

УДК 551.466.82

© Е. И. Свергун^{1,2}, А. В. Зимин^{1,2}¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширишова РАН²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
svergun@ocean.rshu.ru**ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ИНТЕНСИВНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В БЕЛОМ И БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Статья поступила в редакцию 10.03.2017, после доработки 16.05.2017.

Анализируются результаты контактных измерений высот короткопериодных внутренних волн в районах около Соловецких островов, на южной границе пролива Горло в Белом море и севернее Кольского полуострова в Баренцевом море, выполненные в летние сезоны 2010—2016 гг. Длительность измерений в каждом районе составила не менее суток за сезон. Установлено, что за сутки в каждом районе отмечено от 50 до 150 волн. Их средняя высота на полигонах меняется от 2 до 6 м. В некоторых из них несколько раз за сутки отмечены интенсивные внутренние волны. Максимальные зарегистрированные высоты внутренних волн в Белом море составляют 18 м, в Баренцевом море — 8 м. В предположении о стационарности волнообразующих факторов выполнены оценки вероятности появления экстремальных высот внутренних волн, которые могут наблюдаться один раз за сутки, 10 дней, 1 мес, 2 мес, 3 мес. Наиболее интенсивные волны ожидаются в Белом море, в районе Западной Соловецкой салмы, где раз в месяц будут наблюдаться волны высотой до 28 м, а на южной границе пролива Горло в Белом море и севернее Кольского полуострова, в Баренцевом море, за тот же период ожидаются волны, превышающие 10 м.

Ключевые слова: интенсивные внутренние волны, натурные наблюдения, вероятностные характеристики экстремальных волн, шельф, Белое и Баренцево моря.

E. I. Svergun^{1,2}, A. V. Zimin^{1,2}¹Saint-Petersburg Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia**FORECAST OF THE OCCURRENCE OF INTENSE INTERNAL WAVES IN THE WHITE AND BARENTS SEAS ACCORDING TO EXPEDITIONARY RESEARCH**

Received 10.03.2017, in final form 16.05.2017.

The results of long-term contact measurements of the heights of short-period internal waves in the regions beside of the Solovki islands, of the southern border of Gorlo strait and to the North of the Kola Peninsula in the Barents Sea, made in the summer seasons of the years 2010—2016. The duration of measurements in each region was not less than 24 hours per season. It is established that for each day in each region, from 50 to 150 waves are observed, which on average have heights from 2 to 6 meters. In some of them, intense internal waves are recorded several times a day. The maximum recorded heights of internal waves in the White Sea are 18 meters, in the Barents Sea — 8 meters. Assuming the stationarity of the waveforming factors, estimates are made for the probability of occurrence of extreme heights of internal waves, which can be observed once a day, 10 days, 1 month, 2 months, 3 months. The most intense internal waves are expected in the White Sea, near the Western Solovki Strait, where once a month there will be waves up to 28 meters high, and waves more than 10 meters are expected in the area north of the Kola Peninsula, in the Barents Sea.

Key words: intense internal waves, field observations, forecast, White sea, Barents sea.

Ссылка для цитирования: 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.

For citation: Svergun E. I., Zimin A. V. Forecast of the occurrence of intense internal waves in the White and Barents seas according to expeditionary research. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 2, 13—19.

DOI: 10.7868/S2073667317020022.

Прогресс в освоении природных богатств морского шельфа неразрывно связан со знанием гидрологических процессов и умением их прогнозировать, особенно это важно для экстремальных явлений [1]. В настоящее время основное внимание уделяется прогнозированию процессов, протекающих на поверхности океана [2], в то время как существуют процессы и в толще вод, которые также могут быть опасны в своих проявлениях. Примером тому могут служить результаты расчетов гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус подводного объекта, движущегося в поле внутреннего волнения [3]. Накопленный экспериментальный опыт показывает, что существуют районы океана, где наиболее вероятны встречи с внутренними волнами, дивергентными течениями и т.д., которые могут приводить к проблемам с управлением, а иногда и к гибели подводных аппаратов [4]. Обобщенные данные натурных наблюдений показывают [5], что высокая интенсивность локальной изменчивости структуры вод характерна для шельфовых зон практически всех арктических морей, где энергия мезомасштабных приливных процессов переходит в энергию турбулентного перемешивания.

Считается, что приливные течения взаимодействуют с неровностями дна, это приводит в дальнейшем к появлению цугов короткопериодных внутренних волн (КВВ) [6]. Порой они представляют собой интенсивные короткопериодные внутренние волны (ИВВ), которые получили свое название из-за значительных амплитуд [7]. ИВВ приводят к большой изменчивости гидрологических характеристик и могут оказывать влияние на безопасность и экономическую эффективность работ на шельфе Белого и Баренцева морей, активно осваиваемых Россией.

Наиболее подробные представления о районах максимальной встречаемости КВВ в описываемых морях получены по данным высокоразрешающих радаров с синтезированной апертурой космического базирования ENVISAT ASAR и RADARSAT [8, 9]. Анализ большого массива радиолокационных изображений (РЛИ) таких радаров позволил выделить области систематической регистрации поверхностных проявлений ВВ: они находятся в районе свала глубин к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, у пролива Карские ворота, около северного побережья Кольского полуострова, на южной границе пролива Горло и вокруг Соловецких островов. В данных районах КВВ проявляются преимущественно в виде пакетов. Проявления ВВ на РЛИ не позволяют без дополнительной информации определить такую важную характеристику, как амплитуда волны. У Соловецких островов и пролива Горло в Белом море, а также у северного побережья Кольского полуострова были произведены судовые экспедиционные исследования, целью которых являлось получение сведений о характеристиках внутренних волн контактными методами. По данным таких измерений в указанных областях Белого моря [9—11] установлено, что около Соловецких островов регулярно прослеживаются пакеты КВВ амплитудой более 10 м. Поэтому необходимо понимать оценку вероятности появления ИВВ для долговременного планирования подводных работ, особенно в прибрежных мелководных районах рассматриваемых морей.

Задача прогноза высот ИВВ является многофакторной задачей [12], т. к. характеристики волн зависят от особенностей стратификации вод, атмосферного воздействия, интенсивности прилива и т. д. Однако, если имеется значительный объем данных наблюдений за амплитудами ВВ, и вероятность появления экстремальных волн оценивается за длительный период времени, можно ожидать нивелирования волнообразующих факторов [13]. В этом случае задача сводится к аппроксимации функции распределения наблюдаемых высот волн [14].

Целью данной работы являются систематизация данных контактных наблюдений за высотами КВВ в районах наибольшей встречаемости в Белом и Баренцевом морях и оценка вероятности появления волн экстремальных высот в течение теплого сезона.

Описание методики измерений и полученных данных. В качестве исходных данных, используемых для нахождения высот КВВ, выступают высокоразрешающие контактные наблюдения, выполнявшиеся на пяти полигонах в Белом море в июле—августе 2010—2014 гг. и одном полигоне в Баренцевом море в августе 2016 г. (рис. 1). Наблюдения заключаются в повторяющихся зондированиях (сканировании) водной толщи от поверхности до заданного горизонта или до дна. На полигонах в Белом море использованы STD-зонды STD-90M (Германия) и CastAway (США), в Баренцевом море — CastAway (США) и SBE-25 (США). Один цикл сканирования «спуск-подъем» зонда занимает 1—2 мин (при глубине заданного горизонта до 55 м). На акватории Белого моря наблюдения в полигонах выполнялись в течение чуть более суток с закоренных судов с незначительными перерывами на замену батарей и снятие информации. При этом время сканирования водной толщи на полигоне № А-1 составляет 108 ч

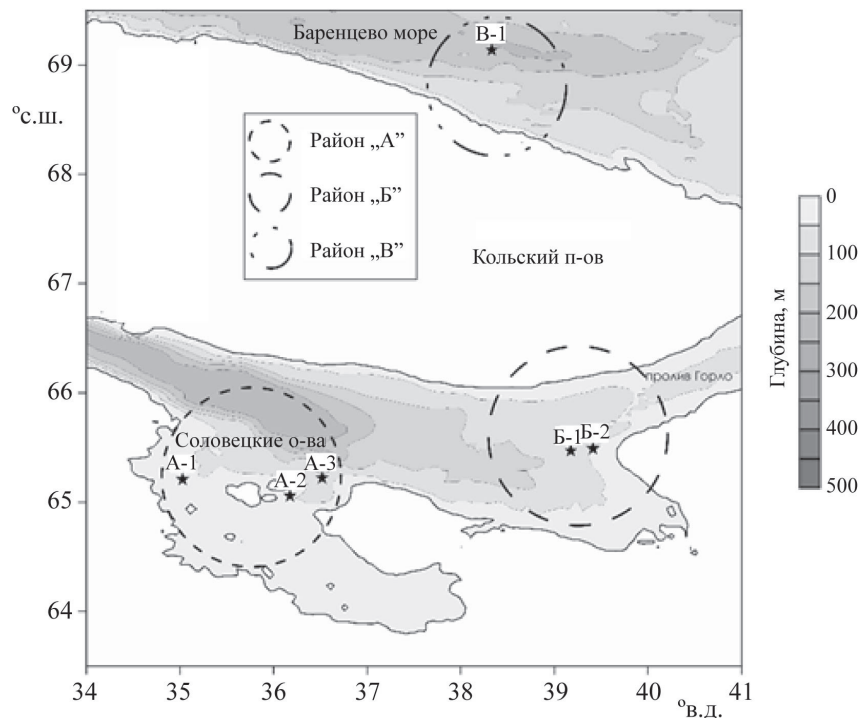


Рис. 1. Карта глубин с нанесенными на нее районами работ по исследованию характеристик внутренних волн. Штриховкой показаны районы частых поверхностных проявлений ВВ [по Козлов и др., 2014]. Звездами с подписями обозначены полигоны, в которых производились контактные измерения характеристик внутреннего волнения.

Fig. 1. A map of the depths, with areas of research on the characteristics of internal waves. Hatching shows areas of frequent surface manifestations of internal waves [Kozlov et al., 2014]. Stars with signatures indicate polygons in which contact measurements of the characteristics of internal waves were made.

(за 2010—2013 гг.); № А-2 — 24 ч (за 2012 г.), № А-3 — 50 ч (за 2012, 2014 гг.), № В-1 — 24 ч (за 2012 г.), № В-2 — 24 ч (за 2014 г.). На полигоне в Баренцевом море измерения выполнены с судов, находившихся в дрейфе, длительность работы на полигоне составляет 14 дней, но измерения выполняются от 5 до 12 ч за сутки. Общее время сканирования на полигоне № В-1 составляет 80 ч.

Одной из особенностей Белого и Баренцева морей в летний период является то, что характеристики приповерхностного пикноклина в основном определяются параметрами сезонного термоклина, а изопикнические поверхности практически совпадают с изотермическими [15]. Поэтому и в данной работе характеристики КВВ оцениваются по результатам наблюдений за изменчивостью положения термоклина (рис. 2). Из рисунка видно, что термоклин располагается в слое 10—40 м. В качестве характерной поверхности выбирается изотерма, соответствующая среднему положению слоя скачка (на рис. 2 такая изотерма расположена на глубине около 17 м).

Вариации положения этой изотермы во времени позволяют оценивать высоту и период каждой из проходящих ВВ через точку наблюдения. 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. При определении ВВ рассматриваются колебания изотерм с высотой более 1 м. Отметим, что периоды всех рассматриваемых волн лежат в интервале 5—60 мин. Статистическое обобщение их характеристик позволяет оценить повторяемость и обеспеченность волн разной высоты.

На рис. 2, в течение первых двух часов наблюдений термоклин не испытывает значительных колебаний, а начиная со 120 по 240 мин наблюдения, в слое скачка прослеживается прохождение нескольких цугов КВВ с периодами 10—20 мин и высотой 2—6 м.

Отметим, что в данной работе используются характеристики КВВ в Белом море, ранее опубликованные в работах [9, 10]. Результаты обработки инструментальных измерений характеристик ВВ в Баренцевом море публикуются впервые.

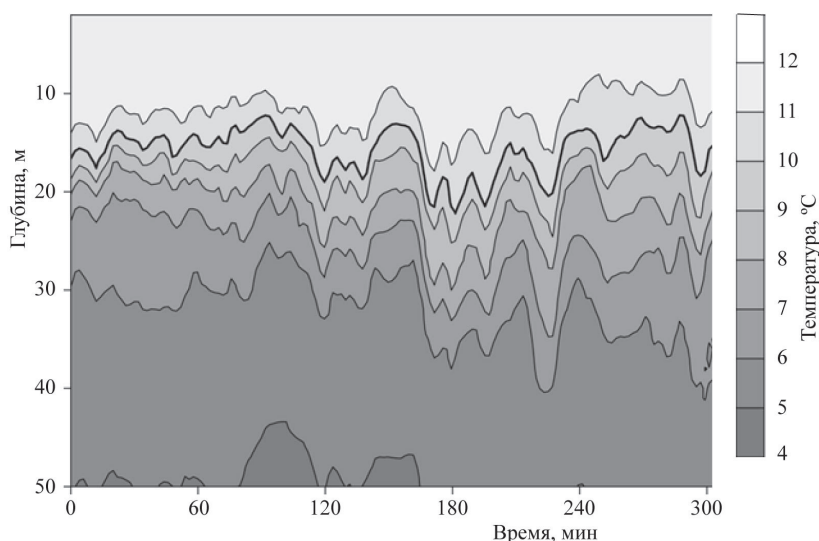


Рис. 2. Пример записи колебаний температуры (Баренцево море, с 17:07 23.08.2016 по 23:37 23.08.2016). Измерения выполнялись с помощью CTD-зонда Cast Away. Положение термоклина обозначено темной линией.

Fig. 2. Example of record of temperature fluctuations (the Barents Sea, from 17:07 23.08.2016 to 23:37 23.08.2016). The measurements were performed using the Cast Away CTD sonde. The position of the thermocline is indicated by a dark line.

Высоты внутренних волн. Некоторые полученные статистические характеристики высот КВВ по районам и годам представлены в табл. 1. Видно, что за сутки на каждом полигоне наблюдается 50—150 волн, которые в среднем имеют высоты 2—6 м. Наибольшее количество ВВ с максимальными высотами было зарегистрировано на полигонах около Соловецких островов, а наименьшее количество с минимальными высотами — на Южной границе Горла. Причины такого различия обсуждаются в следующем разделе. Характеристики ВВ зарегистрированных в Баренцевом море имеют средние, по сравнению с двумя Беломорским районами, значения.

Представление о распределении высот внутренних волн дают гистограммы повторяемости. Для примера, на рис. 3 показана характерная гистограмма повторяемости высот волн. Для оценки вероятности появления волн экстремальной высоты важно знать, какому теоретическому закону подчиняются результаты инструментальных измерений высот ВВ. Информацию об этом можно получить, рассчитав теоретическое распределение некоторого, априорно заданного закона, используя статистические характеристики эмпирических данных. Статистическая значимость расхождения между эмпирическими данными и теоретическим законом, оценивается путем расчета критерия χ^2 и сравнения его с критическим

Таблица 1

Статистические характеристики высот внутренних волн в Белом и Баренцевом морях

№ полигона	Год выполнения	Количество КВВ за день, шт.	Средняя высота КВВ, м	Максимальная высота КВВ, м
А-1	2010	92	5.6	17.9
	2011	80	3.7	13.9
	2012	114	2.2	7.7
	2013	96	2.2	7.6
А-2	2012	162	2.6	9
А-3	2012	136	2.5	8.3
	2014	140	4.5	15
Б-1	2012	114	2.5	7.6
Б-2	2014	50	1.8	7
В-1	2016	74	3.2	8.1

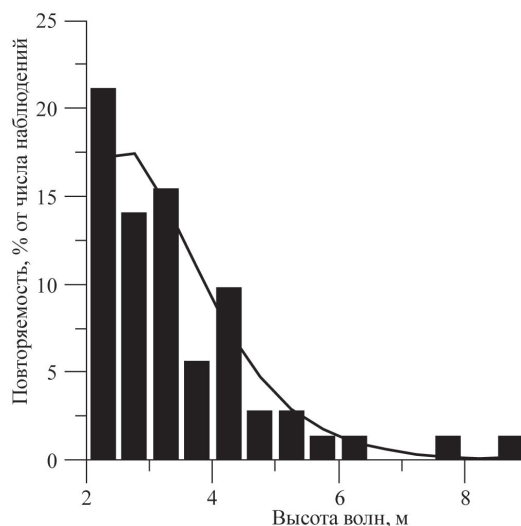


Рис. 3. Гистограмма повторяемости внутренних волн на полигоне А-1 в 2013 г. (линией показано теоретическое распределение).

Fig. 3. Histogram of the recurrence of internal waves at the polygon A-1 in 2013 (the line shows the theoretical distribution).

значением $\chi_{кр}^2$. Если выполняется неравенство $\chi^2 > \chi_{кр}^2$, то расхождение между теоретическим и эмпирическим критерием статистически значимо, и эмпирические данные не подчиняются выбранному закону [16]. Распределение высот волн на данном полигоне подчиняется логарифмически нормальному закону. Об этом свидетельствует то, что χ^2 меньше $\chi_{кр}^2$ (0.83 против 6.57).

Результаты измерений в Баренцевом море сопоставляли с результатами других исследований. Установлено их удовлетворительное соответствие с результатами других экспедиционных наблюдений, так в [17] описывается регулярное появление вблизи северного берега Кольского полуострова цугов КВВ высотой 7—12 м. По данным моделирования [18] для данного района Баренцева моря описывается возможность появления нелинейных ВВ с максимальными высотами 6—15 м. Наличие столь значительных ВВ предопределяет важность оценок их вероятностных характеристик.

Частота повторяемости экстремальных волн. Принимая предположение о постоянстве действующих волнообразующих факторов за теплый сезон, полученные данные о высотах ВВ открывают возможность на основе их интегральной частоты повторяемости дать оценки вероятности появления ИВВ.

Согласно [14], данные о ВВ обрабатываются по следующему алгоритму.

1. Оценивается повторяемость и обеспеченность высот волн (h) для каждого полигона за каждый год наблюдений.

2. Выполняется оценка логарифма отношения обеспеченности к времени записи на данном полигоне – $\ln(N/T)$.

3. Зависимость $\ln(N/T)$ от h аппроксимируется линейной функцией для каждого полигона.

4. Путем экстраполяции полученной аппроксимации находят высоты волн, превышаемые 1 раз за период времени от 1 дня до 3 мес. (теплый период года).

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов детерминации, которые служат мерой качества полученных аппроксимаций. Все коэффициенты близки к единице. Это говорит о хорошем качестве полученных аппроксимаций.

Результаты оценки вероятности появления ИВВ представлены в табл. 3. Максимальная за теплый период высота внутренней волны составляет 32 м и ожидается в Западной Соловецкой салме (на полигоне А-1) по данным 2010 г., когда и в контактных наблюдениях проявляются интенсивные внутренние волны высотой до 18 м. Однако, как было показано ранее, значения наблюдаемой высоты волн около Соловецких островов подвержено сильной межгодовой изменчивости. Например, по данным 2012 г., раз за теплый период ожидается волна высотой лишь 12 м. По-видимому, изменчивость наблюдаемых и

Анализ качества аппроксимаций

№ полигона (год)	А-1 (2010)	А-1 (2011)	А-1 (2012)	А-1 (2013)	А-2 (2012)	А-3 (2012)	А-3 (2014)	Б-1 (2012)	Б-2 (2014)	В-1 (2016)
R^2	0,97	0,96	0,99	0,99	0,96	0,97	0,98	0,97	0,98	0,97

Ожидаемые высоты внутренних волн в метрах, превышаемые 1 раз за указанный период времени, и данные натурных наблюдений

№ полигона (год)	Время, за которое высота волны будет превышена 1 раз					Max h по набл., м
	1 день	10 дней	30 дней	60 дней	90 дней	
А-1 (2010)	17	24	28	30	32	18
А-1 (2011)	15	22	26	28	29	14
А-1 (2012)	7	10	11	12	12	8
А-1 (2013)	8	11	12	13	13	8
А-2 (2012)	9	13	14	15	16	10
А-3 (2012)	10	15	17	18	19	9
А-3 (2014)	14	20	23	25	26	15
Б-1 (2012)	6	8	9	9	9	6
Б-2 (2014)	7	9	11	12	12	7
В-1 (2016)	8	9	10	11	13	8

ожидаемых высот ВВ можно связать с межгодовой изменчивостью интенсивности и глубины залегания пикноклина. Согласно [10], в данном районе Белого моря отмечается значительная межгодовая изменчивость интенсивности слоя скачка гидрофизических характеристик. Резкий пикноклин (до 0.16 у.е./м) отмечен по данным наблюдений, выполненных в августе аномально жаркого 2010 г., а наименее интенсивный скачок (до 0.08 у.е./м) был зарегистрирован в середине июля 2012 г.

Минимальная за теплый период года высота внутренней волны ожидается южнее Горла Белого моря (на полигоне Б-1), и составляет 9 м. В Баренцевом море (полигон В-1) ожидаются волны, занимающие промежуточное положение между выше описанными районами. ИВВ с высотами более 10 м ожидается не чаще одного раза в месяц. Также, анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что для всех полигонов выполняется следующая закономерность: при увеличении рассматриваемого периода, ожидаемая высота внутренних волн монотонно возрастает. Степень монотонности возрастания зависит от начальных характеристик наблюдаемых волн. В целом, результаты оценки повторяемости хорошо подтверждаются контактными измерениями, расхождение зарегистрированных за сутки и спрогнозированных высот внутренних волн не превышает 1 м. Учитывая, что высоты внутренних волн на записях колебаний температуры измеряются с точностью до 1 м, стоит указать, что ожидаемые высоты внутренних волн также рассчитываются с точностью до метра. К сожалению, на данный момент отсутствует возможность получить более точные значения ошибок расчета повторяемости появления ИВВ из-за отсутствия продолжительных контактных измерений.

В ходе работы обработано порядка 310 ч временных разверток колебаний температуры в области термоклина на 6 полигонах в трех районах на акватории Белого и Баренцева морей, выделенных ранее по данным дистанционных наблюдений. На записях, полученных в летние сезоны 2010—2016 гг., было идентифицировано более 1000 КВВ высотами 1—17 м. На основании функции распределения высот внутренних волн выполнена оценка вероятности появления интенсивных внутренних для периодов времени 1 день, 3 дня, 10 дней, 1, 2, 3 мес.

В результате работы показано, что в районе около Соловецких островов, ИВВ с высотами более 10 м наблюдаются ежедневно, что подтверждается данными наблюдений. Один раз за сезон в условиях резко выраженного пикноклина ВВ в районе Восточной Соловецкой Салмы может достигать высоты 30 м. На южной границе пролива Горло (Белое море) и севернее Кольского полуострова (Баренцево море) ИВВ высотой более могут наблюдаться не чаще одного раза в месяц.

Авторы благодарны Т. Г. Талиповой за идею исследования и искренне признательны А. А. Родионову за постоянную всестороннюю поддержку в ходе многолетних исследований.

Данные для работы получены и обработаны при поддержке гранта РФФИ № 15-05-04639_a. Прогнозирование экстремальных значений характеристик волн выполнено при поддержке гранта РФ «Мировой океан в XXI в.: климат, экосистемы, ресурсы, катастрофы» № 14-50-00095.

References

1. Abuzyarov Z. K., Dumanskaya I. O., Nesterov E. S. Operational oceanographic support. *M., IG-SOCIN*, 2009. 287 p. (in Russian).
2. Gruzinov V. M., Borisov E. V., Grigor'ev A. V. Applied Oceanography. *M.*, 2012. 382 p. (in Russian).
3. Slutskaya M. Z. Numerical definition of hydrodynamic reactions acting on a submarine object under conditions of internal waves. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2009, 2, 1, 71—77 (in Russian).
4. Rodionov A. A., Semenov E. V., Zimin A. V. The development of a system of monitoring and forecast of hydrophysical fields of the marine environment in the interests of ensuring secrecy and protection of ships. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2012, 5, 2 (in Russian).
5. Surface and internal waves in Arctic seas / I. V. Lavrenova, E. G. Morozova. SPb., Gidrometeoizdat, 2002. 363 p. (in Russian).
6. Serebryanyj A. N., Pao K. P. The passage of a nonlinear internal wave through the point of turnover on the shelf. *Doklady akademii nauk*. 2008, 420, 4, 543—547 (in Russian).
7. Sabinin K. D., Serebryanyj A. N. Hot points in the field of internal waves in the ocean. *Akusticheskij Zhurnal*. 2007, 53, 3, 410—436 (in Russian).
8. Kozlov I. E., Kudryavcev V. N., Zubkova E. V., Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Chapron B., Myasoedov A. G. Areas of generation of nonlinear internal waves in the Barents, Kara and White seas from data of satellite SAR measurements. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2014, 11, 4, 338—345 (in Russian).
9. Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B. Monitoring of short-period internal waves in the White sea. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2015, 5, 51—61 (in Russian).
10. Zimin A. V., Rodionov A. A., Zhegulin G. V. Short-period internal waves on the shelf of the White sea: a comparative analysis of observations in different districts. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2013, 6, 3, 19—33 (in Russian).
11. Zimin A. V. Regularities of submesoscale processes and phenomena in the White sea. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2016, 44, 104—120 (in Russian).
12. Jia-Xun Li, Ren Zhang, Bao-Gang Jin, Hui-Zan Wang. Possibility estimation of generating internal waves in the northwest Pacific ocean using the fuzzy logic technique. *Journal of Marine Science and Technology*. 2011, 20, 2, 237—244.
13. Talipova T. G. Statistics and forecast of intense internal waves. Pripoverhnostnyj sloj okeana. *Fizicheskie Processy i Distancionnoe Zondirovanie*. 1999, 1, 204—219 (in Russian).
14. Ivanov V. A., Pelinovskij E. N., Talipova T. G. The frequency of occurrence of intense internal waves. *Doklady AN SSSR*. 1991, 318, 6, 1470—1471 (in Russian).
15. Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR's seas. V. 2. White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions / Gluhovskij B. H. L.: *Gidrometeoizdat*, 1991. 240 p. (in Russian).
16. Gordeeva S. M. A workshop on the subject of statistical methods of processing of hydrometeorological information. *SPb., RGGMU*, 2010. 48 p. (in Russian).
17. Serebryanyj A. N. Internal waves in the coastal zone of the Barents sea. Poverhnostnye i vnutrennie volny v arkticheskikh moryah. *SPb., Gidrometeoizdat*. 2002. 363 p. (in Russian).
18. Talipova T. G., Terleckaya 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).