

УДК 551.466.8

© Е. И. Свергун^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2,3}, О. А. Атаджанова¹, Г. В. Жегулин¹, Д. А. Романенков¹,
А. А. Коник^{1,2}, И. Е. Козлов^{4,5}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9,
г. Санкт-Петербург, Россия

³Институт водных проблем севера Карельского научного центра РАН, 185003, пр. Александра Невского, д. 50,
г. Петрозаводск, Респ. Карелия, Россия

⁴Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., д. 2, г. Севастополь, Россия

⁵Российский государственный гидрометеорологический университет, 195196, Малоохтинский пр., д. 98.,
г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: egor-svergun@yandex.ru

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 01.04.2020, после доработки 02.07.2020

На основе анализа результатов контактных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе 2016 г. в прибрежной зоне Баренцева моря, оцениваются характеристики короткопериодных внутренних волн и особенности их проявлений на поверхности в радиолокационных данных. По данным серий учащённых STD-зондирований зарегистрировано 270 внутренних волн со средним периодом около 15 мин и высотой 1–8 м. Показано, что интенсификация внутреннего волнения происходит преимущественно в отлив: на фоне относительно спокойного пикноклина проявляются ярко выраженные цуговые системы волн. На спутниковых изображениях было обнаружено 82 пакета проявлений внутренних волн, в среднем наблюдалось 4 волны в пакете. Как правило, длина лидирующего гребня в пакете составляла 27 км, а длина волны — 700 м. При общности геометрических характеристик в проявлениях волн, по направлениям распространения они разделялись на две группы: первые наблюдались на удалении 40–100 км от берега с направлением распространения на северо-запад вдоль берега, вторые распространялись от берега в северном направлении. Возможным источником генерации двух групп волн является взаимодействие прилива и неоднородностей донной топографии. Длины волн и фазовые скорости по данным контактных и спутниковых наблюдений весьма близки. Прямое сопоставление данных контактных и спутниковых наблюдений показало, что внутренние волны с амплитудой 2.5–4 м находят свое отражение в данных спутниковых наблюдений при глубине пикноклина около 15 м.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, шельф, спутниковые наблюдения, контактные наблюдения, подспутниковый эксперимент, Баренцево море.

© Е. И. Свергун^{1,2*}, А. В. Зимин^{1,2,3}, О. А. Атаджанова¹, Г. В. Жегулин¹, Д. А. Романенков¹, А. А. Коник^{1,2}, И. Е. Козлов^{4,5}

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

²St. Petersburg State University, 199034, Universitetskaya Emb., 7–9, St. Petersburg, Russia

³Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS, 185003, Aleksandra Nevskogo Pr., 50,
Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

⁴Marine Hydrophysical Institute RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

⁵Russian State Hydrometeorological University, 195196, Malookhtinsky Pr., 98, St. Petersburg, Russia

*E-mail: egor-svergun@yandex.ru

SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES IN THE COASTAL ZONE OF THE BARENTS SEA ACCORDING TO EXPEDITION AND SATELLITE OBSERVATIONS

Received 01.04.2020, in final form 02.07.2020

In this article, based on the analysis of the results of contact and satellite observations made in August 2016 in the coastal zone of the Barents Sea, the characteristics of short-period internal waves and features of their manifestations on the surface in radar

Ссылка для цитирования: 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 // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 78–86. doi: 10.7868/S2073667320040073

For citation: Svergun E.I., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Zhegulin G.V., Romanenkov D.A., Konik A.A., Kozlov I.E. Short-Period Internal Waves in the Coastal Zone of the Barents Sea According to Expedition and Satellite Observations. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 4, 78–86. doi: 10.7868/S2073667320040073

data are estimated. According to a series of rapid CTD probes, 270 internal waves with an average period of about 15 minutes and a height of 1 to 8 meters were registered. It is shown that the intensification of internal waves occurs mainly at low tide: against the background of a relatively calm pycnocline, pronounced train wave systems appear. Satellite images showed 82 packets of internal wave manifestations, with an average of 4 waves per packet. As a rule, the length of the leading ridge in the package was 27 kilometers, and the wave length was 700 meters. The common geometrical characteristics in the manifestations of waves in the areas of distribution, they were divided into two groups: the first was observed on the removal of 40–100 kilometers from the coast with direction North-West along the coast, the second spread from the coast to the North. A possible source of generation of two groups of waves is interaction between tide and unevenness of the bottom topography. The wavelengths and phase velocities are very close according to contact and satellite observations. Direct comparison of data from contact and satellite observations showed that internal waves with an amplitude of 2.5–4 meters are reflected in satellite observations at a depth of pycnocline of about 15 meters.

Key words: short-period internal waves, shelf, satellite observations, expedition observations, subsatellite experiment, Barents Sea.

1. Введение

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) с частотами колебаний близкими к частоте плавучести широко распространены в шельфовых и прибрежных районах Мирового океана. Их длины могут составлять от сотен метров до нескольких километров, а периоды — от единиц до десятков минут. КВВ часто обладают значительной интенсивностью (характеризующейся сильной нелинейностью и высотой более 10 м), распространяются группами, при этом группы двигаются в узком секторе направлений, которое часто сохраняется от группы к группе [1].

Значительный прогресс в изучении пространственной структуры поля КВВ связан с развитием спутникового мониторинга их поверхностных проявлений, использующего данные, получаемые от радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения [2, 3]. Первое обобщение радиолокационных наблюдений за поверхностными проявлениями КВВ Баренцева моря было выполнено в работе [4]. В ней обсуждаются 250 случаев проявлений внутренних волн (ВВ) на 59 радиолокационных изображениях (РЛИ) за период с июня по август 2007 г. В работе было показано, что особенности рельефа дна и приливные течения играют важную роль в генерации КВВ. Анализ последовательных снимков показал, что в определенных местах пакеты ВВ возникали с интервалом 12 ч, который близок к периоду доминирующего полусуточного прилива M_2 в Баренцевом море. Расстояние между последовательными пакетами при этом может достигать до 37 км (что соответствует скорости перемещения КВВ до 0.7 м/с). Дальнейшее обобщение архива радиолокационных данных, включающего 463 изображения за летне-осенний период 2007 г., выявило 904 пакета КВВ на акватории Баренцева моря [5]. Были выделены районы регулярной встречаемости проявлений КВВ, которые находятся к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, к северо-востоку и северо-западу от архипелага Шпицберген, на выходе из пролива Карские Ворота и у Мурманского берега Кольского полуострова. Отмечается, что иногда наблюдались пакеты КВВ особенно крупных размеров, сопоставимые с горизонтальными размерами интенсивных внутренних волн (ИВВ), зарегистрированных в других районах Мирового океана [2, 6].

В то же время данные контактных наблюдений в Баренцевом море, дающие сведения о характеристиках КВВ и их влиянии на изменчивость стратификации, крайне разрознены. В фиорде Ван Майен архипелага Шпицберген наблюдались пакеты КВВ со средней амплитудой около полуметра с доминирующими периодами в несколько минут, генерация которых определялась внешним воздействием за счет ветра и приливов [7]. Высокочастотные КВВ и бароклинные боры на фоне значительных полусуточных внутренних волн с амплитудами до 20 м наблюдались также в проливе Карские Ворота между Баренцевым и Карским морями [8, 9]. Имеются также сведения о КВВ в открытой части моря. В работе [10] приводится пример записи сильных колебаний в температуре и течениях на южном склоне Шпицбергенской банки, связанных с прохождением интенсивных солитоноподобных ВВ. Измерения, проведенные в прибрежной зоне южной части Баренцева моря, выявили пакеты интенсивных солитоноподобных ВВ с максимальными высотами до 12 м [11]. Наблюдения показали, что поле интенсивных КВВ состоит из колебаний с периодами 8–20 мин, которые появляются цугами преимущественно во время отлива и двигаются как в сторону берега, так и от него. Многосуточные наблюдения, проведенные в августе 2016 г. в южной части Баренцева моря [12], описывают регулярное появление к юго-западу от Южной Мурманской банки КВВ с периодами 5–60 мин и высотами до 8 м.

Однако открытым остается вопрос, какие КВВ и при каких фоновых гидрологических условиях находят своё отражение на спутниковых радиолокационных снимках. Единственным примером подспутникового эксперимента, в котором изучались КВВ в проливе Карские Ворота между Баренцевым и Карским морями, служит работа [8]. Здесь за счет присутствия постоянного среднего течения из Баренцева моря в Карское

внутренний прилив, распространяющийся против течения, усиливается. За счет встречного течения длина волны сокращается, а амплитуда растет. В районе пролива происходит нелинейная трансформация волны и образование пакетов ИВВ, которые видны на поверхности по спутниковым изображениям. В остальных районах Баренцева моря подспутниковых наблюдений для идентификации наблюдаемых из космоса волн до сих пор не проводилось.

Цель настоящей работы — описание пространственно-временной изменчивости характеристик КВВ по данным контактных и спутниковых наблюдений.

2. Район и условия проведения работ, виды наблюдений

Район работ летом 2016 г. в Баренцевом море находился в 50 км северо-восточнее о. Харлов. Глубины в зоне проведения наблюдений составляли 150–200 м при отсутствии резких перепадов глубин. Положение района проведения экспедиционных работ показано на рис. 1, *а* (см. вклейку). Выбор полигона для исследований был обусловлен тем, что по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в этой части моря часто обнаруживаются поверхностные проявления КВВ [4–5]. В южной части моря у побережья Кольского полуострова гидродинамический режим определяется двумя постоянно действующими факторами: Мурманским течением, несущим теплые воды вдоль берега на восток, и полусуточным приливом. Одной из особенностей гидрологии Баренцева моря в летний период является то, что характеристики приповерхностного пикноклина в основном определяются параметрами сезонного термоклина, а изопикнические поверхности практически совпадают с изотермическими [13]. В качестве примера на рис. 1, *б* показан профиль вертикального распределения температуры и плотности по данным STD-зондирования в прибрежной зоне моря. STD-зондирования выполнялись перед началом каждого эпизода измерений от поверхности до горизонта, располагающегося несколько выше дна. В период с 9 по 22 августа на полигоне были произведены учащенные повторяющиеся зондирования (сканирования) водной толщи от поверхности до заданного горизонта (50 м) с дрейфующего судна с помощью STD-зондов CastAway (США) и SBE-25 (США). Исключением являлся период с 15 по 17 августа, когда произошло усиление северо-западного ветра до 10–15 м/с. Сильный дрейф и волнение, наблюдавшиеся в этот период, не позволили производить измерения. Один цикл сканирования «спуск-подъем» зонда занимает 1–2 мин (при глубине зондирования до 50 м). Эти измерения имели продолжительность 5–12 ч за сутки, а общее время сканирований составило 80 ч. Перед началом измерений судно всегда выходило в одну и ту же точку, показанную на рис. 1, *а*. Судно удалялось от исходной точки не более чем на несколько морских миль, а скорость дрейфа не превышала 0.25 узла.

Для анализа результатов привлекались спутниковые РЛИ с аппаратов Sentinel 1A и 2A, полученные в режиме съемки EW в С-диапазоне с пространственным разрешением 40 м, а также с аппарата ALOS-2 PALSAR-2 в L-диапазоне с пространственным разрешением 25 м. Всего было использовано 21 РЛИ, полностью охватывавших район в радиусе 100 км от судна по пространству и перекрывающих период работ по времени. На предварительном этапе РЛИ подвергались фильтрации с целью удаления спекл-шума, а также контрастированию. На РЛИ определялись следующие характеристики: положение поверхностного проявления КВВ, длина лидирующего гребня, количество волн в пакете, длина волны. С привлечением данных контактных наблюдений аналогично методике из работы [14] оценивалась фазовая скорость.

Метеорологические условия во время проведения работ формировались преимущественно под воздействием малоградиентного барического поля. Преобладали слабые и умеренные ветры южных направлений, волнение моря, как правило, не превышало двух баллов.

3. Характеристики КВВ по данным контактных наблюдений

В качестве примера на рис. 2 показана характерная для исследуемого района Баренцева моря пространственно-временная изменчивость температуры на станции многочасового зондирования. Колебания изотерм в термокLINE охватывают слой 10–30 м. Длительность наблюдений не позволяет проследить параметры низкочастотных колебаний, однако отчетливо видно, что короткопериодные возмущения являются доминирующими. В качестве характерной поверхности, позволяющей оценить высоту и период проходящих КВВ, была выбрана изотерма, соответствующая среднему положению слоя скачка. Высота волны оценивается как средняя величина между высотами переднего и заднего ее склона, период каждой волны определяется как временной интервал между соседними минимумами залегания изолинии. В течение первого часа наблюдений термоклин не испытывает значительных колебаний, а начиная с 18:00 и далее в течение трех часов в слое скачка прослеживается прохождение пакета КВВ с периодами менее 30 мин и высотой до 6 м. Согласно результатам наблюдений, интенсификация подобных возмущений в слое скачка происходит

преимущественно в момент перехода от большой воды к малой, т. е. в отлив, или в период наступления малой воды. Анализ записей колебаний температуры показал, что возмущения, приуроченные к периоду отлива, проявляются на записях в виде ярко-выраженных цуговых систем.

За весь период наблюдений было зарегистрировано 270 КВВ (полных колебания температуры на записях) с высотами от 1–8 м. В районе преобладало внутреннее волнение с периодом 10–20 мин, составляющее примерно 45 % от общего числа наблюдений. Наиболее повторяющаяся высота КВВ составила 1.5 м, а период — 14 мин. Максимальная из зарегистрированных волн имела высоту 8 м и период 28 мин.

По данным STD-зондирований выявлена выраженная двухслойная фоновая стратификация, критерии которой совпадают с указанными в работе [15]. Термоклин и пикноклин располагаются в слое 15–20 м, значения вертикальных градиентов температуры достигали $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ в слое скачка температуры, на профиле частоты Вьяйсяля-Брента выделялся один ярко-выраженный максимум величиной в 30 циклов/час, совпадающий с положением скачка плотности (рис. 1, б).

Принимая приближение о двухслойном характере стратификации, можно считать, что в характеристиках измеренных короткопериодных колебаний температуры преобладают свойства, характерные для первой моды внутренней волны. В пользу этого довода говорит и анализ полученных для всего ряда наблюдений зависимостей, связывающих период, длину и фазовую скорость волн. На рис. 3, а представлены зависимости периода КВВ (T) от длины волны (λ), на рис. 3, б — фазовой скорости (C_0) для случая двухслойной стратификации от длины волны. Оценки периодов КВВ получены на основе данных наблюдений, скорости и длины волн рассчитывались по формулам, приведенным в [14]. Точками на рис. 3, а отмечены экспериментальные оценки периодов КВВ. Из рисунка видно, что длины волн лежат в диапазоне 100–1400 м, а фазовые скорости — 25–50 см/с (рис. 3, б). Например, КВВ с периодом свыше 20 мин имеют длину от 500 м и более, а фазовую скорость 40–45 см/с. Величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0.98$ указывает на то, что уравнение регрессии, приведенное на рис. 3, а, фактически полностью соответствует экспериментальным оценкам характеристик КВВ.

Зависимость фазовой скорости от длины волны аппроксимировано логарифмической зависимостью с $R^2 = 0.75$ (рис. 3, б). Точки имеют более выраженный разброс относительно аппроксимирующей функции, чем у зависимости периода КВВ от длины волн. Это связано с тем, что при расчете значений фазовых скоростей не учитывается фоновое течение и дрейф судна. Отметим, что для КВВ длиной менее 200 м наблюдается заметное ухудшение описания характеристик волн в принятом приближении.

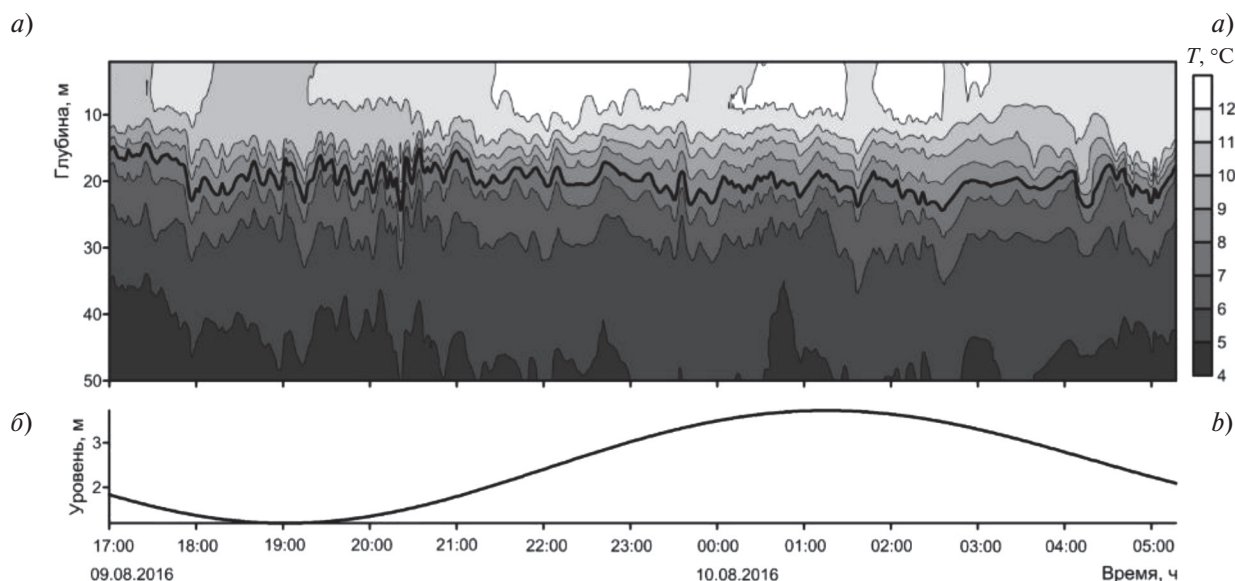


Рис. 2. Пример записи колебаний температуры (а) и колебаний уровня (б) с 17:00 09.08.2016 по 05:20 10.08.2016 в южной части Баренцева моря. Измерения выполнялись с помощью STD-зонда CastAway. Выделенная линия — среднее положение термоклина по данным глубин залегания изотермы $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fig. 2. Example of temperature fluctuations recording (a) and level fluctuations (b) from 17:00 09.08.2016 to 05:20 10.08.2016 in the southern part of the Barents Sea. Measurements were performed using the CastAway CTD probe. The highlighted line is the average position of the thermocline according to the isotherm depth of $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

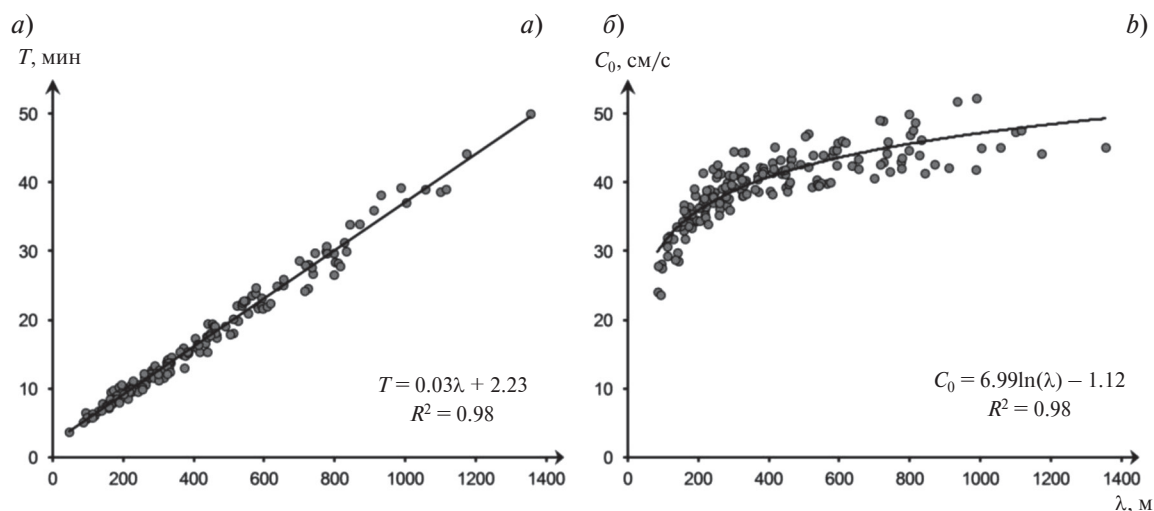


Рис. 3. Зависимость экспериментальных оценок периода КВВ (а) и экспериментальных оценок фазовой скорости (б) от длины волны.

Fig. 3. Dependence of experimental estimates of the period of internal waves (a) and phase velocity (b) on the wavelength.

4. Характеристики КВВ по данным радиолокационных наблюдений

На 20 РЛИ, соответствующих периоду судовых работ, были детектированы поверхностные проявления КВВ. В целом было зарегистрировано 82 пакета поверхностных проявлений КВВ, состоящих из нескольких волн, детальные характеристики которых представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что количество волн в пакете КВВ варьировалось от 1 до 10, при этом часто регистрировались и одиночные проявления волн. Длина лидирующего гребня лежит в диапазоне 5–88 км, составляя в среднем 27 км. Длина волны в пакетах варьируется от 0.3 до 1.9 км, составляя в среднем 0.7 км.

Положения лидирующих гребней волн в пакете представлены на рис. 4 (см. вклейку).

В проявлениях волн выделяются две группы пакетов с характерными для них преобладающими направлениями распространения. Первое направление представлено большой группой пакетов, которые движутся преимущественно с юго-востока на северо-запад. Второй группе свойственно направление движения от берега, при этом часть таких волн находилась юго-западнее района судовых работ, не достигая его при распространении от берега. Также были зарегистрированы отдельные пакеты внутренних волн, которые

Таблица 1

Характеристики поверхностных проявлений КВВ по данным анализа РЛИ

Characteristics of surface manifestations of short-period internal waves according to the analysis of the SAR images

Дата	Кол-во пакетов, шт	Длина лидирующего гребня, км			Длина лидирующей волны, км			Количество волн в пакете, шт		
		Макс	Мин	Среднее	Макс	Мин	Среднее	Макс	Мин	Среднее
08.08	10	42.8	6.5	25.4	1.2	0.4	0.7	10	1	3
09.08	9	46.2	8.6	21.9	1.1	0.5	0.8	4	1	2
10.08	3	27.1	17.2	23.5	0.8	0.6	0.7	2	1	2
11.08	11	76.7	9.9	30	1.2	0.4	0.7	7	1	3
17.08	5	34.5	12.1	19.4	1	0.7	0.8	3	1	2
18.08	6	54.4	19	38.1	1.2	0.8	1	6	3	4
20.08	12	58	8.5	29.1	1.9	0.5	1	7	1	3
21.08	2	18	12.3	15.2	1.3	1.3	1.3	3	1	2
22.08	24	88	5	31.2	1.6	0.3	0.8	12	1	4
23.08	11	51	11.4	25.6	1.7	0.5	0.7	5	1	3

не имеют преимущественного направления. Несмотря на различные направления распространения волн в группах пакетов, существенного различия в их характеристиках обнаружено не было. В работе [11] сообщается, что по данным контактных измерений при помощи антенны распределенных датчиков в прибрежной зоне Баренцева моря на расстоянии около 2 км от берега также выделяются два преобладающих направления распространения пакетов волн. Однако в отличие от двух характерных направлений, выявленных нами при анализе спутниковых данных, в работе [11] пакеты КВВ следуют от берега и к нему. С одной стороны, в настоящей статье при использовании спутниковых данных широкого пространственного охвата выделено отличное от работы [12] характерное направление волн с юго-востока на северо-запад, а с другой стороны, волны, идущие к берегу, в настоящей статье не зарегистрированы.

Возникает естественный вопрос о происхождении зарегистрированных пакетов КВВ. По существующим представлениям основным источником генерации КВВ является распад приливных и инерционных бароклинных колебаний при высокой нелинейности процесса. По данным наблюдений в Баренцевом море амплитуды приливных внутренних волн могут достигать 40 м в желобе Франца-Виктория [16], 25 м на склоне желоба острова Медвежий [17], 35 м в проливе Карские Ворота [18] и свыше 10 м в прибрежной зоне Кольского п-ова [11]. В рамках линейной теории внутренний полусуточный прилив в высокоширотных бассейнах существует преимущественно в виде захваченных волн, а выше критической широты (74.5° с.ш. для приливной гармоник M_2) он не может свободно распространяться [19]. Однако это ограничение не относится к КВВ, свойства которых слабо зависят от вращения Земли. Если условия благоприятны для генерации КВВ, то они могут свободно распространяться от места генерации. Результаты численных экспериментов с подтверждают эту возможность [8, 10, 20].

Вследствие регулярного характера спутниковых проявлений КВВ на рис. 4 и установленной по контактными данным интенсификации короткопериодных колебаний температуры в фазу отлива можно считать, что описанные выше волны связаны с особенностями распространения внутреннего прилива в районе исследований. Результаты анализа спутниковых данных также показывают цуговой характер зарегистрированных проявлений КВВ, ранее выявленный при анализе записей колебаний температуры. Вероятнее всего для выявленных групп пакетов волн работает топографический механизм генерации: группы пакетов, которые движутся преимущественно с юго-востока на северо-запад генерированы донным склоном (перепад глубин составляет около 50 м), расположенной на северо-востоке полигона (рис. 4); группы пакетов,двигающиеся от берега, генерированы на вдольбереговой неоднородности рельефа дна, с перепадом глубин около 50 м.

5. Сопоставление характеристик КВВ по данным контактных и спутниковых наблюдений

На РЛИ от 23 августа в 17:28 зарегистрирован пакет КВВ (рис. 5, а) с длиной лидирующего гребня около 10 км, который находился на расстоянии 6 км от судна, производившего измерения. При проведении геометрических построений на снимке установлено, что проявление пакета КВВ состоит из 6 волн, со средней длиной в 500 м. Произведен расчёт фазовой скорости зарегистрированного поверхностного проявления по методике, изложенной в [14] (выражение 1). Фазовая скорость поверхностного проявления по результатам расчета составила 0.53 м/с. Учитывая расстояние до судна в момент регистрации снимка, поверхностное проявление должно достигнуть судна около 20:30. Обратившись к записи колебаний температуры по результатам измерений 23 августа (показанной на рис. 5, б), можно видеть, что в период с 20:10 до 21:15 на записи присутствует ярко-выраженный пакет КВВ с высотами 5–8 м и периодами около 15 мин.

Для сопоставления характеристик цуга внутренних волн, зарегистрированного судном в 20:10, с поверхностным проявлением, детектированным на снимке в 17:28, составлена табл. 2, в которой приведены фазовые скорости и длины волн, рассчитанные по контактным ([14], выражение 2) и спутниковым ([14], выражение 1) данным.

Сопоставление результатов расчетов показало, что характеристики цуга КВВ, зарегистрированного по контактными и спутниковыми данным, весьма близки, что позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что, во-первых, и по спутниковым, и по контактными данным регистрируется именно цуг внутренних волн, во-вторых, что КВВ, расположенные в пикноклине, залегающем на глубине 15 м, с амплитудой 2.5–4 м, отчетливо регистрируются на морской поверхности в виде проявлений с длиной волны около 500 м и длиной лидирующего гребня около 15 км.

В целом сопоставление данных контактных и спутниковых наблюдений показало удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных значений. Это позволяет утверждать, что зарегистрированные колебания с периодом свыше 10 мин и длинами более 200 м являются ВВ первой моды, которые хорошо описываются соответствующим дисперсионным соотношением.

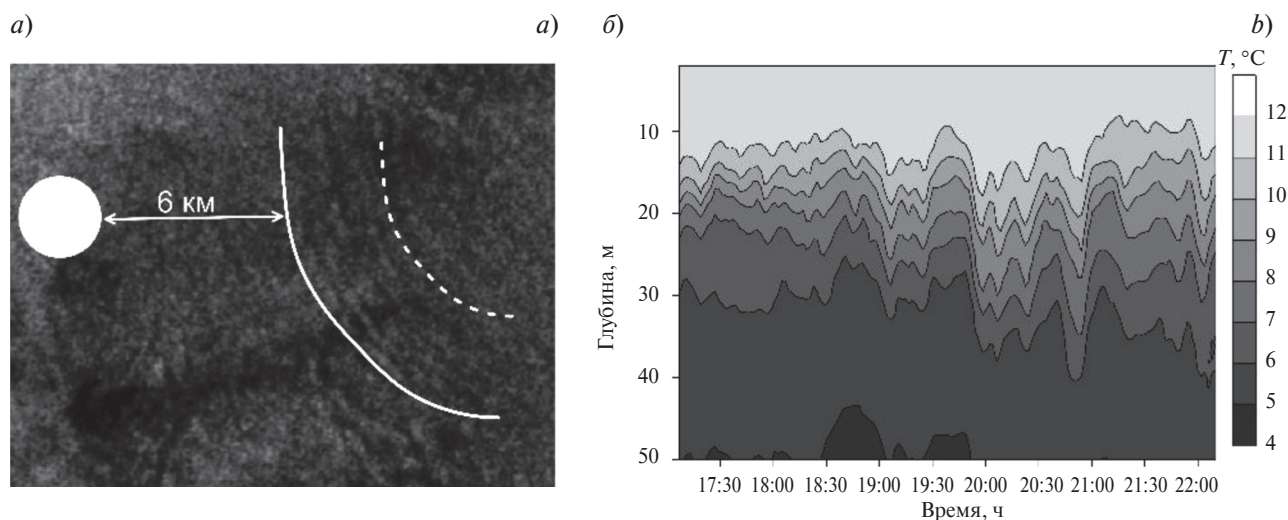


Рис. 5. Сопоставление данных спутниковых и контактных наблюдений: *a* —отконтрастированный фрагмент РЛИ с аппарата Sentinel 1A, в режиме съемки EW в С-диапазоне с пространственным разрешением 40 м от 23 августа 2016 г., содержащий поверхностное проявление КВВ, лидирующий гребень которого выделен белой сплошной линией, а замыкающий гребень — белой пунктирной линией; белый эллипс указывает область нахождения судна во время контактных измерений; *б* —фрагмент записи колебаний температуры, где с 20:10 по 21:15 наблюдаются КВВ, зарегистрированные на РЛИ.

Fig. 5. Comparison of satellite data and expedition observations: *a* — a contrasted fragment of image from Sentinel 1A, in the EW mode in the C-band with a spatial resolution of 40 meters from August 23, 2016, containing a surface manifestation of the internal wave, the leading ridge of which is highlighted by a white solid line, and the trailing ridge—a white dotted line; a white ellipse indicates the location of the vessel during contact measurements; *b* — fragment of a recording of temperature fluctuations, where from 20:10 to 21:15 manifestation of short-period internal waves registered on the SAR images are observed.

Таблица 2

Сопоставление характеристик цуга внутренних волн, зарегистрированного по контактным и спутниковым данным

Comparison of characteristics of the internal wave trains registered from contact and satellite data

Тип данных	Фазовая скорость, м/с	Длина волны, м
Контактные	0.57	481
Спутниковые	0.53	500

6. Заключение

На основании результатов выполненных контактных измерений внутреннего волнения в прибрежном районе Баренцева моря и спутникового мониторинга его поверхностных проявлений выделены основные черты поля КВВ. Установлено, что район исследований характеризуется высокой активностью КВВ, которые проявляются как в спутниковых, так и в *in situ* данных. Последние показывают вертикальные колебания изотерм по амплитуде, сравнимые с толщиной термоклина. В ходе анализа записей колебаний температуры установлено, что интенсификация короткопериодных колебаний пикноклина происходит во время перехода от полной воды к малой, то есть в отлив. РЛИ позволили выявить два преобладающих типа волновых пакетов: КВВ прибрежной зоны, распространяющиеся, как правило, от берега, и КВВ, зарегистрированные в открытом море, с генеральным направлением вдоль берега на северо-запад. Наиболее вероятным источником генерации выявленных групп пакетов волн являются неоднородности донной топографии. Цуговый характер зарегистрированных КВВ проявляется как в данных *in situ*, так и спутниковых наблюдений.

Результаты прямого сопоставления данных контактных и спутниковых наблюдений показывают, что при глубине залегания пикноклина около 15 м хорошо выраженные в данных контактных наблюдений КВВ с амплитудами 2.5–4 м отчётливо отображаются на морской поверхности в виде пакетов волн с длинами порядка 500 м.

7. Финансирование

Обработка результатов экспедиционных исследований выполнена в рамках государственного задания № 0149–2019–0015. Обработка результатов спутниковых наблюдений выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18–35–20078 мол_а_вед. Спутниковые данные ALOS-2 PALSAR-2 получены от Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) в рамках исследовательского проекта PI № 3395 «PALSAR-2 imaging for sub- and mesoscale dynamics in the Arctic Ocean» (6th ALOS RA for ALOS-2).

Литература

1. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом Океане // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 6. С. 805–810.
2. Jackson C.R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (дата обращения: 09.03.2020).
3. Дикинис А.В., Иванов А.Ю. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1» / под ред. Л.Н. Карлина. М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
4. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. № 3. С. 60–69.
5. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 4. С. 338–345.
6. da Silva J.C.B., New A.L., Magalhães J.M. On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean // *Deep Sea Res.* 2011. V. 58. P. 229–240. doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.003
7. Морозов Е.Г., Марченко А.В. Короткопериодные внутренние волны в арктическом фиорде (Шпицберген) // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 2. С. 453–460.
8. Морозов Е.Г., Козлов И.Е., Шука С.А., Фрей Д.И. Внутренний прилив в проливе Карские ворота // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 13–24. doi: 10.7868/S0030157417010105
9. Morozov E.G., Paka V.T., Bakhanov V.V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 16. L166603. doi: 10.1029/2008GL033804
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Res.* 2003. V. 50, N2. P. 317–338.
11. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / Под ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 363 с.
12. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. doi: 10.7868/S2073667317020022
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
14. Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // *Исследование Земли из космоса*. 2014. № 3. С. 41–55. doi: 10.7868/S0205961414030087
15. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
16. Писарев С.В. Низкочастотные внутренние волны у кромки шельфа Арктического Бассейна // *Океанология*. 1996. № 36. С. 819–826.
17. 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. № 39. С. 165–173.
18. Morozov E.G., Parrilla-Barrera G., Velarde M.G., Scherbinin A.D. The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A comparison of internal tides // *Oceanologica Acta*. 2003. V. 26, N 3. P. 231–241.
19. Морозов Е.Г., Пака В.Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // *Океанология*. 2010. № 5. С. 709–715.
20. Талипова Т.Г., Терлецкая Е.В., Куркин А.А., Рувинская Е.А. Моделирование внутренних волн в прибрежной зоне Баренцева моря // *Экологические системы и приборы*. 2014. № 3. С. 34–43.

References

1. Sabinin K.D., Serebryany A.N., Nazarov A.A. Intensive internal waves in the World Ocean. *Oceanology*. 2004, 44(6), 753–758.
2. Jackson C.R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (date of access: 09.03.2020).
3. Dikinis A.V., Ivanov A. Yu. et. al. Atlas of annotated radar images of the sea surface obtained by the Almaz-1 spacecraft” / Ed. L.N. Karlin. M., GEOS, 1999. 119 p. (in Russian).
4. Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Sandven S. Some results of internal waves study in the Barents Sea using satellite radar data. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. 2010, 3, 60–69. (in Russian).
5. Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Zubkova E.V., Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Romanenkov D.A., Shapron B., Myasoedov A.G. Generation sites of nonlinear internal waves in the Barents, Kara and White seas from spaceborne SAR observations. *Sovremennyye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2014, 11, 4, 338–345 (in Russian).
6. da Silva J.C.B., New A.L., Magalhães J.M. On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean. *Deep Sea Res.* 2011, 58, 229–240. doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.003
7. Morozov E.G., Marchenko A.V. Short-period internal waves in an arctic Fjord (Spitsbergen). *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48, 4, 401–408.
8. Morozov E.G., Shchuka S.A., Frey D.I., Kozlov I.E. Internal tide in the Kara Gates Strait. *Oceanology*. 2017, 57, 1, 8–18. doi: 10.1134/S0001437017010106
9. Morozov E.G., Paka V.T., Bakhanov V.V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35, 16. doi: 10.1029/2008GL033804
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude. *Deep Sea Res.* 2003, 50, 2, 317–338.
11. Surface and internal waves in the Arctic seas / Eds. I.V. Lavrenov, E.G. Morozov. SPb., Gidrometeoizdat, 2002. 363 p. (in Russian).
12. Svergun E.I., Zimin A.V. Estimation of the frequency of occurrence of intense internal waves in the White and Barents seas according to the expeditionary research. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2017, 10, 2, 13–19. doi: 10.7868/S2073667317020022 (in Russian).
13. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. V. 2. White sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions / Ed. B.H. Gluhovskoi. L., Gidrometeoizdat, 1991. 240 p. (in Russian).
14. Zimin A.V., Romanenkov D.A., Kozlov I.E., Shapron B., Rodionov A.A., Atadzhanova O.A., Myasoedov A.G., Kollar F. Short-Period Internal Waves in the White Sea: Operational Remote Sensing Experiment in Summer 2012. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2014, 3, 41–55. doi: 10.7868/S0205961414030087 (in Russian).
15. Waves inside the Ocean / Konyaev K.V., Sabinin K.D. SPb., Gidrometeoizdat, 1992. 272 p. (in Russian).
16. Pisarev S.V. Low-frequency internal waves near the shelf edge of the Arctic basin. *Oceanology*. 1996, 36(6), 771–778.
17. Kozubskaya G.I., Konyaev K.V., Pludeman A., Sabinin K.D. Internal waves at the slope of Bear Island from the data of the Barents Sea polar front experiment (BSPF-92). *Oceanology*. 1999, 39(2), 147–154.
18. Morozov E.G., Parrilla-Barrera G., Velarde M.G., Scherbinin A.D. The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A comparison of internal tides. *Oceanologica Acta*. 2003, 26, 3, 231–241.
19. Morozov E.G., Paka V.T. Internal waves in a high-latitude region. *Oceanology*. 2010, 50, 5, 668–674.
20. Talipova T.G., Terletskeya E.V., Kurkin A.A., Ruvinskaya E.A. Modeling of internal waves in the coastal zone of the Barents Sea. *Ekologicheskie Sistemy i Pribory*. 2014, 3, 34–43 (in Russian).

К статье 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...
Svergun E.I., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Zhegulin G.V., Romanenkov D.A., Konik A.A., Kozlov I.E. Short-period internal waves in the coastal zone of the Barents Sea...

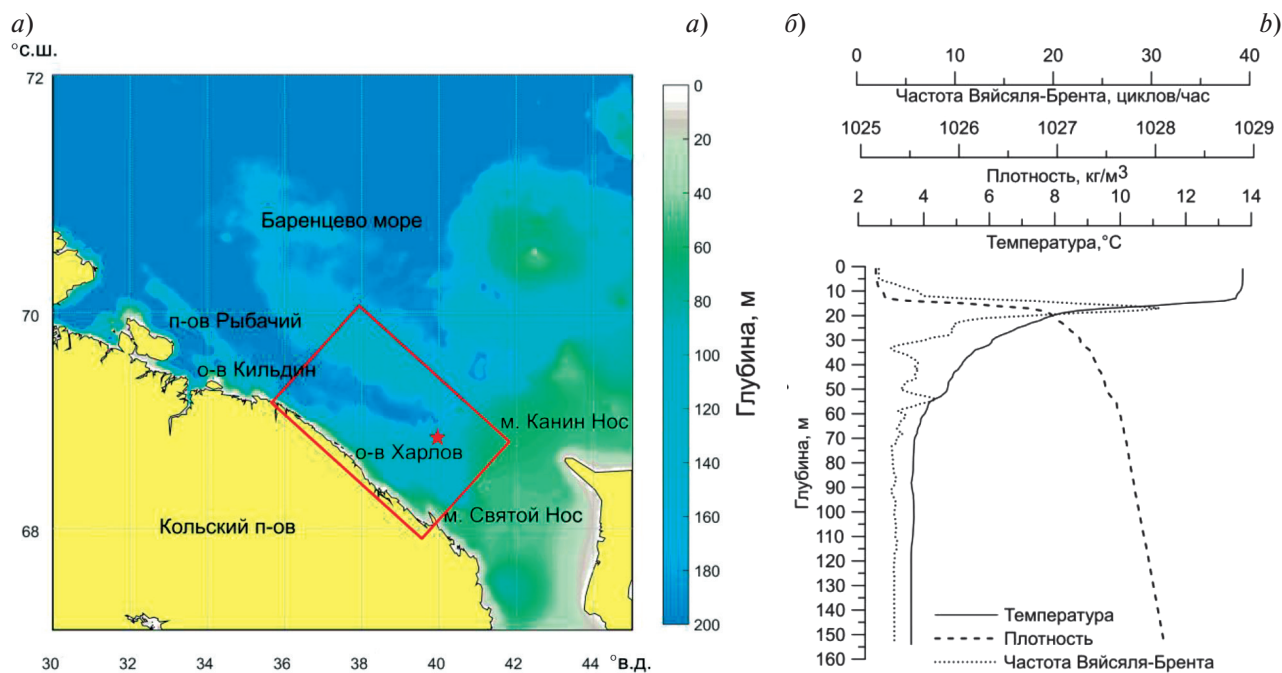


Рис. 1. Физико-географические и гидрологические условия района проведения измерений: *a* — обзорная карта прибрежной зоны юго-западной части Баренцева моря с указанием границ района сбора спутниковой информации (красная линия) и исходной точки, откуда осуществлялся дрейф судна (красная звезда); *b* — профили вертикального распределения температуры, плотности, и частоты Вайсяля-Брента, полученные в рамках экспедиционных исследований по данным CTD-зондирования, выполненного 9 августа 2016 г. в прибрежной части Баренцева моря.

Fig. 1. Physical-geographical and hydrological conditions of the expedition research area: *a* — overview map of the coastal zone of the South-Western part of the Barents Sea indicating the boundaries of the area of satellite data used (red line) and the initial point, where was started the drift of the vessel (red star); *b* — profiles of the vertical distribution of temperature, density, and Väisälä–Brent frequency obtained through field research according to CTD-sensing, made 9 August 2016 in the coastal part of the Barents Sea.

К статье *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...
Svergun E.I., Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Zhegulin G.V., Romanenkov D.A., Konik A.A., Kozlov I.E. Short-period internal waves in the coastal zone of the Barents Sea...

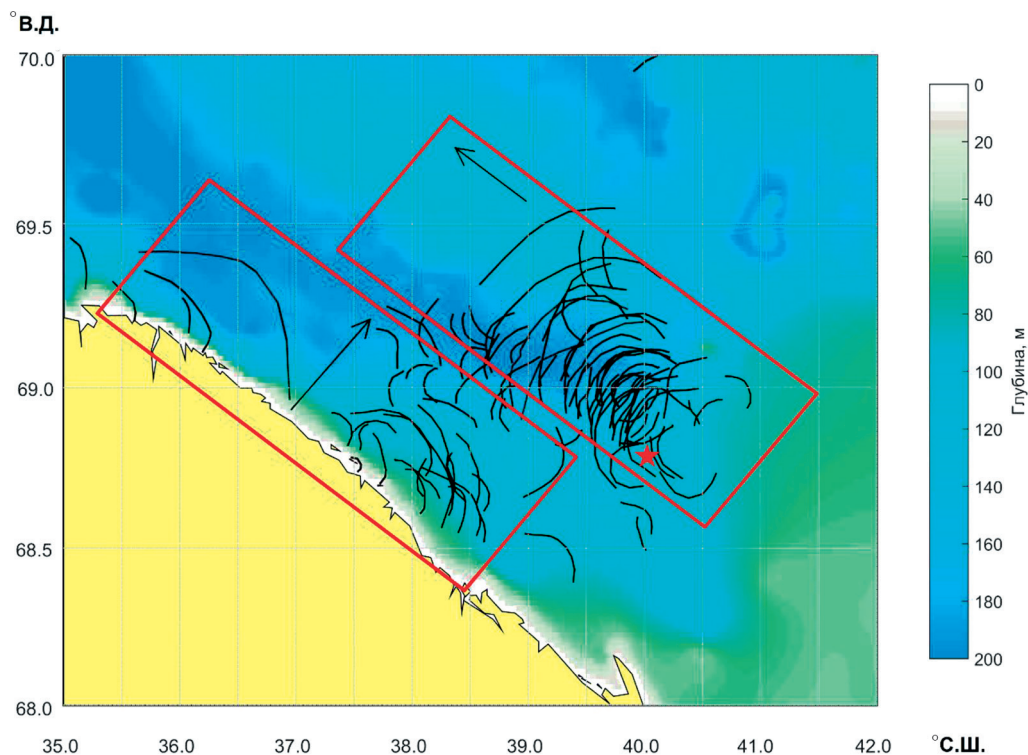


Рис. 4. Положения лидирующих гребней поверхностных проявлений КВВ, зарегистрированных на РЛИ за период с 9 по 22 августа 2016 года, нанесённые на карту глубин района работ. Красными рамками выделены группы проявлений, имеющих общее характерное направление распространения, указанное стрелкой. Красной звездой на карте обозначено местоположение судна в момент регистрации цуга КВВ, проявление которого зарегистрировано в спутниковых данных.

Fig. 4. Positions of the leading crests of surface manifestations of short-period internal waves registered on the SAR images for the period from 9 to 22 August 2016, mapped to the depth of the research area. Red borders indicate groups of manifestations that have a common characteristic propagation direction indicated by the arrow. The red star on the map indicates the location of the short-period internal waves manifestation registered in the expedition data.