УДК 551.465

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА И ИМПУЛЬСА НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2024 г. Е. А. Марчук^{*a*,*}, И. П. Чунчузов^{*a*,**}, О.Е. Попов^{*a*}, И. А. Репина^{*a*, *b*}, И. Е. Козлов^{*c*}, К. П. Сильвестрова^{*d*}, А. А. Осадчиев^{*d*, *e*}, Н. Б. Степанова^{*d*, *e*}, У. М. Йоханнессен^{*f*}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017, Россия ^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Научно-исследовательский вычислительный центр, ул. Ленинские Горы 1, стр. 4, Москва, 119234, Россия ^сМорской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Россия ^dИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр-т, 36, Москва, 117997, Россия ^еМосковский физико-технический институт, Институтский пер. 9, Долгопрудный, 141700, Россия ^гНаучное общество Нансена, Берген 5006, Норвегия

> *e-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru **e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com Поступила в редакцию 24.11.2023 г. После доработки 07.05.2024 г. Принята к публикации 10.07.2024 г.

Работа посвящена исследованию характеристик внутренних волн в Карском море и их влиянию на турбулентные потоки импульса и тепла в приводном слое атмосферы. Проведены расчеты направления и горизонтальной скорости распространения короткопериодных внутренних волн в проливе Карские Ворота. Проанализированы кросс-спектры мезомасштабных флуктуаций температуры воды на поверхности моря, на глубинах 10 и 20 м, и метеопараметров (скорости ветра, атмосферного давления, температуры) на высоте 22 м. Выявлены общие спектральные максимумы на периодах, характерных как для захваченных внутренних гравитационных волн, распространяющихся в слое термоклина, так и для атмосферных гравитационных волн в устойчиво-стратифицированном слое нижней тропосферы. Предложен механизм влияния наблюдаемых внутренних гравитационных волн в слое термоклина на мезомасштабные флуктуации метеопараметров с периодами от нескольких минут до нескольких часов, и турбулентные потоки импульса, явного и скрытого тепла в приводном слое атмосферы.

Ключевые слова: внутренние волны, турбулентные потоки, спектральный анализ, механизмы генерации, Карское море

DOI: 10.31857/S0002351524050029 EDN: HYJGCZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Мелкомасштабные процессы в атмосфере и океане с характерными масштабами, малыми по сравнению с размерами численной сетки в глобальных и региональных моделях изменения климата, играют ключевую роль в процессах взаимодействия атмосферы и океана в полярных районах [Vihma et al., 2013; Репина и др., 2019; Ivanov et al., 2019]. Для параметризации в моделях изменения климата влияния этих процессов на обмен теплом, импульсом и влагой между атмосферой и океаном в полярных регионах, необходимо более детальное исследование этих процессов, в частности, взаимодействия атмосферы и океана, в том числе при наличии поверхностных проявлений внутренних волн, которые играют важную роль в динамике арктических морей [Morozov et al., 2019; Fine and Cole, 2022; Chanona and Waterman, 2020].

Основные исследования внутренних волн в арктическом регионе проводятся на основе натурных наблюдений с судов и буйковых станций [Козубская и др. 1999; Сабинин и Серебряный, 2007; Зимин, 2012; Fer et al., 2020]. Спутниковые данные, полученные с помощью радаров с синтезированной апертурой, позволяют более детально изучить характеристики внутренних волн и собрать более полную годовую и межгодовую картину изменчивости их характеристик [Свергун и др., 2018; Kozlov et al., 2015; Kopyshov et al., 2023].

В работе [Morozov et al., 2017] на основе данных буйковых станций производилось моделирование основного потока из Баренцева моря в Карское море. С помощью численного моделирования в [Li et al., 2019] было показано, что образование короткопериодных внутренних волн происходит, главным образом, за счёт взаимодействия полусуточного прилива (с периодом 12.4 часа) с рельефом дна. Этот вывод подтверждается экспериментальными исследованиями [Морозов и др., 2003; Сабинин и Серебряный, 2007; Kozlov et al., 2023]. В качестве зон генерации внутренних волн или так называемых «горячих точек» [Сабинин и Серебряный, 2007] в Карском море выделяют пролив Карские Ворота [Kozlov et al., 2015], районы вдоль восточного побережья арх. Новая Земля [Свергун и др., 2018; Kozlov et al., 2015] и район восточнее мыса Желания [Kozlov et al., 2015].

Рассматриваются и другие возможные источники генерации внутренних волн в Карском море. В частности, внутренние волны могут генерироваться стоковым фронтом [Свергун и др., 2018], который располагается вдоль восточного побережья арх. Новая Земля и может менять своё положение в зависимости от декады на 50–100 км. В этой же работе по данным за 2007 год отмечается, что наиболее часто внутренние волны образуются в летне-осенний период, а наибольшая частота образования наблюдается в августе.

Известным является также предположение о влиянии изменений атмосферного давления, в том числе связанных с атмосферными фронтами, на генерацию внутренних волн в океане [Бондур и др., 2019; Букатов и др., 2021; Лаппо, 1979; Доценко и Миклашевская, 2009; Лаврова и др., 2015; Kozlov et al., 2015]. В [Доценко и Миклашевская, 2009] на примере Чёрного моря моделировалось прохождение над бассейном барического фронта, в результате чего генерировались баротропные и бароклинные колебания жидкости. В [Лаврова и др., 2015] с помощью спутниковых снимков было исследовано формирование внутренних волн вблизи атмосферного фронта в Каспийском море. В [Miropolsky 2001] обсуждается механизм генерации внутренних волн случайными флуктуациями атмосферного давления, который учитывает наличие в пространственно-временном спектре спектральных компонент, резонансным образом возбуждающих внутренние гравитационные волны в океаническом волноводе.

Внутренние волны и почти инерционные волны модулируют сдвиги скорости течения, приводя к определенным временным и пространственным спектрам вариаций этих сдвигов [Pinkel 2008; Rohrs 2023]. Медленная во времени модуляция вертикальных градиентов скорости течения (по сравнению с масштабами изменений турбулентных пульсаций скорости и температуры) приводит к соответствующей модуляции вертикальных турбулентных потоков импульса, а модуляция вертикальных градиентов температуры влияет на вертикальные турбулентные потоки тепла.

В приземном слое атмосферы, в условиях его устойчивой стратификации, наблюдалось влияние внутренних волн на сдвиги скорости ветра (измерялись с помощью содара и метода акустической томографии) и вертикальные турбулентные потоки импульса (измерялись с помощью акустических анемометров и термометров на мачте) [Chunchuzov et al., 2009]. На основании указанных выше результатов наблюдения и моделирования внутренних волн в океане и в приземном слое атмосферы мы предполагаем, что внутренние волны влияют на турбулентные потоки импульса и тепла вблизи поверхности моря.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый к настоящему времени в исследовании характеристик внутренних волн в арктических морях спутниковыми и контактными методами [Лавренов и Морозов, 2002; Свергун и др., 2018; Козубская и др., 1999; Сабинин и Становой, 2002; Зимин, 2012; Морозов и др., 2003; Букатов и др., 2021; Kozlov et al., 2022], влияние внутренних волн на процессы обмена теплом и импульсом между атмосферой и океаном, насколько нам известно, не исследовалось. В настоящей работе такое исследование будет проведено на основе анализа данных контактных измерений температуры воды на разных глубинах Карского моря

(по данным термодатчиков), температуры поверхности моря (по данным ИК-радиометра на борту судна), и стандартных метеорологических измерений, проводившихся на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе» в ходе экспедиции «Плавучий университет» [Kozlov et al., 2023].

В разделе 2 описываются приборы для измерений и ее методика. В разделе 3 методом когерентного анализа временных флуктуаций температуры на глубине 18 м, измеренных одновременно 12 августа (станция 3911) тремя разнесенными горизонтально термокосами (измерительные системы термодатчиков для определения вертикальных профилей температуры), определяются направление и скорость распространения короткопериодных внутренних волн (КВВ) во время дрейфа судна в проливе Карские Ворота 12 августа 2021 г. С целью оценки влияния внутренних волн в Карском море на мезомасштабные флуктуации метеорологических полей вблизи поверхности моря (периоды от нескольких минут до нескольких часов) в разделе 4 анализируются кросс-спектры между флуктуациями метеорологических параметров и флуктуациями температуры на разных глубинах моря. Спектры мезомасштабных вариаций вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса вблизи поверхности Карского моря и возможная связь этих флуктуаций с внутренними волнами в нижней тропосфере будут исследованы в разделе 5.

2. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В августе 2021 года проводилась экспедиция «Плавучий университет ИО РАН — МФТИ» в Карское море на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе». На борту судна был установлен инфракрасный (ИК) радиометр HEITRONICS КТ19 II, точность измерений которого составляла 0.1 °C, а частота измерений 1 Гц. Прибор располагался на пеленгаторной палубе на правом борту судна под углом 30° к поверхности моря. Методика калибровки и расчета поверхностной температуры изложена в [Булатов и др., 2003]. По маршруту движения судна в течение 26 суток были накоплены почти непрерывные данные о температуре поверхности моря (ТПМ) с дискретностью измерений в 1 с. В ИК диапазоне излучательная способность воды близка к единице и мало зависит от состояния поверхности. В то же время влияние атмосферы в ИК-диапазоне значительно и требует корректного его учета [Волков и др., 2004].

Для измерения температурных профилей в верхнем слое моря до глубины 100 м использовались разные системы термодатчиков для измерения профилей температуры, называемые термокосами. Одна из них, TPArctic, является термопрофилемером, разработаннным в Морском гидрофизическом институте РАН. Он имел длину измерительного кабеля 48 м (32 непрерывных измерительных участка длиной по 1.5 м), включал в себя также силовой/коммуникационный кабель длиной 100 м и два датчика давления на нижнем и верхнем участках линии [Gaisky and Kozlov, 2023]. Измерение температуры воды проводилось с точностью 0.1 °C с интервалом по глубине в 1.5 м и частотой дискретизации 1 Гц.

Две другие термокосы состояли из цепочек термодатчиков (6-10 термисторов производства Starmon StarOddi, Гардабаер, Исландия) для измерения температуры и датчиков давления (DST centi TD), предназначенных для определения глубины термодатчиков и линейной коррекции отклонения термокос от вертикального положения [Silvestrova et al., 2023]. Точность приборов, измерявших температуру с шагом по времени в 1 с, составляла ±0.025 °С. В периоды измерений использовались либо две отдельные термокосы с 10-11 датчиками, размещенными в районе носовой лебедки и шкафута, либо данные термокосы TPArctic длиной 48 м и 32-мя измерительными участками. В среднем длительность измерений варьировалась от 30 до 40 мин, а максимальная длительность достигала 2 ч.

Для измерения метеопараметров (скорости ветра, атмосферного давления, влажности и температуры воздуха) использовалась судовая метеостанция AIRMAR 220 ws, расположенная на пеленгаторной палубе. С ее помощью измерения температуры воздуха проводились с шагом в 1 с в диапазоне от -40 до 80 °C с точностью ± 1.1 °C при 20 °C и разрешением в 0.1 °C. Диапазон измерения скорости ветра составлял от 0 до 40 м/с с разрешением в 0.1 м/с, а его направления — от 0° до 360° с разрешением в 0.1°. Атмосферное давление измерялось метеостанцией в диапазоне от 300 до 1100 гПа с точностью ± 0.5 гПа при 25 °C (и выше) и с разрешением в 1 гПа.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И СКОРОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН, НАБЛЮДАВШИХСЯ ВО ВРЕМЯ ДРЕЙФА СУДНА 12.08.2021 (СТАНЦИЯ 3911).

Подробный анализ вариаций температуры на разных глубинах (до 50 м), измеренных с помощью термокос, расположенных в разных частях пролива Карские Ворота, был проведен в [Kozlov et al. 2023]. С помощью трех термокос, составляющих треугольник, были выявлены вертикальные колебания термоклина до глубины 40 м, вызванные распространением короткопериодных нелинейных внутренних волн, генерируемых при обтекании сложного рельефа пролива меняющимся во времени (с основным периодом, вызванным приливом) устойчиво-стратифицированным потоком. Наиболее интенсивные волны регистрировались во время ослабления прилива.

Полученные колебания изотерм (см. рис. 7 в [Kozlov et al. 2023]) происходили практически синфазно в приповерхностном морском слое до глубин 30–40 м. Это свидетельствовало о том, что в устойчиво-стратифицированном слое термоклина распространялись горизонтально низшие (по номеру) моды внутренних гравитационных волн [Miropolsky 2001]. Поэтому, для определения скорости и направления распространения почти синфазных колебаний до глубины 30 м достаточно было выбрать один горизонт глубин, например 18 м, но в трех разнесенных по горизонтали точках.

Во время дрейфа судна 12.08.2021 на станции 3911 проводились измерения температуры воды на разных глубинах с помощью 3-х термокос, расположенных на носу корабля (термокоса 1), корме правого борта (термокоса 2) и левом борту (термокоса 3) [Silvestrova et al., 2023; Kozlov et al., 2023]. Горизонтальное расстояние между соседними термокосами составляло 51, 24 и 40 м.

Записи температуры на термодатчиках кос 1, 2 и 3, расположенных на глубине 18 м, показаны на рис. 1а, а взаимные функции когерентности флуктуаций температуры между парами датчиков 1-2 и 1-3 показаны на рис. 16 и рис. 1в, соответственно. Время одновременной работы всех трех кос составило всего 22 мин, что было вызвано сбоем в измерении двумя из трех термокос после 22 мин. Высокие уровни когерентности наблюдались в сравнительно узких частотных полосах во всем рассматриваемом диапазоне периодов от 10 до 160 с. Когерентность достигала максимальных значений в диапазоне периодов 40–160 с в определенные промежутки времени: 600–700 с — для пары 1–2, и 850–950 с — для пары 1–3.

Для дальнейшей обработки записей флуктуаций температуры проводилась их фильтрация в лиапазоне периодов 40–160 с. где парные функции когерентности максимальны (рис. 1а). Затем с помощью кросс-корреляции этих флуктуаций при длине скользящего окна анализа Хэмминга длительностью 834 с, проводилось измерение разностей времени приходов волн (задержек) для трех пар термодатчиков. По задержкам, в рамках модели плоской волны, вычислялись направления распространения и горизонтальные фазовые (кажущиеся) скорости распространения внутренних волн. Для обнаружения именно волновых процессов использовался тот факт, что если через датчики проходит плоский волновой фронт, то сумма разностей времен прихода этого фронта между датчиками 1-2, 2-3 и 3-1 должна быть близка к нулю. В общих чертах похожее обнаружение волновых сигналов на фоне шумов применяется в методе PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation), широко используемом для обнаружения источников инфразвука в атмосфере и сейсмике [Le Pichon, Cansi 2003]. Примененный метод использовался также и для определения параметров внутренних волн в океане [Serebryany et al., 2020].

На рис. 2а показаны колебания температуры, отфильтрованные в диапазоне периодов 40— 160 с, а на рис. 26 и рис. 2в — обратный азимут (угол между направлением от приемника к источнику волн и направлением оси судна от кормы к носу) и горизонтальная фазовая скорость волн в зависимости от времени, соответственно. Эти параметры слабо меняются в промежутке времени от 400 до 700 с и равны примерно 108° и 0.15 м/с соответственно.

Направление и скорость дрейфа судна в течение промежутка времени 400—700 с, когда были определены направление и скорость распространения волн на рис. 26 и рис. 2в (т.е. в течение 300 с) показаны на рис. 3а и рис. 3б, соответственно. Схематически на рис. 3в показаны также: направление оси судна от кормы к носу, направление его дрейфа со скоростью \vec{V}_{dp} с азимутом примерно 36⁰ в промежутке времени от 400 до 500 с, и горизонтальной фазовой скорости волн \vec{C} относительно дрейфующего судна, распространяющейся с северо-востока на юго-запад с азимутом примерно в 234°.

Учитывая, что зависимость фазовой скорости волн С от частоты очень слабая как в интервале периодов 40–160 с, так и на более коротких периодах 20–40 с, дисперсией волн можно пренебречь и считать групповую скорость близкой к фазовой скорости С. Тогда групповая скорость волн относительно неподвижной Земли $\vec{C}_{ep} = \vec{C} + \vec{V}_{dp}$ и при C = 0.15 м/с и V_{dp} = 0.6 м/с будет равна 0.46 м/с и направлена на C-B под углом 30°, как показано на рис. 3в.

Следует заметить, что дрейф судна происходил при средней скорости ветра 5–6 м/с и среднеквадратических значениях его флуктуаций порядка



Рис. 1. Измеренная 12 августа 2021 г. температура на глубине 18 м на трех термокосах (станция 3911) (а) и взаимные функции когерентности флуктуаций температуры, полученные для пар датчиков кос 1 и 2 (б), и 1 и 3 (в). Время по горизонтальной оси отсчитывается с момента 12:29 UTC. Длина записи около 22 мин с частотой выборки 1 Гц. Интервал расчета когерентности составлял 600 с со скользящим окном 150 с и шагом сдвига в 10 с.

1 м/с. При этом, поверхностное волнение моря и качка судна вызывали перемещения термодатчиков относительно термоклина. Из-за качки происходили периодические вертикальные смешения датчиков порядка 0.5-1 метра с периодами в несколько секунд. Однако, анализируемые нами флуктуации температуры и их спектры (см. ниже) имели значительно более длинные периоды, от 40 секунд до часа. С ростом периода амплитуда спектра температурных колебаний растет, а соответствующие этим колебаниям вертикальные смещения изотерм, составляли десятки метров (т.е. были значительно выше, чем смещения датчиков при короткопериодной качке), поэтому влиянием качки на столь длиннопериодную часть спектра можно пренебречь.

Источником сильно нелинейных внутренних волн, наблюдавшихся 12 августа 2021 г., были приливные устойчиво-стратифицированные течения, обтекающие сложный рельеф дна в проливе Карские Ворота [Kozlov et al., 2023]. Пакеты внутренних волн, зарегистрированные на станциях 3911, 3913 и 3915, содержали почти уединенные сильно-нелинейные внутренние волны (солитоны). Они распространялись на С-В, но уже с более высокой скоростью (0.8–0.9 м/с) по сравнению с приведенной выше нашей оценкой скорости высокочастотных компонент волнового пакета.

Выше мы обнаружили с помощью когерентного анализа короткого временного интервала (длительностью ~22 мин) вариаций температу-



Рис. 2. Колебания температуры, измеренные на глубине 18 м с помощью трех термокос, обозначенных 1, 2 и 3, и отфильтрованные в диапазоне периодов 40–160 с (а) обратный азимут распространения относительно оси судна корма-нос (б) и горизонтальные фазовые скорости внутренних волн (в) относительно судна. Время отсчитывается относительно момента 12:29 UTC.



ры в 3-х точках наличие в волновых пакетах очень коротких волн с периодами 40–160 с, лежащими ниже минимального периода Брента—Вяйсяля (БВ) (около 3,5 мин) в слое термоклина. Приведенный на рис. 6 из [Kozlov et al., 2023] вертикальный профиль частоты N(z) на станции 3911 имел максимум на глубине 8–10 м и составлял примерно 17 циклов/ч, а соответствующий минимальный период БВ — около 3,5 мин. Горизонтальная скорость распространения коротких волн составляла 0,45 м/с с направлением распространения на С-В. Столь короткие внутренние волны с частотами, лежащими выше частоты БВ ($\omega > N$), являются высокочастотными гармониками внутренних волн,

имеющих частоты ниже частоты БВ, и генерируются в результате нелинейных нерезонансных взаимодействий этих волн [Chunchuzov, Kulichkov, 2020]. Взаимодействие внутренних волн вызвано адвекцией этих волн переменным течением, индуцируемым суммарным полем внутренних волн. Оно приводит к генерации высокочастотных гармоник с частотами $\omega > N$, спектральная плотность которых убывает с ростом частоты ω , как ω^{-3} [Chunchuzov Kulichkov, Sec.4., 2020]. Наличие такого крутого участка ($\sim \omega^{-3}$) в экспериментальном частотном спектре при $\omega > N$ отмечалось в работе [Sandven, Johannessen, 1987].

судна равна 0.15 м/с, а азимут равен 234⁰. Показана также групповая скорость Сг относительно непод-

вижной Земли.

4. КРОСС-СПЕКТРЫ МЕЖДУ ФЛУКТУАЦИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ (ТЕРМОКОСА), ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ (ТПМ) И ФЛУКТУАЦИЯМИ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В предыдущем разделе были получены характеристики (скорости и направления распространения) короткопериодных внутренних волн в течение короткого промежутка времени 12.08.2021 г., когда одновременно на корабле проводились измерения тремя термокосами. Эти волны являлись лишь короткопериодными составляющими всего волнового пакета нелинейных внутренних волн, наблюдавшегося 12.08.2021 г. в проливе Карские Ворота [Kozlov et al. 2023]. Наряду с основным источником этих волн, связанным с обтеканием стратифицированными приливными течениями топографии дна пролива Карские Ворота, в генерацию внутренних волн в океане вносят также флуктуации атмосферного давления и скорости ветра [Miropolsky 2001, Chapter 6].

Чтобы выявить возможное обратное влияние наблюдаемых внутренних волн в Карском море на мезомасштабные флуктуации метеорологических полей вблизи поверхности моря (периоды от нескольких минут до нескольких часов) и вертикальные турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность моря, в этом разделе нами будут проанализированы данные измерений флуктуаций метеорологических параметров: атмосферного давления, влажности, скорости ветра и температуры воздуха. Измерение флуктуаций атмосферного давления, скорости ветра и температуры воздуха проводилось с помощью мобильной метеостанции AIRMAR 220, расположенной на высоте примерно 22 м над уровнем моря, с шагом измерений в 1 с. Основные характеристики измерительной аппаратуры этой метеостанции приведены в разделе 2.

На рис. 4 показаны измеренные 12.08.2021 в течение 1.9 ч от момента времени 11:00 UTC вариации температуры морской воды на глубинах 10 и 20 м с помощью термокос на станции 3911 (дискретность измерений — 1 с) и температуры поверхности моря (ТПМ) с помощью ИК-радиометра одновременно с вариациями температуры воздуха, атмосферного давления, влажности, скорости и направления ветра. Взаимные амплитудные кросс-спектры между этими флуктуациями (кроме влажности) показаны на рис. 5.

На взаимных кросс-спектрах (рис. 5а) между флуктуациями температуры воды на глубине 10 м (T_{10M}) и флуктуациями атмосферного давления (P), температуры T_{10M} и скорости ветра (V), температуры T_{10M} и температуры поверхности моря $T_{\mu\kappa}$, температуры T_{10M} и температуры воздуха (T_{B03R}), полученных для реализаций флуктуаций длиной в 1.9 ч, обнаруживаются общие спектральные максимумы на периодах, близких к 4 мин, 10 мин, 18 мин и 35 мин (указаны вертикальными стрелками). Почти такие же периоды характерны и для максимумов кросс-спектров между флуктуациями температуры воды на глубине 20 м (T_{20M}) и флуктуациями метеопараметров (рис. 56), а также между флуктуациями температуры воды на глубинах 10 м (T_{10M}) и 20 м (T_{20M}) (пунктирная линия).

Для периода проведения измерений 12.08.2021 вертикальные профили температуры, солености и частоты БВ показаны на рис. 6. Анализ профиля частоты БВ N(z), приведенного в [Kozlov et al., 2023], показывает, что в слое до глубины 20 м частота $N(z)/(2\pi)$ в ее вертикальном профиле достигает максимума на глубине 8-10 м и составляет примерно 17 циклов/ч, а соответствующий минимальный период БВ — около 3,5 мин. С ростом глубины до 20 м, частота $N(z)/(2\pi)$ падает до ее минимального значения 4-5 циклов/ч, что соответсветствует максимальному периоду БВ в 12-15 мин. Наоборот, при уменьшении глубины до глубины верхнего тонкого перемешанного слоя, стратификация внутри этого слоя становится почти нейтральной ($N^2(z) = 0$).

В устойчиво-стратифицированном слое до глубины 25 м возможно волноводное распространение высокочастотных линейных внутренних гравитационных мод с периодами, лежащими между 12 мин (максимальный период БВ в слое) и 3.5 мин (минимальный период БВ в слое). Ниже 25 м в профиле N(z) наблюдается второй максимум порядка 12 циклов/ч (период 5 мин) на глубине около 33 м, а на глубине 47 м достигается минимум около 4 циклов/ч (период 15 мин). Поэтому, слой 25-47 м тоже может захватывать высокочастотные волны с периодами между 5 мин и 15 мин. Волны же с периодами более 15 мин захватываются всем устойчиво-стратифицированным слоем до глубины примерно 50 м, ниже которой топография дна возмущает стратифицированные приливные течения.



Рис. 4. Измеренные 12.08.2021 г. в течение 1.9 ч от момента времени 11:00 UTC флуктуации температуры морской воды на глубине 10 и 20 м, температуры поверхности моря по данным ИК-радиометра, атмосферного давления, скорости ветра, влажности и температуры воздуха на высоте примерно 22 м над уровнем моря.



Рис. 5. Взаимные амплитудные кросс-спектры между флуктуациями температуры воды на глубине 10 м (T_{10}) и атмосферного давления (P), температуры T_{10} и скорости ветра (V), температуры T_{10} и температуры поверхности океана ($T_{\mu\kappa}$), температуры T_{10} и температуры воздуха ($T_{возд}$), и средний кросс-спектр для указанных выше 4-х кросс-спектров (жирная черная кривая) (a); Те же кросс-спектры, что и на рис. 5а, только для температуры воды на глубине 20 м. Показан также кросс-спектр между флуктуациями температуры воды на глубинах 10 и 20 м (пунктир).



Рис. 6. Вертикальные профили температуры, солености и частоты Брента—Вяйсяля в период проведения измерений 12 августа 2021 г. на станции 3911.

Периоды колебаний изотерм в 4 мин и 10 мин, которым соответствуют спектральные максимумы на рис. 5, входят в диапазон периодов 3.5-15 мин захваченных высокочастотных внутренних волн в слое до глубины 50 м. Короткопериодные нелинейные внутренние волны наблюдались 12 августа 2021 г. в [Kozlov et al. 2023]. В частности, высокочастотные осцилляции изотерм с частотами 11-12 циклов/ч (периоды 5-5.5 мин) и периодами 10 мин, 15 мин наблюдались на разнесенных друг от друга термокосах. Обнаруживались также и более низкочастотные осцилляции изотерм с периодами около 30 мин. По временному запаздыванию прихода этих осцилляций на разные термокосы были оценены их горизонтальные скорости и направления распространения относительно дрейфующего судна и в неподвижной системе координат. Эти скорости (~0.8-0.9 м/с) и указанные выше периоды осцилляций изотерм были вызваны наблюдаемыми нелинейными короткопериодными волнами [Kozlov et al. 2023]. Они типичны также и для внутренних волн, распространяющихся в слое термоклина [Sandven, Johannessen, 1987; Brekhovskikh, Goncharov, 1997; Свергун и др., 2020].

Из наличия общих периодов в кросс-спектрах между флуктуациями температуры воды на разных глубинах и флуктуаций различных метеопараметров на высоте 22 м мы предполагаем, что внутренние волны, распространявшиеся в слое термоклина, генерировали на этих же периодах определенные спектральные компоненты флуктуаций атмосферного давления, скорости ветра и температуры в приповерхностном слое атмосферы. Такая генерация обусловлена тем, что вызванные внутренними волнами в слое термоклина вертикальные смешения частиц среды вызывают флуктуации атмосферного давления вблизи поверхности раздела вода-воздух. Связь вертикальной скорости $w(\vec{x}, z, t)$ в поле внутренних волн малой амплитуды, распространяющихся в устойчиво-стратифицированном слое океана, где $\vec{x} = (x, y)$ — горизонтальные координаты, а *z*-вертикальная координата, и флуктуаций атмосферного давления $p_a(\vec{x},t)$ вблизи невозмущенной поверхности океана z = 0 осуществляется через граничное условие при z = 0 [Miropolsky, 2001, Chapter 6]:

$$\rho(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\frac{\partial w}{\partial z} + f^2\frac{\partial w}{\partial z} - g\Delta_{\perp}w)_{z=0} = \frac{\partial\Delta_{\perp}p_a}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — Лапласиан в горизонтальной плоскости, *f* — параметр Кориолиса, *g* – ускорение силы тяжести.

Поле отдельной гравитационной моды в слое термоклина, распространяющейся горизонтально, можно представить в виде $w = W_0(z) \exp(-i\omega t + \vec{k}\vec{x})$, где ω и \vec{k} — соответственно, частота и горизонтальный волновой вектор моды, связанные дисперсионным соотношением, а $W_0(z)$ — амплитуда моды, зависимость которой от глубины z определяется видом профиля N(z) частоты БВ.

В широком частотно-волновом Фурье — спектре флуктуаций атмосферного давления $p_a(\vec{x},t)$ можно выделить спектральную компоненту $P_a(\omega,k)\exp(-i\omega t + \vec{k}\vec{x})$ с амплитудой $|P_a(\omega,k)|$, связанную граничным условием (1) с амплитудой скорости $W_0(z)$ в волноводной моде. Если ча-

стота ω и волновое число \vec{k} этой спектральной компоненты флуктуаций $p_a(\vec{x},t)$ близки, соответственно, к частоте ω и волновому числу k гравитационной моды в океаническом волноводе, то возникают условия для резонансного взаимодействия этой моды с указанной выше спектральной компонентой флуктуаций атмосферного давления [Miropolsky, 2001]. Такая резонансная связь возможна благодаря тому, что существенный вклад в частотно-волновой спектр флуктуаций атмосферного давления и скорости ветра вносят атмосферные гравитационные волны, в частности, высокочастотные внутренние волны, распространяющиеся горизонтально в нижнем устойчиво-стратифицированном атмосферном пограничном слое (AПC) [Chunchuzov et al., 2009]. В таком слое температурная инверсия образует волноводный канал для высокочастотных гравитационных волн с типичными периодами в диапазоне от 3 мин до 11 мин, который практически совпадает с диапазоном периодов высокочастотных внутренних волн в слое термоклина. Горизонтальные фазовые скорости атмосферных гравитационных мод низших порядков низки, составляя 2-2,5 м/с, и уменьшаются с ростом номеров этих мод так, что эти скорости для мод достаточно высоких номеров становятся близки к скоростям внутренних волн, распространяющимся в слое термоклина. Это говорит о возможности выполнения резонансных условий (совпадение частот и горизонтальных фазовых скоростей) для столь медленных высокочастотных атмосферных гравитационных волн в устойчиво-стратифицированном АПС над морем и внутренних волн в слое термоклина.

5. АНАЛИЗ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВАРИАЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛА И ИМПУЛЬСА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Внутренние волны в атмосфере и океане вызывают мезомасштабные вариации вертикальных градиентов полей скорости и температуры в этих средах, приводящие к соответствующим вариациям интенсивности турбулентных пульсаций скорости и температуры [Finnigan et al., 1984], а также вертикальных турбулентных потоков импульса и тепла вблизи поверхности океана. Вычисление турбулентных потоков явного (Q_1) и скрытого тепла (Q_H) через поверхность

моря, а также потока импульса и динамической скорости u^* , проводилось по методике, использующих основные положения теории подобия Монина—Обухова [Репина, 2007; Тимачев и др., 2008]. Эти потоки, определяемые по ковариации вертикальной скорости с соответствующими метеовеличинами, измерявшимися с шагом в 1 с, усреднялись по скользящему промежутку времени в 10 мин, что позволяло изучать мезомасштабные временные вариации турбулентных потоков с периодами от десятков, минут до нескольких часов. Использовался расчётный метод определения потоков COARE [Fairall et al., 2003].

До настоящего раздела нами были представлены результаты спектрального анализа данных измерений только за 12.08.2021 г. Короткопериодные внутренние волны в слое термоклина наблюдались и в другие дни, в частности, 23.08.2021 г. и 24.08.2021 г. Для этих дней мы проанализировали не только вариации метеопараметров, как для 12.08.2021 г., но и изучили также их связь с временными вариациями турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы.

На рис. 7 показаны полученные 23.08.2021 г. в течение 14 часов мезомасштабные вариации турбулентных потоков явного (Q_H) и скрытого тепла (Q_L), динамической скорости u^* , а также осредненные за 10 мин горизонтальная скорость ветра V, температура воздуха (temp), разность температур моря и воздуха (delta) и атмосферное давление (P), полученные по данным метеостанции. Эти вариации получены относительно движущегося судна со средней скоростью в этот день примерно в 1.5 узла или 0.8 м/с.

Мезомасштабные вариации u^* , как видно из рис. 7 (2-я и 3-я панели сверху), хорошо следуют вариациям скорости ветра на высоте 22 м над уровнем моря, следовательно, и вариациям вертикального градиента скорости ветра в приводном слое атмосферы. Из рис. 7 видна также зависимость турбулентных потоков тепла (1-я панель сверху) от разности температур моря и воздуха (delta) (4-я панель сверху).

Аналогичное влияние мезомасштабных вариаций вертикального сдвига скорости ветра и разности температур (delta) на динамическую скорость u^* и вертикальные турбулентные потоки тепла, соответственно, наблюдалось также и 24.08.2021 г. (рис. 8). Основные периоды этих

мезомасштабных вариаций были определены из временных спектров вариаций динамической скорости и* и турбулентных потоков тепла Q₁, полученных 23.08.2021 г. (рис. 9, слева) и 24.08.2021 г. (рис. 9, справа) в ночной промежуток времени с 00:00 до 06:00 UTC.

В спектрах имеются спектральные пики на общих периодах 20 мин, 25 мин, 35 мин, 1 ч, 3 ч и 4,7 ч, на которых происходит основной вклад колебаний сдвигов скорости ветра и разности температур delta во временные вариации вертикальных турбулентных потоков импульса и тепла, соответственно. Такой дискретный набор периодов колебаний метеопараметров наблюдался ранее в атмосфере при прохождении через измерительную сеть волновых пакетов атмосферных гравитационных волн, генерируемых на разных частотах регулярными и нерегулярными источниками в атмосфере, такими как солнечный терминатор [Чунчузов и др., 2021], собственные колебания Земли [Shved et al., 2000], метеофронты, струйные течения, неустойчивые сдвиги скорости ветра и др. [Gossard, Hooke, 1975] вместе с многочисленными комбинационными гармониками (с суммарными и раз-



Рис. 7. Мезомасштабные вариации в течение 14 ч 23.08.2021 турбулентных потоков явного (Q_H) и скрытого тепла (Q_L), скорости турбулентного трения u^* , а также осредненные за 10 мин: горизонтальная скорость V, температура воздуха (temp), разность температур океана и воздуха (delta) и атмосферное давление (P).

ностными частотами) этих волн, генерируемых в результате их нелинейных взаимодействий.

На основании указанных выше результатов наблюдения и моделирования влияния внутренних волн на сдвиги скорости течения в океане [Pinkel 2008; Rohrs 2023] и сдвиги скорости ветра в приземном слое атмосфере [Chunchuzov et al. 2009] мы предполагаем, что внутренние волны разных периодов оказывали влияние на турбулентные потоки импульса и тепла вблизи поверхности Карского моря.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ данных контактных измерений температуры морской воды на разных глубинах Карского моря (по данным трех термокос), температуры поверхности моря (с помощью ИК-радиометра) и метеопараметров над поверхностью моря, полученных во время экспедиции в Карское море на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе» в августе 2021 г.

Методом когерентного анализа временных флуктуаций температуры морской воды на глу-



Рис. 8. Мезомасштабные вариации тех же параметров, что и на рис. 7, но полученных за 24 августа 2021 г.

бине 18 м, измеренных одновременно 12.08.2021 г. (станция 3911) тремя разнесенными горизонтально термодатчиками (см. рис. 6) в течение короткого промежутка времени в 22 мин, определены направление и горизонтальная фазовая скорость распространения КВВ относительно дрейфующего судна в диапазоне периодов 40-160 с. Скорости распространения этих волн относительно судна составляли 0.14-0.16 м/с, а относительно неподвижной Земли (с учетом дрейфа судна) волны распространялись на С-В с групповой скоростью примерно 0.46 м/с. Это направление КВВ близко к направлению распространения (на С-В) уединенных нелинейных внутренних волн (солитонов), наблюдавшихся 12 августа в проливе Карские Ворота [Kozlov et al., 2023] и распространявшихся со скоростью 0.8-0.9 м/с, что говорит о том, что высокочастотные внутренние волны и солитон являлись разными составляющими единого волнового пакета. Основным источником генерации этого волнового пакета были приливные устойчиво-стратифицированные течения, обтекающие рельеф дна в проливе Карские Ворота [Kozlov et al., 2023].

Путем анализа кросс-спектров мезомасштабных флуктуаций температуры поверхности моря с помощью ИК-радиометра, на глубинах 10 и 20 м с помощью термокос и метеопараметров на высоте 22 м было изучено влияние наблюдаемых внутренних волн в Карском море на мезомасштабные (периоды от нескольких минут до нескольких часов) флуктуации метеорологических полей вблизи поверхности моря и вертикальные турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность моря в приводный слой атмосферы.

В кросс-спектрах флуктуаций обнаружены общие спектральные максимумы на периодах, лежащих между минимальным периодом БВ (~3.5 мин) и максимальным периодом БВ (15 мин) в морском



Рис. 9. Временные спектры вариаций динамической скорости u^* и турбулентных потоков тепла Q_L , полученных 23 августа (слева) и 24 августа (справа) 2021 г. с 00:00 до 06:00 UTC.

слое до глубины 25 м. Эти периоды типичны для захваченных внутренних гравитационных волн, распространяющихся как в слое океанического термоклина, так и для атмосферных гравитационных мод в устойчиво-стратифицированном слое нижней тропосферы. В случае, когда в пространственно-временном спектре пульсаций атмосферного давления имеется набор частот и волновых чисел, удовлетворяющих дисперсионным соотношениям захваченных внутренних гравитационных мод в слое термоклина, возникает резонансная связь этих мод с выделенными пульсациями атмосферного давления. Такая резонансная связь, возникающая при совпадении собственных частот и горизонтальных волновых чисел (или горизонтальных фазовых скоростей) волноводных мод в океане и атмосфере объясняет наличие общих спектральных максимумов в кросс-спектрах между флуктуациями температуры воды на разных глубинах, на поверхности моря и метеорологических параметров атмосферы. Однако, предложенный здесь механизм взаимного влияния полей атмосферных и океанических гравитационных мод требует дальнейшего теоретического изучения и экспериментального обоснования.

Было также исследовано влияние мезомасштабных вариаций скорости ветра на высоте 22 м над уровнем моря и разности температур поверхности воды и воздуха (delta) (с периодами от 10 минут до нескольких часов) на вариации турбулентных потоков импульса, явного (Q_н) и скрытого тепла (Q₁) вблизи поверхности моря. На основе полученных временных спектров вариаций турбулентных потоков показано, что основное влияние на эти вариации оказывает дискретный набор колебаний разности температур (delta) и скорости ветра с определенным дискретным набором периодов (20 мин, 25 мин, 35 мин, 1ч, 3 ч и 4.7 ч) относительно судна. Эти периоды типичны для атмосферных гравитационных волн разных масштабов, распространяющихся в устойчиво-стратифицированном нижнем слое тропосферы и модулирующих на указанных периодах вертикальные градиенты температуры и скорости ветра, а также турбулентные потоки тепла и импульса.

Данная работа была частично поддержана грантом Российского научного фонда (РНФ) №21-17-00021 (Разделы 4 и 5) и частично Научным обществом Нансена (Раздел 1), а также частично выполнялась в рамках темы государственных заданий № FMWE-2024-0016 и № FNNN-2024-0017 (Разделы 3 и 4). Экспедиционные исследования проведены при поддержке научно-образовательной программы «Плавучий университет ИО РАН-МФТИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волков Ю.А., Кузьмин А.В., Репина И.А., Трохимовский Ю.Г. Радиометрические исследования температурного режима поверхности воды в лабораторных условиях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. № 1. С. 33–52.
- Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В., Тарасов Л.Л., Химченко Е.Е. Интенсивные внутренние волны аномальной высоты на шельфе Чёрного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 114–127.
- Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // Мор. гидрофиз. журн. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658.
- Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне. М.: КДУ, 2003. 136 с.
- Григоркина Р.Г., Губер П.К., Фукс В.Р. Прикладные методы корреляционного и спектрального анализа крупномасштабных океанологических процессов, Л.: Изд. ЛГУ, 1973. 172 с.
- Доценко С.Ф., Миклашевская Н.А. Генерация поверхностных и внутренних волн в ограниченном бассейне перемещающимся барическим фронтом // Мор. гидрофиз. журн. 2009. № 3. С. 3–18.
- Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 16–25.
- Козубская Г.И., Коняев К.В., Плюдеман А., Сабинин К.Д. Внутренние волны на склоне желоба острова Медвежий по данным эксперимента Полярный фронт Баренцева моря (BSPF#92) // Океанология. 1999. Т. 39. № 2. С. 165–173.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
- *Лаппо С.С.* Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: Наука. 1979. 181 с

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

том 60 № 5 2024

- Марчук Е.А., Репина И.А., Козлов И.Е., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. Анализ температуры поверхности Карского моря на основе спутниковых данных и данных экспедиции «Плавучий университет-2021» // материалы VII Международной научнопрактической конференции. 15—19 мая 2023 г., Сб. Научн. тр. Майкоп, 2023 г. Ч. 2. стр. 63—65.
- *Морозов Е.Г., Нейман В.Г., Щербинин А.Д.* Внутренний прилив в проливе Карские Ворота // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 5. С. 688–690.
- Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеоиздат. 2002. 360 с.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Хавина Е.М. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летнеосенний период // Росс. Арктика. 2019. № 7. С. 49-61.
- *Репина И.А.* Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. — М.: ИКИ РАН, 2007. 36 с.
- Сабинин К.Д., Становой В.В. Интенсивные полусуточные внутренние волны в Карском море // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях /Под ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 265–279.
- Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // Акустич. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 410–436.
- Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Зубкова Е.В., Козлов И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за тёплый период 2007 года // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2018. Т. 15. №4. С. 181–188.
- Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Жегулин Г.В., Романенков Д.А., Коник А.А., Козлов И.Е. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря по данным контактных и спутниковых наблюдений // Фунд. и приклад. гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 78–86.
- *Тимачев В.Ф., Иванов Б.В., Репина И.А.* Теплообмен между атмосферой и ледовым покровом // Труды ААНИИ. 2008. Т. 447. С. 140–155.
- Чунчузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Перепёлкин В.Г., Зайцева Д.В., Сомсиков В.М. Волновые возмущения атмосферного давления и скорости ветра в тропосфере, связанные с солнечным терминатором // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2021. Т. 57. № 6. С. 1–15.
- *Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V.* Mechanics of Continua and Wave Dynamics // 1994. Springer, 1994. 342 pp.

- *Chanona M., Waterman S.* Temporal variability of internal wave-driven mixing in two distinct regions of the Arctic Ocean // J. of Geophys. Res.: Oceans. 2020. V. 125. №. 10. P. 1–23.
- *Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N., Perepelkin V., Ziemann A., Arnold K., Kniffka A.* Mesoscale variations in acoustic signals induced by atmospheric gravity waves // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125. № 2. P. 651–663.
- *Chunchuzov I.P.* and *Kulichkov S.N.* Infrasound propagation in an anisotropic fluctuating atmosphere // UK: Cambridge Scholar Publishing, 2020. 356 pp.
- *Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J. E., Grachev A.A.* and *Edson J.B.* Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. № 4. P. 571–591.
- Fer I., Koenig Z., Kozlov I.E., Ostrowski M., Rippeth T.P., & Padman L., et al. Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins // Geophys. Res. Letters. 2020. V. 47. № 16. e2020GL088083.
- *Fine E.C., Cole S.T.* Decadal observations of internal wave energy, shear, and mixing in the western Arctic Ocean // J. of Geophys. Res.: Oceans. 2022. V. 127. № 5. e2021JC018056.
- Finnigan J.J., Einaudi F. and Fua D. The Interaction between an Internal Gravity Wave and Turbulence in the Stably-Stratified Nocturnal Boundary Layer // J. Atmos. Sci., 1984. V. 41. № 16. P. 2409–2436.
- *Gaisky P.V.* and *Kozlov I.E.* Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. 2023. V. 1. P. 137–145.
- *Harms I.H.* and *Karcher M.J.* «Modeling the seasonal variability of the hydrography and circulation in the Kara Sea» // J. Geophys. Res.: Oceans., 1999. V. 104. № 6. P. 13431–13448.
- *Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E.* Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean—Air Heat Exchange in the Late Summer // Atmos., 2019. V. 10. №. 4. P. 184.
- *Kozlov I., Kudryavtsev V.N., Zubkova E.V., Zimin A.V.* and *Chapron B.* Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. V. 51, P. 1073–1087.
- Kozlov I.E., Kopyshov I.O., Frey D.I., Morozov E.G., Medvedev I.P., Shiryborova A.I., Silvestrova K.P., Gavrikov A.V., Ezhova E., Soloviev D.M., Plotnikov E.V., Zhuk V.R., Gaisky P.V., Osadchiev A.A., Stepanova N.B. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // Rem. Sens., 2023. V. 15. № 24. P. 5769.
- Kozlov I.E., Atadzhanova O.A., Zimin A.V. Internal solitary waves in the White Sea: hot-spots, structure, and kine-

matics from multi-sensor observations // Rem. Sens. 2022. V. 14. № 19. P. 4948.

- Kopyshov I.O., Kozlov I.E., Shiryborova A.I., Myslenkov S.A. Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // Russian Journal of Earth Sciences, 2023. V. 23. № 5. P. ES0210.
- Leonov A.I., Miropolsky Yu. Z. Resonant excitation of internal gravity waves in the ocean by atmospheric pressure fluctuations// Izv. Atmos. and Ocean Phys. 1973. V. 9. № 8. P. 480–485.
- *Le Pichon A.* and *Cansi Y.* PMCC for Infrasound Data Processing. // InfraMatics. 2003. V. 2. P. 1–9.
- Li Q., Wu H., Yang H., Zhang Z. A numerical simulation of the generation and evolution of nonlinear internal waves across the Kara Strait // Acta Ocean. Sinica. 2019. V. 38. № 5. P. 1–9.
- McClimans T.A., Johnson D.R., Krosshavn M., King S.E., Carroll J., Grenness O. Transport processes in the Kara Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № 6. P. 14121– 14139.
- *Miropolsky Yu. Z.* Dynamics of the Internal Gravity Waves in the Ocean. Boston: Kluwer Academic Publishers. 2001. 752 P.
- *Morozov E.G., Kozlov I.E., Shchuka S.A., Frey D.I.* Internal tide in the Kara Gates Strait // Oceanology. 2017. V. 57. № 1. P. 8–18.
- Morozov E.G., Marchenko A.V., Filchuk K.V., Kowalik Z., Marchenko N.A., Ryzhov I.V. Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea // Applied Ocean Res. 2019. V. 87. P. 179–191.

- *Pinkel R.* Advection, Phase Distortion, and the Frequency Spectrum of Finescale Fields in the Sea. // J. Physical Oceanography. 2008. V. 38, P. 291–313.
- Röhrs J., Halsne T., Sutherland G., Dagestad K.-F., Hole L.R., Brostrom G., Christensen K. H. Current shear and turbulence during near-inertial wave // Frontiers in Marine Science. 2023. V. 10.
- Sandven S. and Johannessen O.M. High-frequency internal wave observations in the marginal ice zone // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 6912–6920.
- 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. V. 8. P. 833.
- *Shved G.M., Petrova L.N., Polyakova O.S.* Penetration of the Earth's free oscillations into the atmosphere //Ann. Geophys. 2000. V. 18. P. 566–572.
- Silvestrova K., Myslenkov S.A., Puzina O., Mizyuk A., Bykhalova O. Water Structure in the Utrish Nature Reserve (Black Sea) during 2020–2021 According to Thermistor Chain Data // Journal of Marine Science and Engineering, 2023. V.11. P. 887.

https://asf.alaska.edu

Vihma T., Pirazzini R., Fer I., Renfrew I. A., Sedlar J., Tjernström M., Lüpkes C., Nygård T., Notz D., Weiss J., Marsan D., Cheng B., Birnbaum G., Gerland S., Chechin D. and Gascard J.C. Advances in understanding and parameterization of small-scale physical processes in the marine Arctic climate system: a review // Atmos. Chem. Phys., 2014. V. 14. P. 9403–9450.

МАРЧУК и др.

STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF INTERNAL WAVES IN THE KARA SEA AND THEIR INFLUENCE ON TURBULENT HEAT AND MOMENTUM FLUXES OVER THE SEA SURFACE

E. A. Marchuk^{1,*}, I. P. Chunchuzov^{1,**}, O. E. Popov¹, I. A. Repina^{1, 2}, I. E. Kozlov³, K. P. Silvestrova⁴, A. A. Osadchiev⁴, N. B. Stepanova^{4, 5}, U. M. Johannessen⁶

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, 119017, Russia ²Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, 119234, Russia ³Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, 299011, Russia ⁴Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, 117997, Russia ⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700, Russia ⁶Nansen Scientific Society, Bergen 5006, Norway

> *e-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru **e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com

The paper is devoted to the study of the characteristics of internal waves in the Kara Sea and their interaction with the atmosphere, in particular, their influence on the turbulent momentum and heat fluxes in the surface layer of the atmosphere. The direction and horizontal velocity of propagation of short-period internal waves in the Kara Gate Strait were calculated. Cross-spectra of mesoscale fluctuations of water temperature at the sea surface, at depths of 10 and 20 m, and meteorological parameters at 22 m height were analyzed. Common spectral maxima at periods characteristic of the trapped internal gravity modes propagating in the thermocline layer and atmospheric gravity modes in the stably-stratified layer of the lower troposphere are revealed. A possible mechanism of influence of the observed gravity modes in the thermocline layer on mesoscale fluctuations of meteorological parameters (with periods from 10 min to several hours) and turbulent fluxes of momentum, apparent and latent heat in the surface layer of the atmosphere is proposed. *Keywords:* internal waves, turbulent fluxes, spectral analysis, generation mechanism, Kara Sea