

УДК 551.466.82

© А. В. Зимин¹, Е. И. Свергун^{1,2}

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
zimin2@mail.ru

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ШЕЛЬФОВЫХ РАЙОНАХ БЕЛОГО, БАРЕНЦЕВА И ОХОТСКОГО МОРЕЙ: ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЫСОТ И ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРИДОННОМ СЛОЕ

Статья поступила в редакцию 24.03.2018, после доработки 11.05.2018.

В работе обсуждаются результаты наблюдений за высотами короткопериодных внутренних волн проводившиеся в летние сезоны 2010—2017 гг. Работы выполнялись в Западной Соловецкой Салме, на границе Бассейна и пролива Горло, в Двинском заливе Белого моря; около острова Харлов, около мыса Териберский в Баренцевом море; около мыса Свободный, над бровкой шельфа около Курильской котловины в Охотском море. Длительность измерений в каждом районе варьировалась от 25 до 80 ч. Установлено, что наибольшую повторяемость везде имеют волны высотой 1—3 м. Интенсивные внутренние волны (высотой более 10 м) регулярно наблюдаются в районах Западной Соловецкой Салмы в Белом море и около мыса Свободный в Охотском море. В предположении о стационарности волнообразующих факторов выполнены оценки вероятности появления экстремальных внутренних волн, которые могут наблюдаться один раз за месяц в течение теплого сезона. Установлено, что интенсивные внутренние волны могут наблюдаться во всех морях, а в Белом и Охотском морях высоты экстремальных волн раз в месяц могут превышать 15 м. Для районов, где регистрируются волны с экстремальными высотами, произведен расчет скорости придонного течения и вариаций придонного давления. Найдено, что вариации придонного давления, вызванные экстремальными внутренними волнами, составляют 120—380 Па, а скорости течения, индуцируемые волнами от 7 до 17 см/с. Соответственно, вариации придонного давления не окажут существенного воздействия на морские сооружения, а течения, связанные с экстремальными внутренними волнами способны размывать илистые и песчаные грунты. Однако действуя совместно с приливными, такие течения могут способствовать значительному транспорту наносов, что может оказать влияние на устойчивость подводных гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: внутренние волны, контактные измерения, оценка ожидаемых высот, скорость придонного течения, вариации придонного давления, шельф, Белое море, Баренцево море, Охотское море.

A. V. Zimin¹, E. I. Svergun^{1,2}

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Russian state hydrometeorological university, St.-Petersburg, Russia

SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES IN THE SHELF AREAS OF THE WHITE, BARENTS AND OKHOTSK SEAS: ESTIMATION OF THE EXTREME HEIGHTS OCCURRENCE AND DYNAMIC EFFECTS IN THE BOTTOM LAYER

Received 24.03.2018, in final form 11.05.2018.

This paper discusses the results of observations of the height of short-period internal waves conducted in summer seasons of the years 2010—2017. The work was carried out in the Western Solovetskaya Salma, on the border of the Basin and the Gorlo Strait, in the Bay of Dvina in the White Sea; near Harlow Island, the island of Harlov, near Cape Teribersky in the Barents Sea; near Cape Svobodny, above the shelf break near the Kuril Basin in the Okhotsk Sea. The duration of measurements

Ссылка для цитирования: Зимин А. В., Свергун Е. И. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 66—72.

For citation: Zimin A. V., Svergun E. I. Short-period internal waves in the shelf areas of the White, Barents and Okhotsk Seas: estimation of the extreme heights occurrence and dynamic effects in the bottom layer. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 2, 66—72.

doi: 10.7868/S2073667318040081

in each area varied from 25 to 80 hours. It is established that waves' heights have everywhere the highest repeatability 1—3 meters. Intensive internal waves (higher than 10 meters) are regularly observed in the areas of Western Solovetskaya Salma in the White Sea and near cape Svobodny in the Okhotsk Sea. Estimates of the probability of occurrence of extreme internal waves, which can be observed once a month during the warm season, are made in the assumption of the steady-state of wave-forming factors. It is established that intensive internal waves can be observed in all seas, and in the White and the Okhotsk Seas the heights of extreme waves can exceed 15 meters once a month. For areas where waves with extreme heights were recorded, the calculation of the bottom flow velocity and variations of bottom pressure were made. It is found that the variations of bottom pressure caused by extreme internal waves varies from 120 to 380 Pa, and flow velocities induced by waves vary from 7 to 17 cm/s. Accordingly, variations of the bottom pressure will not have a significant impact on offshore structures, and flow associated with extreme internal waves are able to erode silt and sand soils. However, working together with tidal flows, such flows can contribute to significant transport of sediment, which can have an impact on the stability of underwater hydraulic structures.

Key words: internal waves, contact measurements, the estimation of expected heights, the structure of water, the speed of bottom currents, variations of bottom pressure, shelf, the White Sea, the Barents Sea, the Okhotsk Sea.

Новые морские нефтегазоносные месторождения и развитие транспортной инфраструктуры арктических и дальневосточных морей в последнее десятилетие становятся важнейшим стратегическим ресурсом, во многом определяющим перспективы развития России [1]. Однако хозяйственная деятельность в Арктике и на Дальнем Востоке во многом зависит от особенностей гидрометеорологических условий. В частности, за последнее десятилетие в арктических морях наблюдается интенсивное сокращение площади льда [2]. Интенсивное таяние льдов приводит к тому, что более теплая, пресная и, стало быть, менее плотная вода, скапливаясь в верхнем слое, препятствует проникновению тепла в нижние слои. Это трансформирует в целом стратификацию вод, в результате чего, согласно модельным расчетам, выполненным для Баренцева моря [3], происходит усиление волновой динамики, выражающееся в увеличении числа мод и амплитуд внутренних волн.

Экспериментальные исследования последних десятилетий в Белом, Баренцевом и Охотском морях показывают, что в шельфовой зоне указанных морей регулярно наблюдаются короткопериодные внутренние волны (КВВ) [4—6]. КВВ — это волны с периодами от единиц до десятков минут и длинами от сотен метров до единиц километров. Иногда они представляют собой интенсивные внутренние волны (ИВВ), которые получили свое название из-за значительных высот (более 10 м). Известно, что ИВВ могут отрицательно влиять на управляемость подводных лодок [7] и оказывать влияние на морские платформы, установленные на шельфе [8]. В нашей стране эффекты влияния КВВ на устойчивость морских сооружений не регламентируются и не рассматриваются в практике инженерных изысканий [9, 10]. Хотя существуют теоретические проработки этой проблемы [11, 12], в которых описываются динамические эффекты, возникающие под влиянием ИВВ. Однако для получения числовых оценок возможных эффектов, связанных с КВВ в шельфовых районах, где могут быть построены морские гидротехнические сооружения, требуются иметь сведения об экстремальных характеристиках внутреннего волнения.

Обобщение данных наблюдений за характеристиками КВВ, выполненных в 2010—2016 гг. по единой методике [4] в прибрежных районах Баренцева и Белого морей позволило впервые для данных морей, на основании функции распределения высот внутренних волн выполнить оценки вероятности появления экстремальных ИВВ на различных временных интервалах [13]. Наблюдения за КВВ были продолжены в 2017 г. на акваториях Баренцева и Охотского морей. Таким образом, цель данной работы — обобщение данных наблюдений за КВВ в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей в 2010—2017 гг., оценка максимальных высот волн и возможных экстремальных динамических эффектов в придонном слое связанных ними.

Описание методики измерений и обработки данных. Основа методики работ в 2010—2017 гг. — проведение учащенных измерений (сканирований) на полигонах с заякоренного судна при глубине места менее 80 м, или дрейфующего судна при больших глубинах места наблюдения. Измерения выполнены от поверхности до глубин около 45—50 м, а при меньших глубинах — до дна. Один цикл сканирований занимает 1—2 мин. Длительность измерений в каждом полигоне варьируется от 25 до 80 ч.

Исследования в Белом море произведены: в июле—августе 2010 г. на полигоне в Западной Соловецкой Салме (ЗСС), в июле 2012 г. на полигоне в проливе Горло (ПГ), в июле 2014 г. на полигоне

в Двинском заливе (ДЗ). Измерения выполнены CTD-зондами CTD-90М и SBE-25. Работы произведены с заякоренного судна. Продолжительность непрерывных измерений на каждом полигоне — 25—36 ч.

Работы в Баренцевом море произведены: в августе 2016 г. на полигоне около остова Харлов (ОХ), в августе 2017 г. на полигоне около мыса Териберский (МТ). Измерения выполнены CTD-зондами SBE-25, CastAway и гирляндой термисторов РМЕ. Работы выполнены с судна, лежащего в дрейфе. Продолжительность эпизодических записей составляет 5—15 ч в сутки. Длительность измерений на полигоне ОХ около 80 ч, на полигоне МТ — 64 ч.

Работы в Охотском море произведены в сентябре 2017 г. на полигоне около мыса Свободный (МС) и на полигоне над бровкой шельфа около Курильской котловины (КК). Измерения выполнены CTD-зондом SBE-25 и гирляндой термисторов РМЕ. На полигоне МС измерения выполнены с заякоренного судна. Над бровкой шельфа около Курильской котловины записи произведены с судна, лежащего в дрейфе. Продолжительность эпизодических записей составляет 6—18 ч в сутки. Длительность измерений на полигоне МС составила 66 ч, на полигоне КК — 37 ч.

Общей особенностью для всех рассмотренных полигонов являлось наличие вертикального распределения вод близкого по своим характеристикам к двухслойной структуре. В качестве примера на рис. 1 показан вертикальный профиль температуры и плотности по данным зондирования на полигоне МТ в Баренцевом море, где верхний 20-ти метровый квазиоднородный слой отделен от основной толщи вод, с мало меняющимися характеристиками плотности, слоем скачка толщиной в несколько метров с перепадом характеристик по плотности более 0.2 у.е/м и по температуре более 1 °С/м. На всех остальных полигонах наблюдалась аналогичная картина: верхний слой имел толщину 10—30 м и был отделен от нижележащих вод относительно тонким и ярко выраженным слоем скачка, при этом положение термоклина и пикноклина совпадало. Вследствие этого вертикальные вариации во времени положения выделенной в области термоклина изотермы во времени позволяют оценить высоту каждой из проходящей через полигон внутренней волны.

Методика расчета высоты внутренних волн по данным наблюдений подробно описана в работе [14], согласно которой рассматривались волны с периодами 5—60 мин и высотами более 1 м. Методика оценки ожидаемых экстремальных высот КВВ по данным функции распределения описана в работе [15]. В настоящей работе расчет ожидаемых высот КВВ выполнен для периода времени в 30 сут, в предположении стационарности волнообразующих факторов и сохранения стабильности основных характеристик вертикальной структуры вод.

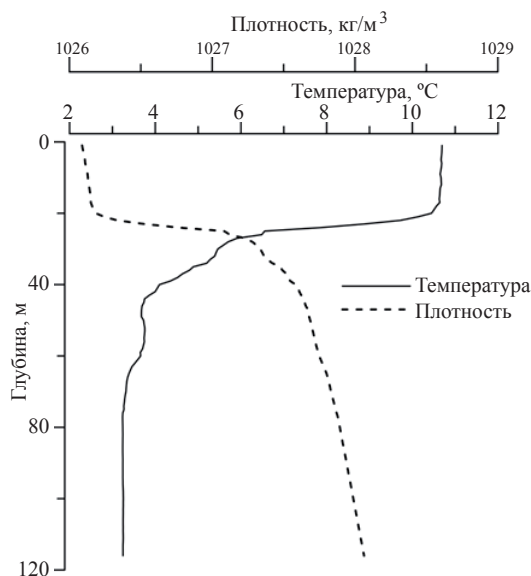


Рис. 1. Вертикальный профиль температуры и плотности на полигоне около мыса Териберский в Баренцевом море по данным CTD-зондирования 21.08.2017 г.

Fig. 1. Vertical profile of temperature and density at the polygon near Cape Teribersky in the Barents Sea according to CTD-sensing in 2017 august 21.

Отметим, что результаты наблюдений, выполненных в 2010—2016 гг., представлены в работах [13, 16], а из данных 2017 г. будут рассмотрены только распределение высот КВВ в соответствии с целевой установкой данной статьи. Комплексный анализ результатов измерений 2017 г. будет представлен в следующих работах.

Как показано на рис. 1, вертикальное распределение плотности вод в районах полигонов с высокой степенью точности соответствует двухслойному. Согласно [11], вариации придонного давления, вызванные внутренними волнами, рассчитываются в соответствии с выражением:

$$P' = \frac{\eta}{h_2} \rho_0 c^2,$$

где P' — вариации давления в придонном слое, вызванные внутренними волнами, η — амплитуда внутренней волны, h_2 — толщина слоя под пикноклином, ρ_0 — средняя по вертикали плотность воды, c — фазовая скорость внутренних волн, определяемая исходя из дисперсионного соотношения в двухслойном приближении [17].

Скорость придонного течения, по [11] вызванного внутренними волнами, рассчитывается в соответствии с выражением:

$$u_2 = c \frac{\eta}{h_2 + \eta},$$

где u_2 — скорость течения в придонном слое, вызванная внутренними волнами.

Результаты наблюдений за высотами КВВ в 2017 году. Характеристики КВВ по данным наблюдений на одном полигоне в Баренцевом море и на двух полигонах в Охотском море приведены в табл. 1. Наибольшее количество волн было зарегистрировано в Баренцевом море, хотя временная перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования короткопериодных колебаний с высотой более 1 м к общему времени наблюдения в Баренцевом море и в Охотском море на полигоне МС была близка и превышала 70 %.

Во всех районах наблюдается преобладание внутреннего волнения высотой до 5 м. Наибольшую повторяемость на всех полигонах имеют КВВ с высотами 1—2 м. Значения максимальной высоты КВВ на полигонах сильно разнятся. В Баренцевом и в Охотском морях над склоном Курильской котловины, где полигоны удалены на 15—20 миль от берега и глубины варьируются от 150 до 200 метров высота КВВ лежит в пределах 6—7 м. В Охотском море на полигоне около мыса Свободный который располагается в нескольких милях от берега, а средняя его глубина не превышает 80 м,

Таблица 1

Характеристики повторяемости высот КВВ по данным измерений, выполненных в 2017 году

Occurrence characteristics of the intense internal waves heights according to the measurements made in 2017

Высота КВВ, м		Число случаев, шт.		
От	До	Баренцево (МТ)	Охотское (МС)	Охотское (КК)
1	2	246	87	77
2	3	87	54	51
3	4	36	40	18
4	5	14	19	2
5	6	2	8	0
6	7		3	2
7	8		5	
8	9		1	
9	10		0	
10	11		1	
11	12		1	
Общее число КВВ, шт.:		385	219	150

зарегистрированы КВВ с высотами до 12 м. Эти волны можно уверенно отнести к ИВВ. Стоит отметить, что основной особенностью проявления КВВ на данном мелководном полигоне было то, что они, как правило, распространяются в виде цугов по 3—6 волн. При этом максимальную высоту имеет лидирующая волна в цуге.

Обобщение данных наблюдений и оценка экстремальных волн. Результаты обработки данных наблюдений за КВВ представлены в табл. 2.

Высота наблюдаемых на полигонах КВВ колеблется в широких пределах от 1 до 28 метров. Из общего ряда наблюдений выделяются два полигона: ЗСС в Белом море и МС в Охотском море, на которых регистрируются ИВВ. Наибольшую повторяемость на данных полигонах имеют КВВ высотой 1—3 м, которые составляют 35—40 % от общего числа наблюдаемых волн. ИВВ на данных полигонах составляют 5—10 % от общего количества волн. Стоит отметить, что на полигоне в Западной Соловецкой Салме регулярно проявляются ИВВ с высотами 10—18 м. Как правило, они регистрируются в виде цуговых систем, состоящих из 3—4 волн. На полигоне около мыса Свободный, ИВВ тоже, как правило, регистрируются в составе цуга.

На остальных полигонах ИВВ не регистрируются. Высота волн на данных полигонах варьируется от 1 до 8 метров, в среднем составляя 2.5 м. Наибольшую повторяемость имеют волны высотой 1—3 м, которые составляют 35—60 % от всех зарегистрированных волн. Повторяемость волн максимальной высоты здесь не превышает 4 %.

Как видно из табл. 2, ИВВ раз в месяц в летних условиях следует ожидать в Белом море в Западной Соловецкой Салме и в Двинском Заливе, в Баренцевом море около остова Харлов и в Охотском море около мыса Свободный. Экстремальные ИВВ ожидаются на полигонах ЗСС и МС.

Для двух полигонов с экстремальными ожидаемыми высотами КВВ произведен расчет динамических эффектов в придонном слое. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что вариации придонного давления, создаваемые ИВВ, не достигают 0.4 кПа, что в гидростатическом приближении сопоставимо с воздействием поверхностной волны высотой несколько сантиметров. В работе [18] указывается, что типичные значения волнового давления, при высоте поверхностной волны 3 м, на вертикальные стенки гидротехнических сооружений колеблются в пределах от 3 до 12 кПа, что более чем на один-два порядка превосходит оценки вариаций, связанных с ИВВ. Это позволяет утверждать, что вариации придонного давления, вызванные прохождением ИВВ с экстремальной высотой, не окажут существенного воздействия на опоры морских гидротехнических сооружений.

В [9] вводится понятие неразмывающей скорости придонного течения — такой скорости, которая не приводит к размыву грунта некоторой крупности. В соответствии с [9], придонное течение, генерируемое внутренней волной экстремальной высоты в Белом море, способно приводить к размыву грунта крупностью до 0.4 мм, а течение в Охотском море будет размывать грунт крупностью до 0.3 мм. То есть воздействие течений, индуцируемых экстремальными внутренними волнами на илистые

Таблица 2

Первичные статистические характеристики и ожидаемые за 30 дней высоты КВВ

Primary statistical characteristics and expected within 30 days heights of intense internal waves

Море (полигон)	Высота КВВ, м			Число КВВ наиб. повторяемости, %	Ожидаемая высота (h), м
	Ср.	Макс.	Наиб. повторяемости		
Белое (ЗСС)	6	18	2÷3	35	28
Белое (ПГ)	2,5	8	2÷3	40	8
Белое (ДЗ)	2	7	2÷3	35	11
Баренцево (ОХ)	3	8	2÷3	60	10
Баренцево (МТ)	2	5	1÷2	60	8
Охотское (КК)	2	7	1÷2	50	9
Охотское (МС)	3	11	1÷2	40	15

Таблица 3

Динамические эффекты в придонном слое, индуцируемые внутренними волнами с максимальными ожидаемыми высотами

Dynamic effects in the bottom layer induced by internal waves with maximum expected heights

Полигон (море)	Входные характеристики					P' , Па	u_2 , м/с
	h , м/с	c , м/с	h_2 , м	η , м	ρ_0 , кг/куб.м		
Белое (ЗСС)	28	0.46	25	14	1020.48	379	0.17
Охотское (МС)	15	0.55	58	7.5	1026.05	126	0.07

и песчаные грунты, способно приводить к их размыву. Если принять во внимание, что скорость приливных течений, например в Западной Соловецкой Салме, могут достигать 60 см/с [4], и предположить, что такие течения действуют регулярно и совместно с эффектами от ИВВ, то тогда, в соответствии с [9], можно ожидать размыв грунта крупностью до 8 мм, то есть мелкого каменистого грунта. Учитывая, что на шельфе исследуемых морей широко распространены вышеуказанные грунты, совместное действие приливов и ИВВ, которые также появляются с приливной периодичностью, приводит к высокой вероятности размыва грунта вблизи опор гидротехнических сооружений. Чтобы в дальнейшем обеспечить безопасную эксплуатацию морских гидротехнических сооружений на шельфе Белого и Охотского морей, инженерные изыскания перед гидротехническим строительством должны включать исследования характеристик КВВ.

В заключение необходимо отметить, что по характеристикам КВВ в шельфовых районах морей России получено уже значительное количество данных, но до сих пор они недостаточно проанализированы с точки зрения инженерной океанологии. Настоящая работа представляет собой одну из первых попыток такого анализа.

По результатам обработки обширного массива данных экспедиционных наблюдений в Белом, Баренцевом и Охотском морях, сформировано представление о наблюдаемых и ожидаемых высотах короткопериодных внутренних волн. Во всех рассмотренных районах наибольшую повторяемость имеют КВВ высотой 1—3 м. ИВВ проявляются регулярно в Белом море на полигоне в Западной Соловецкой Салме и в Охотском море на полигоне около мыса Свободный. На данных полигонах один раз за летний месяц ожидаются экстремальные ИВВ (с высотами 28 и 15 м соответственно). По результатам оценки динамических эффектов в придонном слое, создаваемых ожидаемыми экстремальными ИВВ, показано, что вариации придонного давления не будут оказывать существенного воздействия на морские сооружения. Придонное течение, индуцируемое ИВВ, может достигать 17 м/с и способно размывать илистые и песчаные грунты. В случае совместного действия приливного течения и ИВВ может наблюдаться размыв мелкого каменистого грунта, размером до 8 мм.

Полученные оценки характера влияния ИВВ на транспорт морских наносов показали, что его необходимо учитывать при проведении изысканий перед гидротехническим строительством на мелководных участках шельфа с ярко выраженной стратификацией вод, особенно в приливных морях для обеспечения последующей безопасности сооружаемых объектов.

Исследование в части обобщения данных наблюдений за КВВ и оценки максимальных волн выполнено в рамках государственного задания по теме №0149-2018-0014 «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натурных экспериментальных работ». Исследование в части оценки возможных экстремальных динамических эффектов в придонном слое связанных волнами выполнено при поддержке гранта РНФ «Мировой океан в XXI в.: климат, экосистемы, ресурсы, катастрофы» № 14-50-00095.

Литература

1. Грамберг И. С. Арктический шельф — будущее нефтегазовой промышленности России / Грамберг И. С., Супруненко О. И. // Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии). СПб.: Наука, 2000. С. 133—144.

2. Жичкин А. П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 55—64.
3. Гордеева С. М. Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн / Гордеева С. М., Сафрай А. С., Ткаченко И. В. // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-история, 2014. С. 211—213.
4. Зимин А. В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология Т. 53, № 3. 2013. С. 293—303.
5. Серебряный А. Н. Внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях, СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 363 с.
6. Navrotsky V. Internal waves space structure in shelf zones of the far eastern seas / Navrotsky V., Pavlova E. // Pacific oceanography. 2010. V. 5, N 1. P. 65—76.
7. Разуменко Ю. К. К вопросу об эксплуатации подводных лодок в различных гидрологических условиях / Разуменко Ю. К., Родионов А. А., Шевяков М. Ю. // Морской сборник. 2016. Т. 2, № 4. С. 40—46.
8. Fraser N. Surfing an oil rig // Energy Rev. 1999. V. 20, N 4. P. 4—6.
9. Свод правил СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Москва. 2012. 116 с.
10. Ключков Е. Ю. Инженерная океанология. Учебное пособие. СПб.: Изд. РГГМУ, 1999. 294 с.
11. Тюгин Д. Ю. Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами / Тюгин Д. Ю., Наумов А. А., Куркина О. Е., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 20—28.
12. Song Z. J. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses / Song Z. J., Teng B., Gou Y // Applied Ocean Res. 2011. V. 33. P. 120—129.
13. Свергун Е. И. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований / Свергун Е. И., Зимин А. В. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 13—19.
14. Жегулин Г. В. Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным / Жегулин Г. В., Зимин А. В., Родионов А. А. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 4. С. 47—59.
15. Талипова Т. Г. Статистика и прогноз интенсивных внутренних волн // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. 1999. Т. 1. С. 204—219.
16. Зимин А. В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 104—120.
17. Зимин А. В. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. / Романенков Д. А., Козлов И. Е., Шапрон Б., Родионов А. А., Атаджанова О. А., Мясоедов А. Г., Коллар Ф. // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41—55.
18. Лещенко С. В. Гидродинамические нагрузки от морских волн на горизонтальные элементы причалов с волногасящими камерами / Лещенко С. В., Макаров К. Н. // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 144—151.