленных на глубине около 23 м. Во время эксперимента велась регистрация течений, а также проводились вертикальные профилирования водной толщи с измерением температуры, электропроводности и растворенного кислорода. На одной из термокос велась регистрация растворенного кислорода на горизонте 18 м. Представлены наиболее интенсивные цуги коротких волн, зарегистрированные после усиления вдольберегового северо-западного течения. Выявлены внутренние волны первой и второй моды. Проведена оценка основных параметров наблюдаемых внутренних волн. Показано, что подходящие в прибрежную зону квазиинерционные внутренние волны содержат более холодную и соленую воду с пониженным содержанием кислорода. В результате их подход приводит к падению уровня насыщения вод кислородом на горизонте на 10 %. Представлен пример влияния короткопериодных внутренних волн на содержание растворенного кислорода.

**Ключевые слова:** Черное море, полигон «Геленджик», внутренние волны, стратификация, измерение температуры, распределение кислорода

### Введение

Внутренние волны играют важную роль в перераспределении энергии по каскаде от крупномасштабных процессов к мелкомасштабным (MacKinnon et al., 2017). Они оказывают влияние на вертикальную стратификацию вод, турбулентное перемешивание (Walter et al., 2012, 2014), перераспределение питательных веществ (Gilly et al., 2013), перенос осадков и перемещение нефелоидного слоя (Bourgault et al., 2014; Jia et al., 2019), а также на перенос растворенного кислорода (Gilly et al., 2013; Walter et al., 2012). Концентрация растворенного кислорода и степень насыщения вод кислородом являются одними из важнейших характеристик состояния морской экосистемы. В условиях прибрежной зоны интенсивные внутренние волны могут резко

изменить абиотические характеристики среды, что может негативно сказаться на экосистеме акватории (Woodson, 2018). Исследования влияния внутренних волн на распределение растворенного кислорода активно ведутся на шельфах Мирового океана (Booth et al., 2012; Smith et al., 2016; Walter et al., 2012; Woodson, 2018), однако для Черного моря практически не проводились. Краткие сведения о единичных наблюдениях изменчивости содержания кислорода при прохождении внутренних волн в акватории Черного моря приведены в работе (Поляков, Стунжас, 1980). Известны гидрохимические работы по изучению изменчивости кислорода в Черном море на акватории Геленджика (Костылева и др., 2022), а также у побережья Крыма (Кондратьев, Видничук, 2018, 2020). В работе (Костылева и др., 2022) приведена информация о сезонной динамике кислорода и кажущегося потребления кислорода в период с апреля по ноябрь 2012 г., показано, что максимум содержания кислорода наблюдается в слое термоклина или под ним. Вертикальное распределение кислорода и положение субкислородной зоны по данным за период 1995–2015 гг. обсуждается в работе (Кондратьев, Видничук, 2018), а для 2016 г. в (Кондратьев, Видничук, 2020). В (Еремеев, Коновалов, 2006) представлено обобщение особенностей вертикального распределения кислорода и определено положение субкислородной зоны по многолетним данным для большей части акватории Черного моря.

Внутренние волны на шельфе Черного моря менее интенсивны, чем в океане (Иванов, Серебряный, 1982), но и здесь они бывают аномально высокими (Бондур и др., 2019). В условиях отсутствия приливов, в Черном море одну из ведущих ролей в суточной динамике его вод играют квазиинерционные внутренние волны. Такие особенности Черного моря создают благоприятные условия для наблюдения за инерционными движениями (Бондур и др., 2017; Khimchenko, Ostrovskii, 2024), а также за различными механизмами генерации короткопериодных внутренних волн, отличных от приливных (Серебряный, Иванов, 2013).

Наблюдения за внутренними волнами в Черном море охватывают период нескольких десятилетий (Иванов, Серебряный, 1982; Блатов, Булгаков и др., 1984; Filonov, 2000; Серебряный, Иванов, 2013; Серебряный, Химченко, 2019; Химченко, Серебряный, 2018; Serebryanu et al., 2022). Помимо контактных измерений большой вклад в изучение черноморских внутренних волн приносят методы дистанционного зондирования (Lavrova et al., 2014; Lavrova, Mityagina, 2017) и в особенности совместные подспутниковые эксперименты (Лаврова et al., 2011, 2013; Серебряный, 2012; Очередник и др., 2020). Для регистрации внутренних волн успешно применяются заякоренные цепочки температурных датчиков (термокос). Наиболее информативной является постановка нескольких разнесенных по пространству заякоренных цепочек. На акватории Черного моря такие работы начали проводиться уже более полувека назад (Иванов и др., 1969) и активно продолжают в настоящее время (Serebryanu et al., 2020, 2022; Очередник и др., 2020; Очередник, Зацепин, 2023).

В этой работе представлен анализ внутренних волн, зарегистрированных по данным четырех заякоренных цепочек, установленных на геленджикском шельфе. Рассматривается влияние внутренних волн на концентрацию растворенного кислорода

на одном из горизонтов. Основная цель исследования – обнаружить цуги внутренних волн, определить их параметры и оценить их влияние на изменчивость содержания растворенного кислорода.

### Данные и методы

Натурный эксперимент был проведен на акватории гидрофизического полигона «Геленджик» (Зацепин и др., 2014) в период с 14 по 23 июня 2023 г. Для измерений температуры были установлены три заякоренные вертикальные гирлянды – Т1, Т2, Т3 (рисунок 1), оснащенные автономными датчиками температуры DST centi-T и Starmon фирмы “Starr-Oddi” (Исландия). Нижним устанавливался датчик DST centi-TD, регистрирующий, помимо температуры, давление. Для измерений также использовалась вертикальная гирлянда точечных датчиков температуры, разнесенных через 1 м, с помощью которой на полигоне практически постоянно ведется регистрация температуры водной толщи (Очередник и др., 2018), данные с которой поступают на берег. Далее эту термокосу будем называть Т4. Глубина моря в районе постановки всех четырех термокос менялась от 22.5 до 23 м. Расстояние между термокосами по измеренным координатам было следующим: Т1–Т2 – 100.3 м, Т1–Т3 – 119.2 м, Т1–Т4 – 103.9 м, Т2–Т3 – 88.1 м, Т2–Т4 – 157.2 м, Т3–Т4 – 102.8 м.

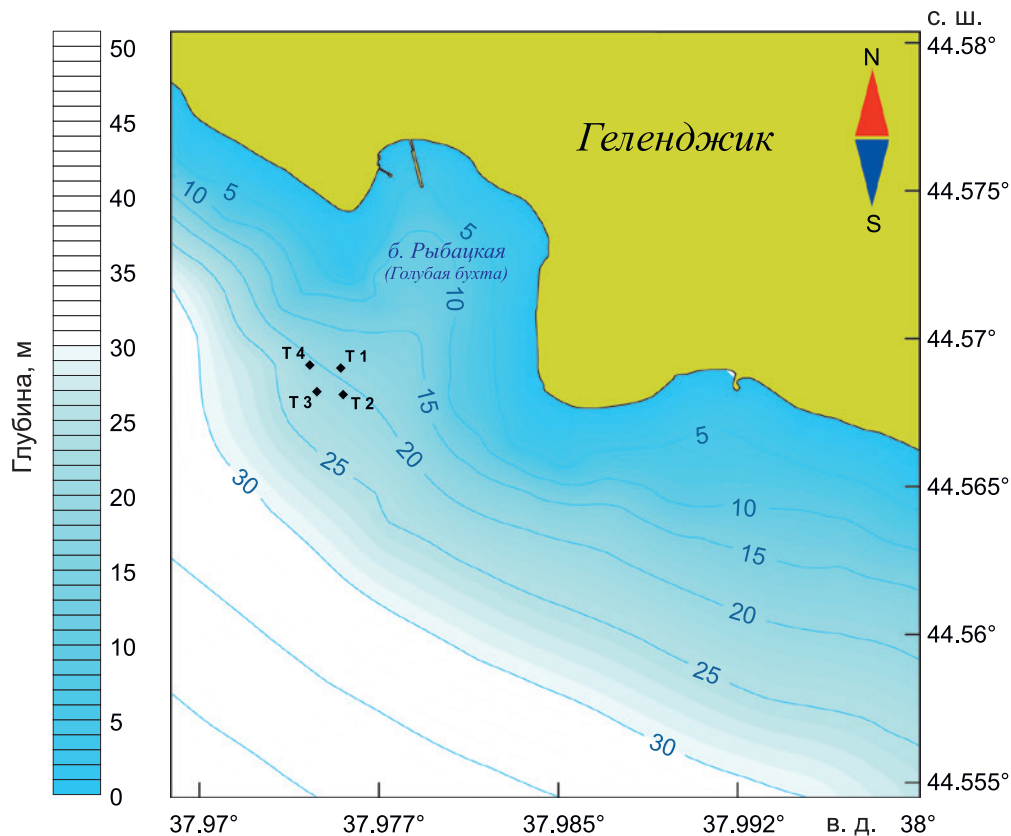


Рис. 1 – Положение заякоренных термокос на карте батиметрии

На каждой термокосте T1, T2 и T3 были установлены 5 датчиков на горизонтах 22, 18, 15, 12 и 10 м. Точность датчиков температуры DST centi –  $\pm 0.1$  °C, Starmon –  $\pm 0.025$  °C, а датчиков на термокосте T4 –  $\pm 0.01$  °C. Период измерений для всех датчиков на каждой термокосте составил 10 с. Дополнительно на T3 на горизонте 18 м был установлен датчик кислорода Anderaa Oxygen Optode 5730 (точность датчика кислорода < 4 мкМ) с датчиком температуры (точность  $\pm 0.03$  °C), а на горизонте 15 м был установлен датчик DST centi-CT, который также регистрировал электропроводность (точность  $\pm 1.5$  мС/см). Для последующего сравнения с профилями кислорода данные датчика кислорода Anderaa были пересчитаны в мг/л.

В период наблюдений проводились вертикальные CTD-профилирования зондом YSI ProDSS (США), который регистрирует температуру (точность измерений  $\pm 0.2$  °C), электропроводность (точность  $\pm 0.001$  мС/см), содержание растворенного кислорода (точность  $\pm 0.1$  мг/л), мутность (точность  $\pm 0.3$  FNU) и другие параметры. Во время эксперимента также велась регистрация течений автономным акустическим доплеровским профилометром скорости течений (ADCP RDI WH-600 kHz), который работает на полигоне почти непрерывно.

Для последующего анализа использовались исходные данные температурных рядов, а данные течений и кислорода были усреднены по 1 мин. Построены временные развертки вертикальных распределений температуры воды, скорости и направления течений. По данным температуры на горизонтах 10, 12, 15, 18 и 22 м были рассчитаны частотные спектры методом Уэлча.

Определение направления распространения и горизонтальных фазовых скоростей внутренних волн проводилось по данным флуктуаций температуры на термодатчиках, находящихся на одном горизонте, трех термокост. Вначале определялись функции когерентности флуктуаций температуры для каждой пары термодатчиков. Для дальнейшей обработки записей температуры проводилась их фильтрация цифровым полосовым фильтром в диапазоне периодов, где функции когерентности оказывались максимальны. Затем, с помощью кросс-корреляции при длине скользящего окна анализа Хемминга длительностью примерно 10–15 периодов средней частоты полосы фильтрации, по максимуму корреляции проводилось измерение разностей времен приходов волн (задержек) для трех пар термодатчиков. Поскольку при обработке предполагается, что волновой фронт – плоский, признаком обнаружения волнового процесса является тот факт, что сумма разностей времен прихода этого фронта между датчиками 1–2, 2–3 и 3–1 должна быть близка к нулю. Если сумма разностей времен прихода для данного момента времени не была близка нулю, то эта точка далее не рассматривалась. Этот метод использовался ранее для определения параметров внутренних волн на абхазском шельфе (Serebryany et al., 2020).

### Результаты и обсуждение

#### *Фоновые метеорологические и гидродинамические условия в период эксперимента*

В период наблюдений отмечалось постепенное повышение дневной температуры воздуха от 23.7 °С до 29 °С (рисунок 2). Минимальная температура воздуха составила 19.2 °С 17 июня 6:00, а максимальная – 29.1 °С 21 июня в 15:00. Хорошо выражен суточный ход температуры. С 14 июня по 18 июня скорость ветра была 1–2 м/с преимущественно С, С-З направлений. В последующие дни направление ветра сменилось на В, С-В со средней скоростью ветра 2–3 м/с. Максимальная скорость ветра 5 м/с зарегистрирована днем 20 июня.

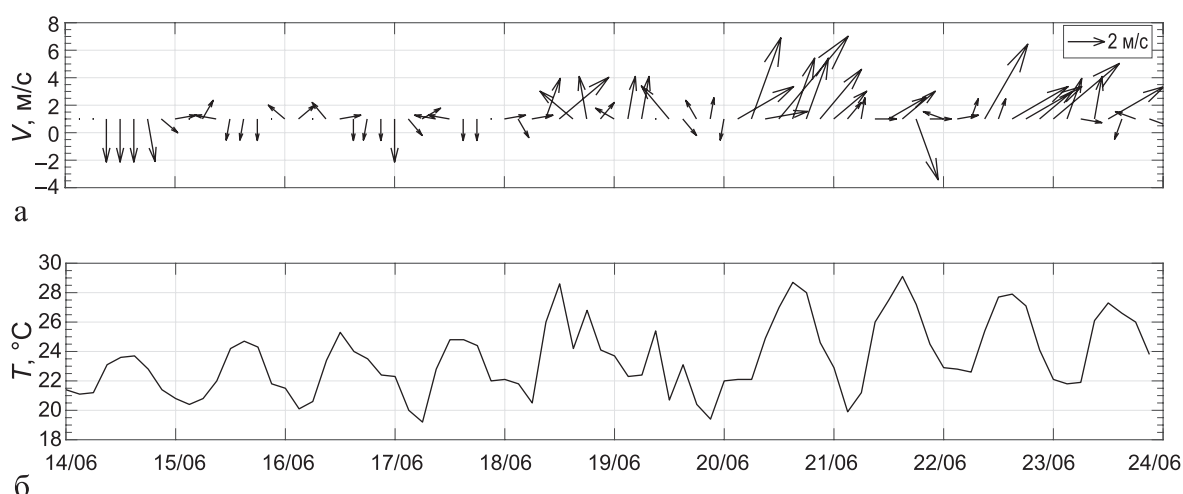


Рис. 2 – Направление и скорость ветра (а) и температура воздуха (б) 14–24 июня 2023 г.

В соответствии с повышением дневной температуры воздуха, происходило постепенное сезонное прогревание верхнего слоя водной толщи. В день постановки 14 июня термоклин имел вид ступенек с максимальным градиентом температуры на горизонтах 5 и 10 м (рисунок 3а). К 19 июня произошло формирование верхнего квазигомогенного слоя (ВКС) с температурой близкой к 23.5 °С и явно выраженного термоклина на глубине 7 м. К 21 июня ВКС достиг глубины 11 м, термоклин при этом опустился на глубину 11–15 м, перепад температуры составил 6.3 °С. Изменчивость вертикальной структуры хорошо отражают профили Вьясяля-Брента (рисунок 3б). 14 июня выявлены три максимума частоты плавучести: в приповерхностном слое на глубине 4–5 м, в середине водной толщи на 10 м, а также в придонном слое на 21 м. При этом максимумы частоты Вьясяля-Брента достигали значений 50 цикл/ч, 45 цикл/ч и 32 цикл/ч, соответственно. Для 19 июня максимум частоты плавучести составил 51 цикл/ч на горизонте 6.8 м, а также 30 цикл/ч на 14 м. 21 июня пик частоты Вьясяля-Брента увеличился до 68 цикл/ч и располагался в середине водной толщи на глубине 11 м. Также на 14 м наблюдался пик со значением 45 цикл/ч. Таким образом, во время эксперимента минимальный период внутренних волн составлял 50–70 с.

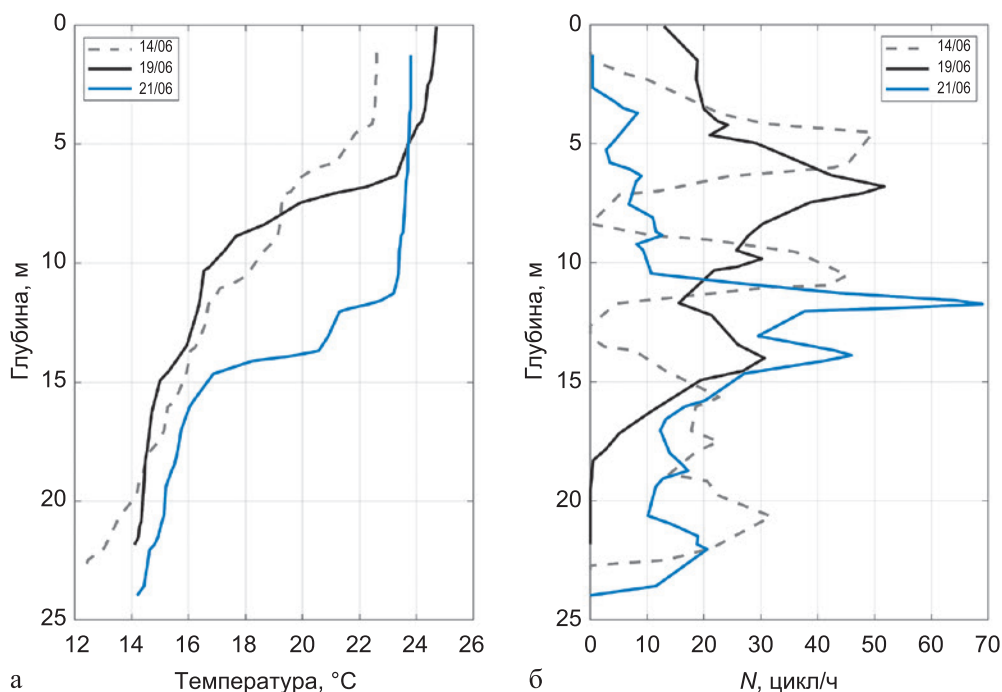


Рис. 3 – Вертикальные профили: **а** – температуры; **б** – частоты Вьяйсяля-Брента 14, 19 и 21 июня 2023 г.

В период с 14 июня до середины 16 июня наблюдалось относительно слабое юго-восточное течение (10–15 см/с). В последствии оно сменилось на более сильное северо-западное течение (20–30 см/с), а 19 июня и 21 июня в верхнем слое течение усиливалось до 40–55 см/с (рисунок 4).

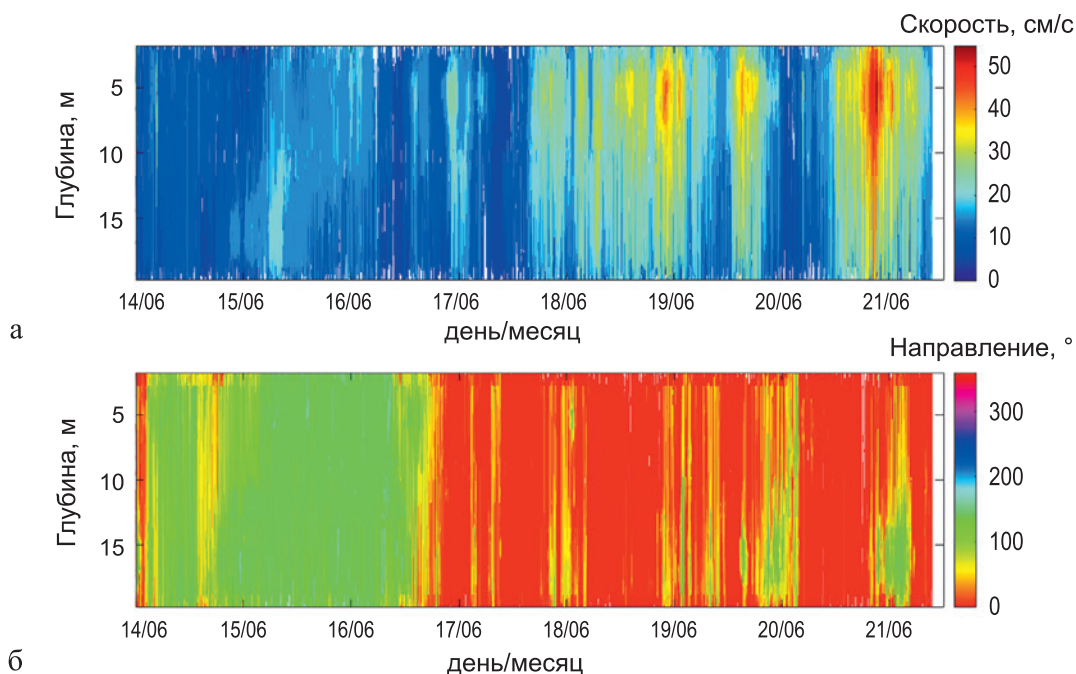


Рис. 4 – Временная изменчивость: **а** – скорости; **б** – направления течений по данным ADCP 14–21 июня 2023 г.

*Вертикальная структура температуры водной толщи*

По данным термокосы Т4 можно проследить за временной изменчивостью температуры водной толщи от глубины почти 5 м до придонного слоя 23 м (рисунок 5а). В первые дни наблюдений положение термоклина имело тенденцию к повышению от глубины 14 м до 6 м, что, вероятно, было обусловлено воздействием ЮВ течения. В последующие дни термоклин постепенно заглублялся, чему способствовало не только воздействие сезонного прогрева, но и усиление вдольберегового СЗ течения. Известно, что в районе наблюдений такие колебания термоклина (пикноклина) обусловлены изменением скорости и направления вдольберегового течения за счет меандрирования струи ОЧТ (Зацепин и др., 2016). Дополнительно на заглубление термоклина оказывало влияние воздействие СВ ветра. На рисунке 5б представлена изменчивость температуры водной толщи от 10 м до 22 м в период работы датчика кислорода для последующего анализа, который будет представлен в соответствующем разделе. Заметим, что во всей толще отмечаются синхронные колебания температуры с периодом 15–17 ч, что близко к локальному инерционному. Такие колебания, вероятно, обусловлены подходом квазиинерционных внутренних волн в прибрежную зону.

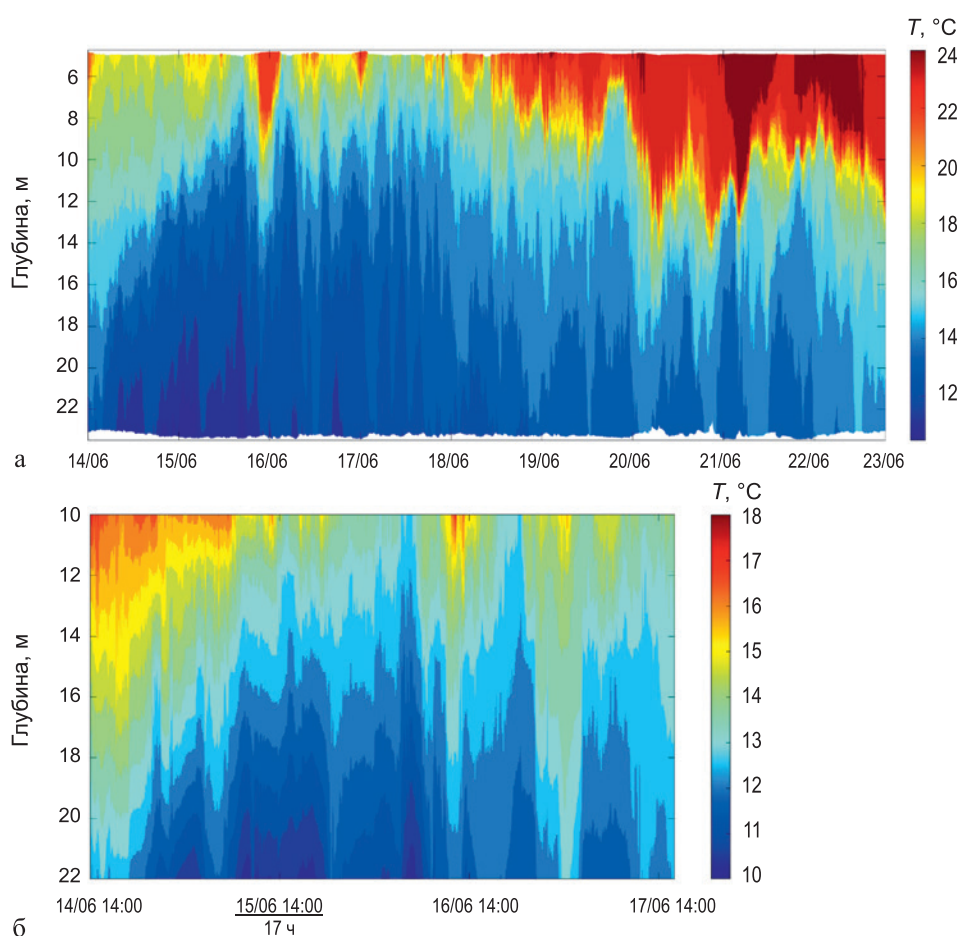


Рис. 5 – Временная изменчивость температуры: **а** – по данным термокосы Т4 14–23 июня;

**б** – по данным термокосы Т3 для периода работы датчика кислорода 14–17 июня.

Масштаб рисунков по оси времени различный

По результатам рассчитанных частотных спектров (рисунок 6) для каждой станции выявляется пик на частоте, близкой к локальной инерционной ( $f_{in} = 17.1$  ч). Максимальный уровень энергии наблюдается на горизонте 10 м, который с глубиной последовательно уменьшается. При этом на 10 м частота имеет сдвиг в низкочастотную область, что объясняется влиянием фонового течения, имеющего циклоническую направленность, для периода проведенного расчета. Влиянию общей фоновой циркуляции на изменение частоты квазиинерционных внутренних волн посвящены работы как в Мировом океане (Garrett, 2001; Le Boyer et al., 2020), так и в Черном море, в частности (Клювиткин и др., 2019; Khimchenko et al., 2022). Интересно, что в нашем примере с глубиной отмечается сдвиг частоты в более высокочастотную область – «голубой сдвиг», значения наблюдаемых периодов приведены в таблице 1. Уменьшение периода с глубиной, вероятно, объясняется взаимодействием волн с дном, над которым они распространяются (Коняев, Сабинин, 1992; Garrett, 2001).

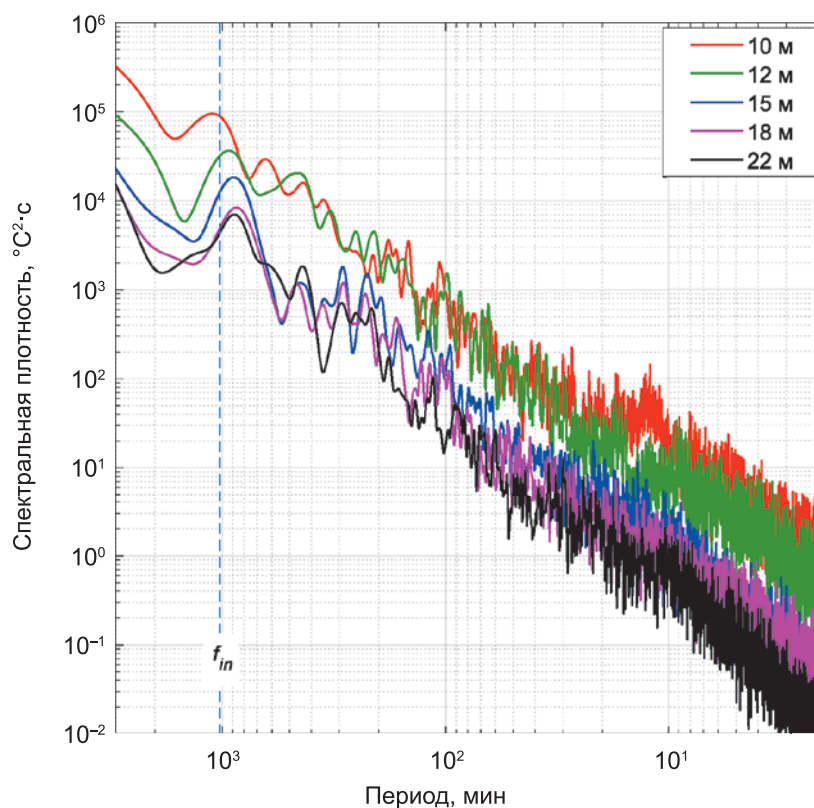


Рис. 6 – Спектральная плотность флуктуаций температуры на разных глубинах на термокосе T2

Табл. 1 – Изменение периода квазиинерционных внутренних волн с глубиной

| Глубина, м | Период, ч |
|------------|-----------|
| 10         | 18.43     |
| 12         | 15.67     |
| 15         | 14.87     |
| 18         | 14.42     |
| 22         | 14.70     |



### Цуги короткопериодных внутренних волн

Наиболее яркие примеры проявления цугов внутренних волн, которые удалось зарегистрировать на трех–четырех станциях, наблюдались после эпизодов усиления течения 20 и 21 июня.

Цуг волн, зарегистрированный 20 июня после 01:00, представлен на рисунке 7. Волны более выражены были на горизонте 10 м. При этом максимальное количество волн (6) было зарегистрировано на Т1 и Т4. Сначала цуг был отмечен на станции Т4, потом Т1 и Т3. По мере продвижения цуга, позже всего волны были выявлены на станции Т2, при этом в составе цуга идентифицировались лишь 4 волны. Максимальный перепад температуры между гребнем и подошвой волны составил 6 °С. Максимальная высота наблюдалась у головной волны и составила 7.5 м, далее высоты волн последовательно убывали до 1 м. Исходя из времени регистрации волн на каждой станции и по данным расчета времени задержек, обратный азимут направления волн составил 285°, а значит сами волны распространялись вдоль берега на ЮВ. Горизонтальная фазовая скорость волн  $c$  составила 0.3 м/с. Период  $T$  наблюдаемых волн – 10–12 мин. Зная скорость распространения  $c$  и период волн  $T$ , находим длину  $\lambda$ , которая для данного примера составила 180–216 м.

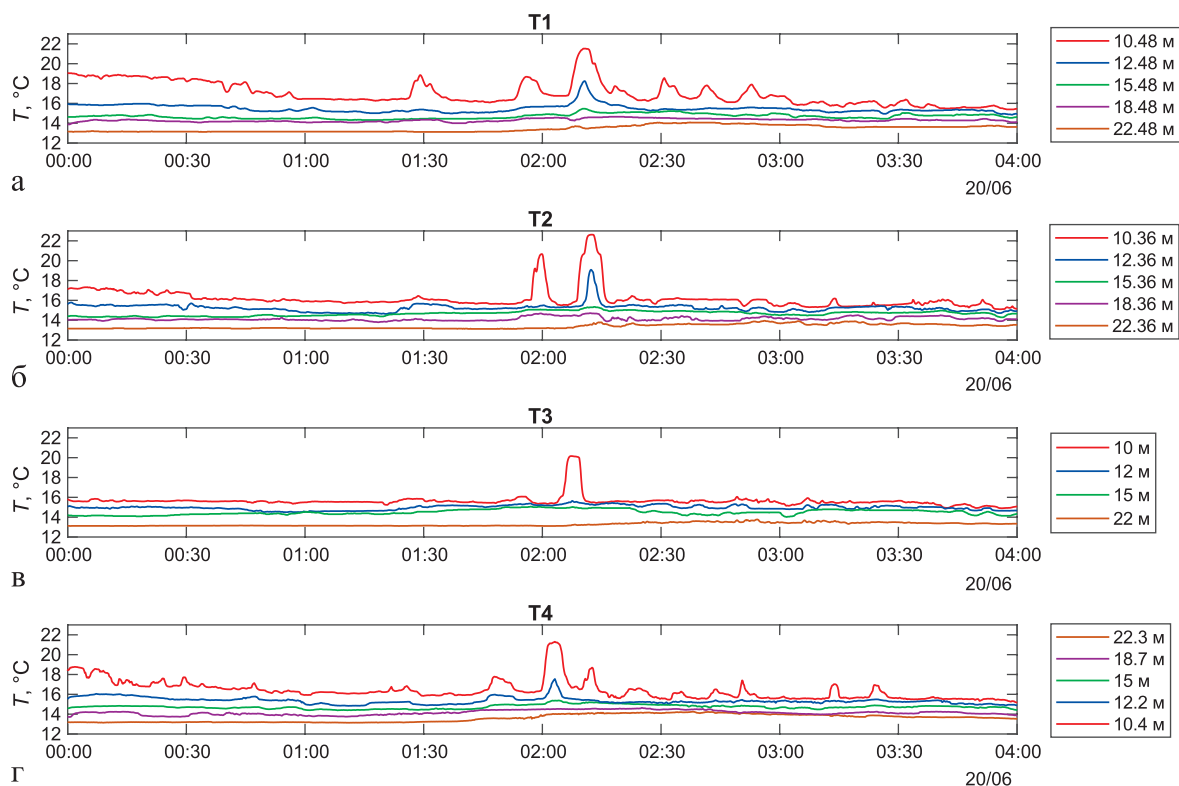


Рис. 7 – Колебания температуры на отдельных горизонтах 20 июня 2023 г. на термокосах: **а** – Т1; **б** – Т2; **в** – Т3; **г** – Т4.

Цветом обозначены горизонты расположения датчиков температуры

Между 23:00 20 июня и 00:30 21 июня на всех станциях наблюдались волны второй моды (рисунок 8). Период волн  $T \approx 6$  мин. Этот пакет волн был зарегистрирован последовательно на станциях Т3, Т4, Т2 и затем на Т1. Направление распространения волн СВ на берег. Скорость распространения  $c = 0.1\text{--}0.3$  м/с, соответственно, длина волн  $\lambda = 40\text{--}108$  м. Более детально цуг второй моды представлен по данным станции Т4 (рисунок 9), на которой датчики температуры располагались почти через 1 м. Колебания в противофазе наблюдались на горизонтах от 12 до 9 м и от 12 до 15 м. Наиболее выражены первые три волны.

Следом за цугом волн второй моды, в промежутке времени между 00:30–01:20, был зарегистрирован пакет внутренних волн 1-й моды с периодом  $T \approx 2$  мин.

Проведенный расчет скорости и направления внутренних волн для всей реализации записи данных выявил, что цуги внутренних волн с периодом 4–6 мин имели скорость близкую к 0.1 м/с, а вот направление распространения изменялось в широком диапазоне.

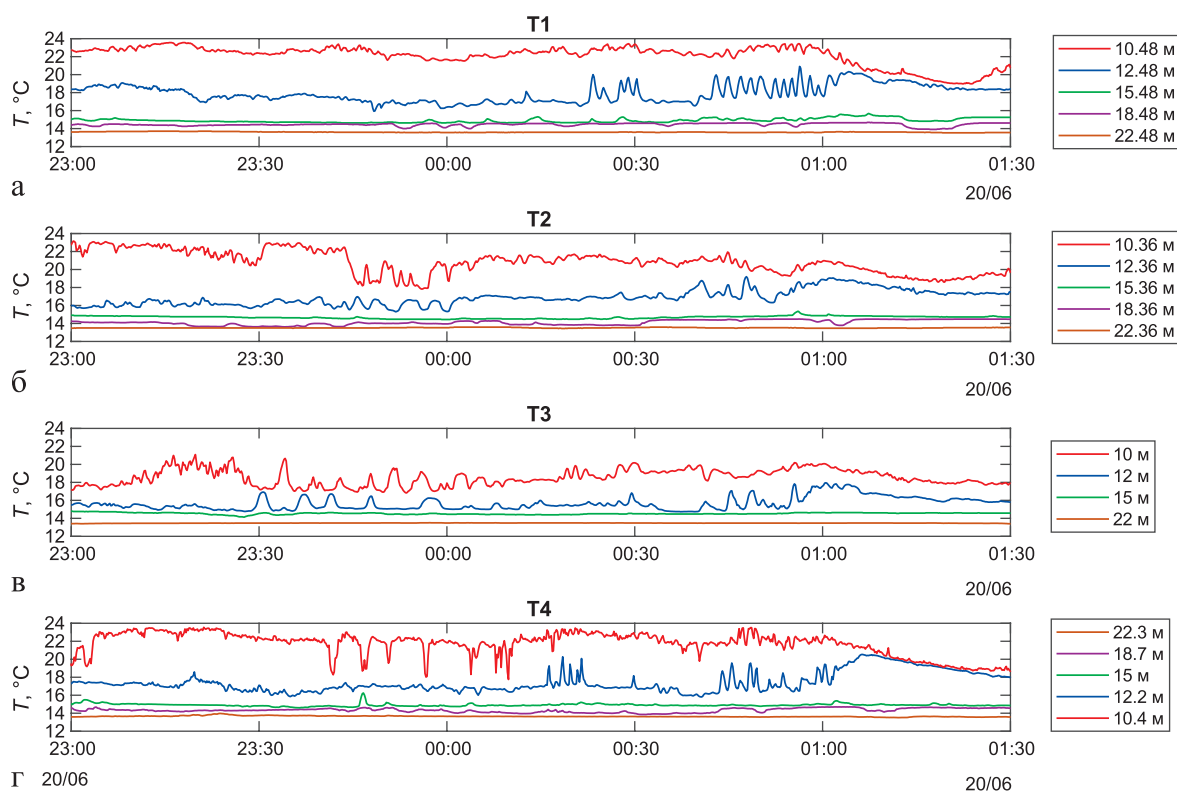


Рис. 8 – Колебания температуры на отдельных горизонтах 21 июня 2023 г. на термокосах: а – Т1; б – Т2; в – Т3; г – Т4. Цветом обозначены горизонты расположения датчиков температуры

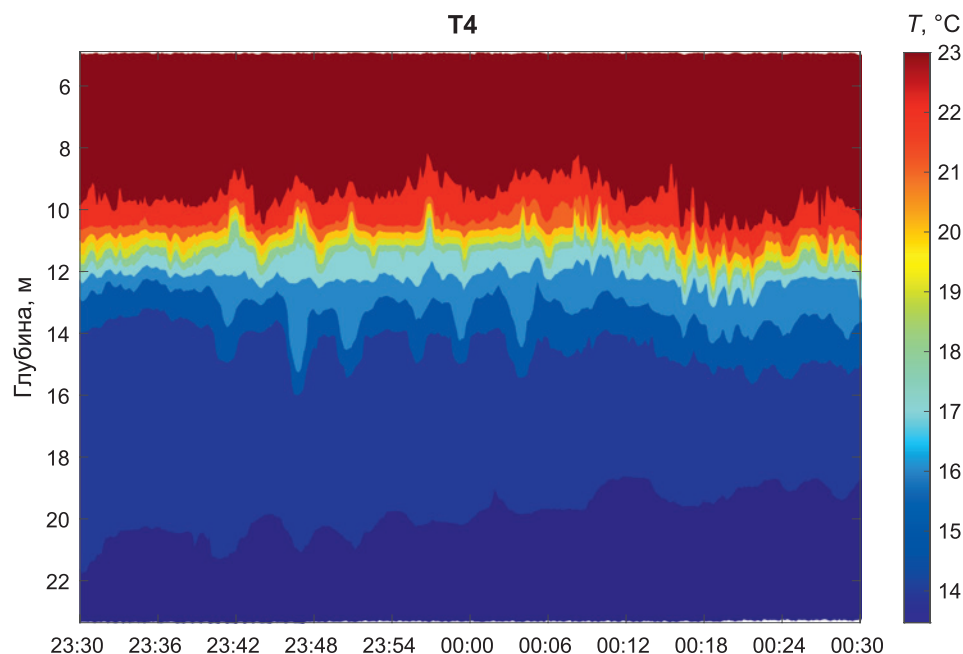


Рис. 9 – Проявление короткопериодных внутренних волн 2-й моды 20–21 июня 2023 г., станция Т4

### *Временная изменчивость распределения температуры и растворенного кислорода на горизонте 18 м*

Изначально предполагалось провести одновременные измерения температуры и растворенного кислорода на одном горизонте в течение всего эксперимента, однако запись данных на датчике Anderaa прекратилась около 16 ч 17 июня. В связи с этим цуги внутренних волн, представленные выше, в этом разделе не приведены.

На рисунке 10а представлен характер изменчивости температуры и растворенного кислорода на горизонте 18 м. В первые несколько часов концентрация растворенного кислорода имела значения близкие к 10.25 мг/л при температуре 15 °С, затем после 17:00 14 июня произошло резкое понижение температуры до 13 °С и одновременное уменьшение концентрации кислорода до 9.5 мг/л. Восстановление кислорода до прежнего уровня произошло к 6:00 15 июня, спустя 16 ч. В последующие дни изменения температуры были не такие резкие, однако также наблюдались последовательные чередования понижения и повышения температуры в пределах 1–2 °С, вместе с которыми отмечалось соответствующее понижение и увеличение содержания растворенного кислорода на горизонте в пределах 0.5–0.75 мг/л. Если рассматривать изменчивость растворенного кислорода не в абсолютных значениях, а как процентное содержание, то соответствующие изменения будут такими: падение уровня насыщения от 100–102 % до 90–88 %.

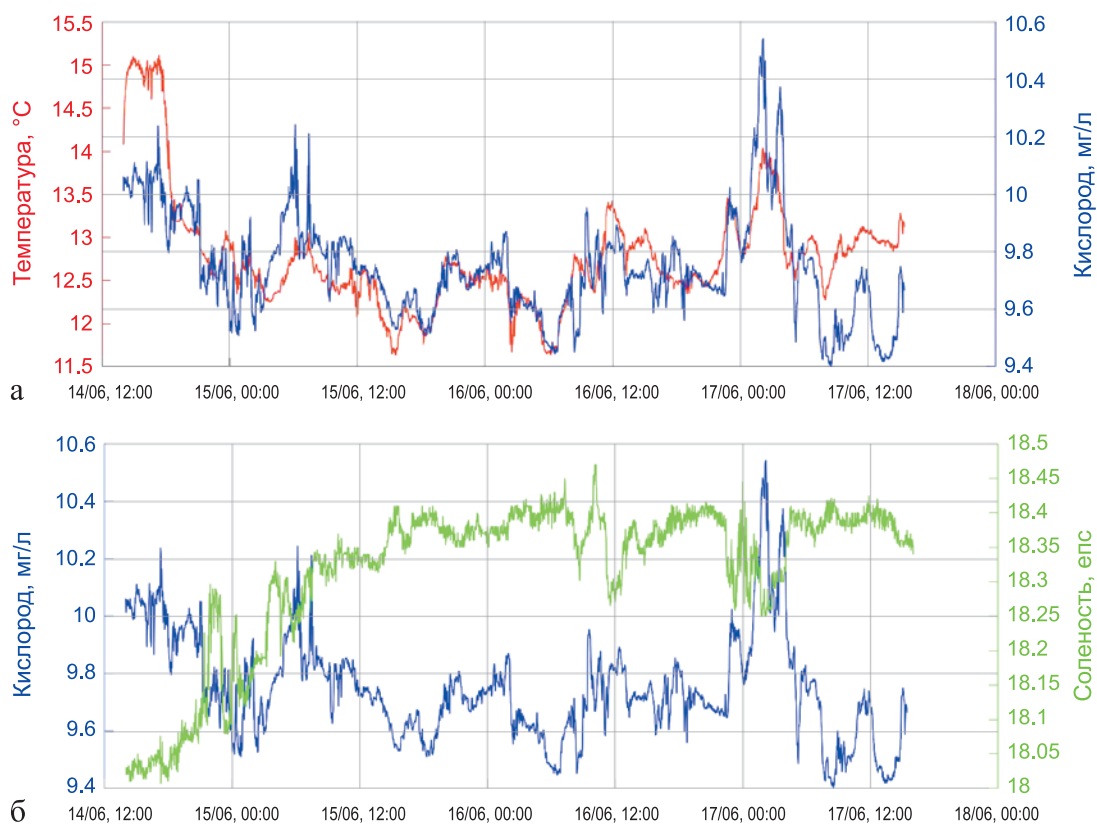


Рис. 10 – Временная изменчивость: **а** – температуры и растворенного кислорода на горизонте 18 м; **б** – солёности на горизонте 15 м и растворенного кислорода на горизонте 18 м 14–17 июня 2023 г., станция ТЗ

Подобное уменьшение содержания кислорода при одновременном падении температуры кажется нетипичным на первый взгляд. Известно, что растворимость кислорода увеличивается при понижении температуры, т. е. характерна обратная зависимость между температурой воды и содержанием растворенного кислорода, а в нашем случае в основном наблюдается прямая зависимость (коэффициент корреляции Пирсона  $R = 0.64$ ,  $p < 0.001$ ). Наиболее вероятно следующее физическое объяснение наблюдаемого эффекта: подход в прибрежную зону глубинных вод, которые отличаются пониженной температурой по сравнению с окружающими водами, а также пониженным содержанием растворенного кислорода, обусловленным повышенной солёностью, поскольку растворимость газов в воде уменьшается с увеличением минерализации. Действительно, воды с пониженным содержанием кислорода оказались и более солёными, что подтверждает их глубинное происхождение (рисунок 10б). Хотя датчик солёности располагался на горизонте 15 м, из рисунка 5б видно, что в рассматриваемый период с 14 по 17 июня подъем холодных вод с температурой ниже  $13^{\circ}\text{C}$  достигал глубины 10–12 м. Таким образом, пониженное содержание растворенного кислорода, вероятно, вызвано адвекцией более холодной и солёной глубокой воды в прибрежную зону. Это наглядно отражают вертикальные профили, выполненные 14 и 15 июня близ станции Т4 (рисунок 11).

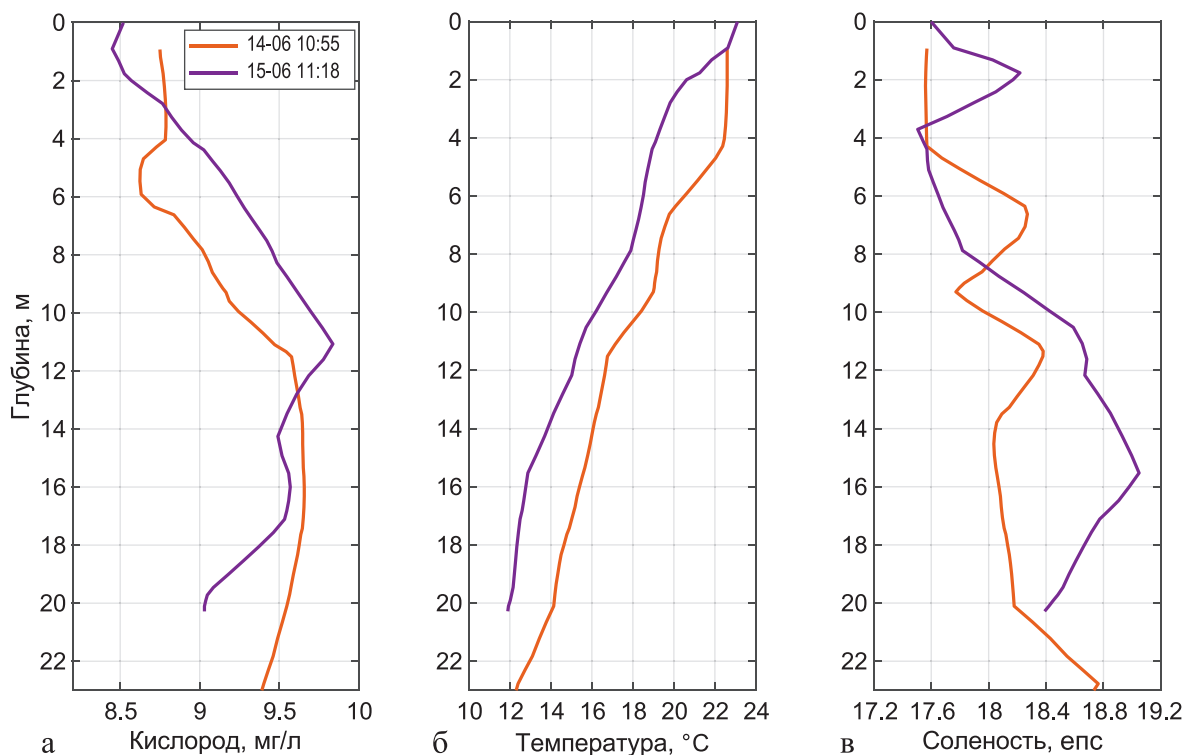


Рис. 11 – Вертикальные профили близ станции Т4: **а** – растворенного кислорода; **б** – температуры; **в** – солености 14 и 15 июня 2023 г.

14 июня перед постановкой станции наблюдалась вода температурой 22.6 °C в приповерхностном слое, которая постепенно снижалась до 18.6 °C на глубине 10 м и продолжала уменьшаться до 11.9 °C на дне. Вертикальное распределение солености изменялось в пределах от 17.6 eps до 18.8 eps. Содержание кислорода в верхнем 11-метровом слое воды находилось в пределах 8.6–9.5 мг/л, а глубже изменялось незначительно от 9.6 мг/л до 9.4 мг/л, при этом сохранялась обратная зависимость между температурой воды и содержанием кислорода. Спустя сутки 15 июня распределение параметров воды изменилось. Температура воды уменьшилась почти на 2 °C от приповерхностного слоя до дна. Одновременно значения солености увеличивались в слое от 10–11 м (максимум 19.05 eps на горизонте 15.5 м). Содержание кислорода в среднем выросло на 0.5 мг/л на каждом горизонте в слое от 3 м до 11 м. Глубже, несмотря на продолжающееся понижение температуры, концентрация кислорода уменьшилась до 9.03 мг/л. Таким образом, на содержание растворенного кислорода в придонном слое большую роль оказывала соленость.

Подобное уменьшение содержания кислорода, вызванное апвеллингом, наблюдалось летом в районе Южного берега Крыма (Власенко и др., 1999). В Мировом океане этот процесс достаточно хорошо описан на побережье Калифорнии (Booth et al., 2012), в том числе обусловленный влиянием нелинейных внутренних волн (Walter et al., 2014).

В нашем случае метеорологическая ситуация не способствовала формированию ветрового апвеллинга. Но вероятен подход в прибрежную зону квазиинерционных

внутренних волн, что часто наблюдается в исследуемом районе (Иванов, Серебряный, 1985). При детальном рассмотрении временной изменчивости распределения температуры с глубиной (рисунок 5б) отмечается подъем более холодной воды с периодом 15–17 ч, что близко к локальному инерционному с учетом «голубого» сдвига, о чем уже упоминалось выше. Таким образом, вероятно, прохождение квазиинерционных внутренних волн привело к пониженному содержанию кислорода в районе наблюдений.

### *Изменчивость распределения кислорода при прохождении короткопериодных внутренних волн*

В качестве примера влияния короткопериодной внутренней волны на изменчивость распределения содержания кислорода представлена запись температуры и кислорода от 14 июня (рисунок 12). На горизонте наблюдались три колебания температуры с периодом 20–15 мин, направление распространения волн было на северо-восток, при общем фоновом течении – на юго-восток. При прохождении этих волн на горизонте температура понизилась на 0.2–0.4 °С, что также сопровождалось почти синхронным уменьшением содержания растворенного кислорода на 0.2 мг/л. Такое изменение содержания кислорода является незначительным, однако, следует учитывать, что мы располагаем данными только на одном горизонте, который не совпадает с положением термоклина. При прохождении более интенсивных внутренних волн, где изменения температуры могут достигать нескольких градусов, следует ожидать более существенные изменения концентрации кислорода в несколько мг/л.

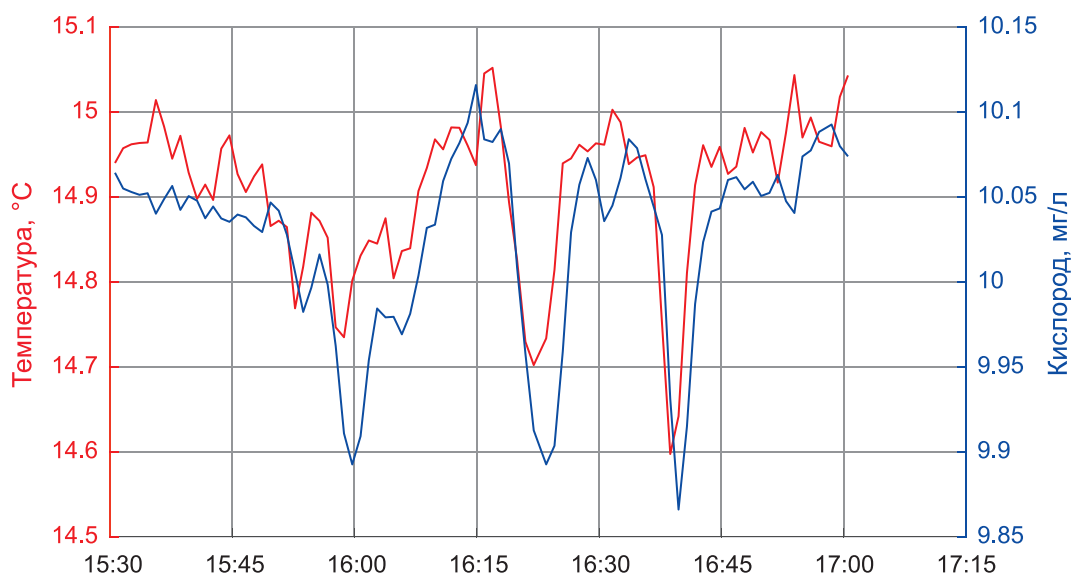


Рис. 12 – Временная изменчивость содержания растворенного кислорода и температуры на горизонте 18 м 15:30–17:00 14 июня 2023 г.

## Заключение

В ходе эксперимента удалось получить набор данных по измерению температуры, растворенного кислорода, солености и течений на наиболее динамичной части шельфа Черного моря. Проведены сравнительно редкие одновременные измерения температуры четырьмя термокосами, что позволило более детально проанализировать характеристики внутренних волн. Выделены волновые пакеты первой и второй моды внутренних волн. Проведена оценка направления распространения внутренних волн. Скорости внутренних волн варьировались в среднем от 0.1 м/с до 0.3 м/с, а направление распространения цугов изменялось в широком диапазоне. Получены спектры температурных флюктуаций на разных глубинах. Обнаружен сдвиг частоты квазиинерционных волн в высокочастотную область с глубиной.

В результате анализа на горизонте 18 м установлена положительная корреляция температуры и растворенного кислорода. Обосновано предположение, что эффект уменьшения растворенного кислорода, при одновременном уменьшении температуры, связан с влиянием квазиинерционных внутренних волн, которые приносят в прибрежные воды глубинную воду с пониженным содержанием кислорода. Концентрация растворенного кислорода изменялась от 0.5 мг/л до 0.75 мг/л на горизонте, что соответствовало падению уровня насыщения вод кислородом на 10 %. При прохождении короткопериодных внутренних волн уменьшение содержания растворенного кислорода составило 0.2 мг/л. Полученные результаты на одном горизонте не дают полного представления о влиянии внутренних волн на концентрацию кислорода во всей толще вод. Данное направление исследований требует проведения дополнительных специализированных экспериментов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории акустики океана в.н.с., к.г.н. Островскому А. Г. и н.с. Кочетову О. Ю. за предоставление датчика Andega и всестороннюю поддержку исследования, а также сотрудникам Лаборатории биогидрохимии с.н.с., к.г.н. Полухину А. А. и м.н.с. Борисенко Г. В. за предоставленный зонд YSI и бесценную помощь в проведении натурального эксперимента.

Исследование проведено в рамках темы госзадания Минобрнауки № FMWE-2024-0024. Экспедиционные работы, а также обработка и анализ данных выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-77-00055, <https://rscf.ru/project/22-77-00055/>.

## Список литературы

1. Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А., Косарев А. Н., Тужилкин В. С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л: Гидрометеиздат, 1984. 238 с.
2. Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. 135–142. <https://doi.org/10.7868/s0002351516050035>.

3. *Бондур В. Г., Серебряный А. Н., Замшин В. В., Тарасов Л. Л., Химченко Е. Е.* Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 114–127. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515531114-127>.
4. *Власенко В. И., Стацук Н. М., Иванов В. А., Романов А. С., Внуков Ю. Л.* Исследование динамики полей кислорода и сероводорода в шельфовой зоне Южного берега Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 1999. Т. 1. С. 79–90.
5. *Еремеев В. Н., Коновалов С. К.* К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 3. С. 5–30.
6. *Зацепин А. Г., Островский А. Г., Кременецкий В. В., Низов С. С., Пиотух В. Б., Соловьев В. А., Швоев Д. А., Цибульский А. Л., Куклев С. Б., Куклева О. Н., Москаленко Л. В., Подымов О. И., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кубряков А. А., Соловьев Д. М., Станичный С. В.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.7868/s0002351513060163>.
7. *Зацепин А. Г., Ёлкин Д. Н., Корж А. О., Куклев С. Б., Подымов О. И., Островский А. Г., Соловьев Д. М.* О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // Морской гидрофизический журнал. 2016. Т. 3. С. 16–25.
8. *Иванов Ю. А., Смирнов Б. А., Тареев Б. А., Филлюшкин Б. Н.* Экспериментальное исследование колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана 1969. Т. 5. № 3. С. 416–425.
9. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Известия Российской Академии наук. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
10. *Иванов В. А., Серебряный А. Н.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливногo моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
11. *Клювиткин А. А., Островский А. Г., Лисицын А. П., Коновалов С. К.* Энергетический спектр скорости течения в глубокой части Черного моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 5. С. 550–554. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885550-554>.
12. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 5. С. 422–433. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-422-433>.
13. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Вертикальное распределение кислорода и сероводорода в Черном море в 2016 г. // Вестник Московского университета. 2020. № 3. С. 91–99.
14. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. Москва: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
15. *Костылева А. В., Мошаров С. А., Подымов О. И.* Исследования сезонной динамики кислорода, кажущегося потребления кислорода и хлорофилла «а» в северо-восточной части Черного моря в 2012 году // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 715–725. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050100>.
16. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой



- радиолокации // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле Академии наук. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11010272>.
17. Лаврова О. Ю., Серебряный А. Н., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
  18. Очередник В. В., Баранов В. И., Зацепин А. Г., Куклев С. Б. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 719–730. <https://doi.org/10.1134/s003015741805009x>.
  19. Очередник В. В., Зацепин А. Г., Куклев С. Б., Баранов В. И., Машура В. В. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 173–185. <https://doi.org/10.31857/s0030157420010189>.
  20. Очередник В. В., Зацепин А. Г. Цуги короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря по данным измерений кластера термокос // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39. № 5. С. 650–670.
  21. Поярков С. Г., Стунжас П. А. Разнопериодная изменчивость гидролого-гидрохимических полей аэробной зоны Черного моря // Экосистемы пелагиали Черного моря. М.: Наука, 1980. С. 20–44.
  22. Серебряный А. Н. Сliko- и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 275–286.
  23. Серебряный А. Н., Иванов В. А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. № 3. С. 34–45.
  24. Серебряный А. Н., Химченко Е. Е. Внутренние волны второй моды в Черном море // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 5. С. 555–559.
  25. 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. Т. 46. № 2. С. 69–87.
  26. Booth J. A. T., McPhee-Shaw E. E., Chua P., Kingsley E., Denny M., Phillips R., Bograd S. J., Zeidberg L. D., Gilly W. F. Natural intrusions of hypoxic, low pH water into nearshore marine environments on the California coast // Cont. Shelf Res. 2012. Vol. 45. P. 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.06.009>.
  27. Bourgault D., Morsilli M., Richards C., Neumeier U., Kelley D. E. Sediment resuspension and nepheloid layers induced by long internal solitary waves shoaling orthogonally on uniform slopes // Cont. Shelf Res. 2014. Vol. 72. P. 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.019>.
  28. Filonov A. E. Thermic structure and intense internal waves on the narrow continental shelf of the Black Sea // J. Mar. Syst. 2000. Vol. 24. No. 1–2. P. 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00077-9).
  29. Garrett C. What is the “Near-inertial” band and why is it different from the rest of the internal wave spectrum? // J. Phys. Oceanogr. 2001. Vol. 31. No. 4. P. 962–971. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0962:WITNIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0962:WITNIB>2.0.CO;2).
  30. Gilly W. F., Michael Beman J., Litvin S. Y., Robison B. H. Oceanographic and biological effects of shoaling of the oxygen minimum zone // Ann. Rev. Mar. Science. 2013. Vol. 5. P. 393–420. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100849>.
  31. Jia Y., Tian Z., Shi X., Liu J. P., Chen J., Liu X., Ye R., Ren Z., Tian J. Deep-sea Sediment Resuspension by Internal Solitary Waves in the Northern South China Sea // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47886-y>.

32. *Khimchenko E., Ostrovskii A., Klyuvitkin A., Piterbarg L.* Seasonal Variability of Near-Inertial Internal Waves in the Deep Central Part of the Black Sea. // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Т. 10. No. 5. P. 557. <https://doi.org/10.3390/jmse10050557>.
33. *Khimchenko E., Ostrovskii A.* Observations of Near-Inertial Internal Waves over the Continental Slope in the Northeastern Black Sea // *J. Mar. Sci. Eng.* 2024. Vol. 12. No. 3. <https://doi.org/10.3390/jmse12030507>.
34. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. No. 9. P. 892. <https://doi.org/10.3390/rs9090892>.
35. *Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Serebryany A. N., Sabinin K. D., Kalashnikova N. A., Krayushkin E. V., Khymchenko I.* Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements // *Remote Sens. Ocean. Sea Ice, Coast. Waters, Large Water Reg.* 2014. Vol. 9240. No. October. P. 924016. <https://doi.org/10.1117/12.2067047>.
36. *Le Boyer A., Alford M. H., Pinkel R., Hennon T. D., Yang Y. J., Ko D., Nash J.* Frequency shift of near-inertial waves in the South China sea // *Journal of Physical Oceanography.* 2020. Vol. 50. No. 5. P. 1121–1135. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0103.1>.
37. *MacKinnon J. A., Zhao Z., Whalen C. B., Waterhouse A. F., Trossman D. S., Sun O. M., St Laurent L. C., Simmons H. L., Polzin K., Pinkel R., Pickering A., Norton N. J., Nash J. D., Musgrave R., Merchant L. M., Melet A. V., Mater B., Legg S., Large W. G., Kunze E., Klymak J. M., Jochum M., Jayne S. R., Hallberg R. W., Griffies S. M., Danabasoglu G., Chassignet E. P., Buijsman M. C., Bryan F. O., Briegleb B. P., Barna A., Arbic B. K., Ansong J. K., Alford M. H.* Climate process team on internal wave-driven ocean mixing // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 98. No. 11. P. 2429–2454. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0030.1>.
38. *Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G.* Internal waves study on a narrow steep shelf of the black sea using the spatial antenna of line temperature sensors // *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. Vol. 8. No. 11. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/jmse8110833>.
39. *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 // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. No. 10. <https://doi.org/10.3390/jmse10101342>.
40. *Smith K. A., Rocheleau G., Merrifield M., Jaramillo S., Pawlak G.* Temperature variability caused by internal tides in the coral reef ecosystem of Hanauma Bay, Hawai'i // *Cont. Shelf Res.* 2016. Vol. 116. P. 1–12.
41. *Walter R. K., Woodson C., Arthur R. S., Fringer O. B., Monismith S. G.* Nearshore internal bores and turbulent mixing in southern Monterey Bay // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2012. Vol. 117. No. 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012JC008115>.
42. *Walter R. K., Woodson C. B., Leary P. R., Monismith S. G.* Connecting wind-driven upwelling and offshore stratification to nearshore internal bores and oxygen variability // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014. Vol. 119. No. 1. P. 7645–7659. <https://doi.org/10.1002/2014JC009998>.
43. *Woodson C. B.* The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems // *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2018. Vol. 10. P. 421–441. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619>.

Статья поступила в редакцию 11.04.2024, одобрена к печати 16.07.2024.

**Для цитирования:** Химченко Е. Е., Серебряный А. Н., Попов О. Е., Очередник В. В. Внутренние волны и их влияние на изменчивость растворенного кислорода на геленджикском шельфе Черного моря в летнее время // *Океанологические исследования.* 2024. № 52 (3). С. 34–56. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(3\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(3).3).

## INTERNAL WAVES AND THEIR INFLUENCE ON DISSOLVED OXYGEN VARIABILITY ON THE GELENDZHNIK SHELF OF THE BLACK SEA IN SUMMER TIME

E. E. Khimchenko<sup>1</sup>, A. N. Serebryany<sup>1,2</sup>, O. E. Popov<sup>3</sup>, V. V. Ocherednik<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: ekhym@ocean.ru;*

<sup>2</sup> *Andreyev Acoustics Institute,  
4, Shvernika, Moscow, 117292, Russia;*

<sup>3</sup> *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,  
3, Pyzhevskiy pereulok, Moscow, 119017, Russia*

The paper presents field observations of internal waves at the Gelendzhik polygon from 14–23 June 2023. The measurements were taken simultaneously on four moored thermochaines, installed at a depth of approximately 23 m. Currents were recorded, and the water column was vertically profiled with measurements of temperature, conductivity, and dissolved oxygen. Dissolved oxygen was recorded at a depth of 18 metres on one of the thermochains. The most intense short-period trains recorded after the strengthening of the alongshore north-western current are presented. The internal waves of the first and second modes are revealed. The main parameters of the observed internal waves are estimated. It is shown that near-inertial internal waves approaching the coastal zone contain colder and saltier water with reduced oxygen content. As a result, their approach leads to a 10 % drop in water oxygen saturation at the horizon. An example of the effect of short-period internal waves on dissolved oxygen content is presented.

**Keywords:** Black Sea, Gelendzhik polygon, internal waves, stratification, temperature measurement, oxygen distribution

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the staff of the Laboratory of Ocean Acoustics leading researcher, PhD A. G. Ostrovskii and research scientist O. Yu. Kochetov for providing the Anderaa sensor and comprehensive support of the study, as well as to the staff of the Bio-Hydrochemistry Laboratory senior researcher, PhD A. A. Polukhin and junior researcher G. V. Borisenko for providing the YSI probe and invaluable assistance in conducting the field experiment.

The research was carried out within the framework of the state task of Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation No. FMWE-2024-0024. The expedition work and data processing and analysis were supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-77-00055, <https://rscf.ru/project/22-77-00055/>.

## References

1. Blatov, A. S., N. P. Bulgakov, V. A. Ivanov, A. N. Kosarev, and V. S. Tuzhilkin, 1984: *Izmenchivost' gidrofizicheskikh polei Chernogo morya (Variability of the hydrophysical fields of the Black Sea)*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 238 p.
2. Bondur, V. G., K. D. Sabinin, and Y. V. Grebenyuk, 2017: Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **53**, 120–126, <https://doi.org/10.1134/S0001433816050030>.
3. Bondur, V. G., A. N. Serebryany, V. V. Zamshin, L. L. Narasov, and E. E. Khimchenko, 2019: Intense internal waves of anomalous heights on the Black Sea shelf. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **55** (1), 114–127, <https://doi.org/10.1134/S000143381901002X>.
4. Booth, J. A. T., E. E. McPhee-Shaw, P. Chua, E. Kingsley, M. Denny, R. Phillips, S. J. Bograd, L. D. Zeidberg, and W. F. Gilly, 2012: Natural intrusions of hypoxic, low pH water into nearshore marine environments on the California coast. *Cont. Shelf Res.*, **45**, 108–115, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.06.009>.
5. Bourgault, D., M. Morsilli, C. Richards, U. Neumeier, and D. E. Kelley, 2014: Sediment resuspension and nepheloid layers induced by long internal solitary waves shoaling orthogonally on uniform slopes. *Cont. Shelf Res.*, **72**, 21–33, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.019>.
6. Ereemeev, V. N. and S. K. Konovalov, 2006: K voprosu o formirovaniy bjudzheta i zakonomenostyah raspredeleniya kisloroda i serovodoroda v vodah Chernogo morya (On the issue of budget formation and patterns of distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the waters of the Black Sea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, **5** (3), 5–30.
7. Filonov, A. E., 2000: Thermic structure and intense internal waves on the narrow continental shelf of the Black Sea. *J. Mar. Syst.*, **24** (1–2), 27–40, [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00077-9).
8. Garrett, C., 2001: What is the “Near-inertial” band and why is it different from the rest of the internal wave spectrum? *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 962–971, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0962:WITNIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0962:WITNIB>2.0.CO;2).
9. Gilly, W. F., J. Michael Beman, S. Y. Litvin, and B. H. Robison, 2013: Oceanographic and biological effects of shoaling of the oxygen minimum zone. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, **5**, 393–420, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100849>.
10. Ivanov, Yu. A., B. A. Smirnov, B. A. Tareev, and B. N. Filyushkin, 1969: Eksperimental'nye issledovaniya kolebanii temperatury v more v diapazone chastot vnutrennikh gravitatsionnykh voln (Experimental studies of temperature variations in the sea in the frequency range of internal gravity waves). *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **5** (3), 416–425.
11. Ivanov, V. A. and A. N. Serebryany, 1982: Chastotnye spektry korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v besprilivnom more (Frequency spectra of short-period internal waves in the nontidal sea). *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **18** (6), 683–685.
12. Ivanov, V. A. and A. N. Serebryany, 1985: Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoi zone 604 besprilivnogo morya (Short-period internal waves in the coastal zone of nontidal sea). *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **21** (6), 648–656.
13. Jia, Y., Z. Tian, X. Shi, J. P. Liu, J. Chen, X. Liu, R. Ye, Z. Ren, and J. Tian, 2019: Deep-sea Sediment Resuspension by Internal Solitary Waves in the Northern South China Sea, *Sci. Rep.*, **9** (1), 1–8, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47886-y>.
14. Khimchenko, E. E. and A. N. Serebryany, 2018: Vnutrennie volny na kavkazskom i krymskom shel'fah Chernogo morya (po letne-osennim nabljudeniyam 2011–2016 gg.) (Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea (according to summer-autumn

- observations of 2011–2016). *Okeanologicheskie issledovaniya*, **46**, 69–87, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(2\).7](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7).
15. Khimchenko, E., A. Ostrovskii, A. Klyuvitkin, and L. Piterbarg, 2022: Seasonal Variability of Near-Inertial Internal Waves in the Deep Central Part of the Black Sea. *J. Mar. Sci. Eng.*, **10** (5), 557, <https://doi.org/10.3390/jmse10050557>.
  16. Khimchenko, E. and A. Ostrovskii, 2024: Observations of Near-Inertial Internal Waves over the Continental Slope in the Northeastern Black Sea. *J. Mar. Sci. Eng.*, **12** (3), 507, <https://doi.org/10.3390/jmse12030507>.
  17. Klyuvitkin, A., A. Ostrovskii, A. Lisitzin, and S. Konovalov, 2019: The Energy Spectrum of the Current Velocity in the Deep Part of the Black Sea. *Dokl. Earth Sci.*, **488**, 1222–1226, <https://doi.org/10.1134/S1028334X1910012X>.
  18. Kondrat'ev, S. I. and A. V. Vidnichuk, 2018: Osobennosti vertikal'nogo raspredelenija kisloroda i serovodoroda v Chernom more po jekspedicionnym dannym Morskogo gidrofizicheskogo instituta v 1995–2015 godah (Features of the vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the Black Sea according to expeditionary data of the Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, **34** (5), 422–433, <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-422-433>.
  19. Kondrat'ev, S. I. and A. V. Vidnichuk, 2020: Vertikal'noe raspredelenie kisloroda i serovodoroda v Chernom more v 2016 g. (Vertical distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the Black Sea in 2016). *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 91–99.
  20. Konjaev, K. V. and K. D. Sabinin, 1992: *Volny vnutri okeana (Waves inside the ocean)*. Moscow, Gidrometeoizdat, 272 p.
  21. Kostyleva, A. V., S. A. Mosharov, and O. I. Podymov, 2022: Studies of the seasonal variability of oxygen, apparent oxygen utilization, and chlorophyll-a in the northeastern part of the black sea in 2012. *Oceanology*, **62** (5), 620–629, <https://doi.org/10.1134/s0001437022050101>.
  22. Lavrova, O. Yu., M. I. Mitjagina, and K. D. Sabinin, 2011: Issledovanie osobennostej generacii i rasprostraneniya vnutrennih voln v besprilivnyh morjah po dannym sputnikovoj radiolokacii (Study of the features of the generation and propagation of internal waves in tidal seas using satellite radar data). *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Nauki O Zemle Akademii nauk*, **436**, 407–407, <https://doi.org/10.1134/S1028334X11010272>.
  23. Lavrova, O. Yu., A. N. Serebryany, M. I. Mityagina, and T. Yu. Bocharova, 2013: Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Sub-satellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern part of the Black Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **10** (4), 308–322.
  24. Lavrova, O. and M. Mityagina, 2017: Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas. *Remote Sens.*, **9**, 892, <https://doi.org/10.3390/rs9090892>.
  25. Lavrova, O. Y., M. I. Mityagina, A. N. Serebryany, K. D. Sabinin, N. A. Kalashnikova, E. V. Krayushkin, and E. Khymchenko, 2014: *Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements*. *Remote Sens. Ocean. Sea Ice, Coast. Waters, Large Water Reg.* **9240**, 924016, <https://doi.org/10.1117/12.2067047>.
  26. Le Boyer, A., M. H. Alford, R. Pinkel, T. D. Hennon, Y. J. Yang, D. Ko, and J. Nash, 2020: Frequency shift of near-inertial waves in the South China sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 1121–1135, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0103.1>.
  27. MacKinnon, J. A., Z. Zhao, C. B. Whalen, A. F. Waterhouse, D. S. Trossman, O. M. Sun, L. C. St Laurent, H. L. Simmons, K. Polzin, R. Pinkel, A. Pickering, N. J. Norton, J. D. Nash, R. Musgrave, L. M. Merchant, A. V. Melet, B. Mater, S. Legg, W. G. Large, E. Kunze, J. M. Klymak, M. Jochum, S. R. Jayne, R. W. Hallberg, S. M. Griffies,

- G. Danabasoglu, E. P. Chassignet, M. C. Buijsman, F. O. Bryan, B. P. Briegleb, A. Barna, B. K. Arbic, J. K. Ansong, and M. H. Alford, 2017: Climate process team on internal wave-driven ocean mixing. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, 2429–2454, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0030.1>.
28. Ocherednik, V. V., V. I. Baranov, A. G. Zatsepin, and S. B. Kyklev, 2018: Thermochains of the southern branch, shirshov institute of oceanology, Russian Academy of Sciences: design, methods, and results of metrological investigations of sensors. *Oceanology*, **58** (5), 661–671, <https://doi.org/10.1134/S003015741805009X>.
29. Ocherednik, V. V., A. G. Zatsepin, S. B. Kuklev, V. I. Baranov. and V. V. Mashura, 2020: Examples of approaches to studying the temperature variability of black sea shelf waters with a cluster of temperature sensor chains. *Oceanology*, **60** (2), 149–160, <https://doi.org/10.1134/S000143702001018X>.
30. Ocherednik, V. V. and A. G. Zatsepin, 2023: Packages of short-period internal waves on the black sea shelf based on the measurement data of the thermoresistor chains cluster. *Physical Oceanography*, **30** (5), 612–631.
31. Pojarkov, S. G. and P. A. Stunzhas, 198: Raznoperiodnaya izmenchivost' gidrologo-gidrohimicheskikh polej ajerobnoj zony Chernogo morya (Multi-period variability of hydrological and hydrochemical fields of the aerobic zone of the Black Sea). *Jekosistemy pelagiali Chernogo morya*. Moscow, Nauka, 20–44.
32. Serebryany, A. N., 2012: Sliko- i suloeobrazujushie yavleniya v more. Vnutrennie volny. (Slick and silt-forming phenomena in the sea. Internal waves). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **9**, 275–286.
33. Serebryany, A. N. and V. A. Ivanov, 2013: Issledovaniya vnutrennikh voln v Chernom more s okeanograficheskoj platformy MGI (Internal waves observations in the Black Sea from the stationary platform of MHI). *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, **657** (3), 34–45.
34. Serebryany, A. N. and E. E. Khimchenko, 2019: Internal waves of mode 2 in the Black Sea. *Doklady Earth Sciences*, **488** (2), 1227–1230, <https://doi.org/10.1134/S1028334X19100180>.
35. Serebryany, A., E. Khimchenko, O. Popov, D. Denisov, and G. Kenigsberger, 2020: Internal waves study on a narrow steep shelf of the black sea using the spatial antenna of line temperature sensors. *J. Mar. Sci. Eng.*, **8** (11), 1–16, <https://doi.org/10.3390/jmse8110833>.
36. Serebryany, A., E. Khimchenko, V. Zamshin, and O. Popov, 2022: Features of the Field of Internal Waves on the Abkhazian Shelf of the Black Sea according to Remote Sensing Data and In Situ Measurements. *J. Mar. Sci. Eng.*, **10** (10), <https://doi.org/10.3390/jmse10101342>.
37. Smith, K. A., G. Rocheleau, M. Merrifield, S. Jaramillo, and G. Pawlak, 2016: Temperature variability caused by internal tides in the coral reef ecosystem of Hanauma Bay, Hawai'i. *Cont. Shelf Res.*, **116**, 1–12.
38. Vlasenko, V. I., N. M. Stashhuk, V. A. Ivanov, A. S. Romanov, and Ju. L. Vnukov, 1999: Issledovanie dinamiki polej kisloroda i serovodoroda v shel'fovoj zone Juzhnogo berega Kryma vo vremja protekaniya pribrezhnogo apvellinga (Study of the dynamics of oxygen and hydrogen sulfide fields in the shelf zone of the Southern Coast of Crimea during coastal upwelling). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kospleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, **1**, 79–90.
39. Walter, R. K., C. B. Woodson, R. S. Arthur, O. B. Fringer, and S. G. Monismith, 2012: Nearshore internal bores and turbulent mixing in southern Monterey Bay. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **117**, 1–13, <https://doi.org/10.1029/2012JC008115>.
40. Walter, R. K., C. B. Woodson, P. R. Leary, and S. G. Monismith, 2014: Connecting wind-driven upwelling and offshore stratification to nearshore internal bores and oxygen variability. *J. Geophys. Res. Ocean*, **119** (1), 7645–7659, <https://doi.org/10.1002/2014JC009998>.

41. Woodson, C. B., 2018: The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, **10**, 421–441, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619>.
42. Zacepin, A. G., D. N. Jolkin, A. O. Korzh, S. B. Kuklev, O. I. Podymov, A. G. Ostrovskii, and D. M. Solov'ev, 2016: O vlijanii izmenchivosti techeniya v glubokovodnoj zone Chernogo morya na dinamiku vod uzokogo severokavkazskogo shel'fa (On the influence of current variability in the deep-water zone of the Black Sea on the dynamics of waters of the narrow North Caucasus shelf). *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*, **3**, 16–25.
43. Zacepin, A. G., A. G. Ostrovskii, V. V. Kremeneckij, S. C. Nizov, V. B. Piotuh, V. A. Solov'ev, D. A. Shvov, A. L. Cibul'skij, S. B. Kuklev, O. N. Kukleva, L. V. Moskalenko, O. I. Podymov, V. I. Baranov, A. A. Kondrashov, A. O. Korzh, A. A. Kubrjakov, D. M. Solov'ev, and S. V. Stanichnyj, 2014: Podsputnikovyj poligon dlja izuchenija gidrofizicheskikh processov v shel'fovo-sklonovoj zone Chernogo morya (Sub-satellite test site for studying hydrophysical processes in the shelf-slope zone of the Black Sea). *Izvestija Rossijskoj Akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, **50**, 16–29, <https://doi.org/10.7868/s0002351513060163>.

Submitted 11.04.2024, accepted 16.07.2024.

**For citation:** Khimchenko, E. E., A. N. Serebryany, O. E. Popov, and V. V. Ocherednik, 2024: Internal waves and their influence on dissolved oxygen variability on the Gelendzhik shelf of the Black Sea in summer time. *Journal of Oceanological Research*, **52** (3), 34–56, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(3\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(3).3).