

ЭКСПЕДИЦИИ

© А. В. Зимин^{1,2}, Д. А. Романенков¹, А. А. Родионов¹, Г. В. Жегулин¹, М. А. Родионов¹

¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zimin@rshu.ru

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ БЕЛОГО МОРЯ В АВГУСТЕ 2013 г.

Представлены предварительные результаты экспедиционных работ по исследованию изменчивости гидрологических полей в течение полусуточного приливного цикла в глубоководном и шельфовом районах Белого моря, сочетающие измерения на разрезах и полигонах. Гидрологические разрезы позволили выявить смещение более чем на 10 км положения структурного фронта под влиянием прилива. По данным учащенных серий СТД-измерений на полигонах установлены существенные различия в характере внутреннего волнения в исследуемых районах.

Крупномасштабная и синоптическая изменчивость гидрофизических полей в Белом море к настоящему времени достаточно хорошо изучены [1—3]. Вместе с тем закономерности протекания мелко- и мезомасштабных (субмезомасштабных) процессов исследованы недостаточно подробно [2]. Одни из первых целенаправленных экспериментов по изучению короткопериодных внутренних волн (ВВ) и тонкой структуры вод Белого моря проведены в 2006 г. [4, 5]. По результатам натурных работ в последующих годах было установлено [6, 7], что в ряде мелководных районов Белого моря в летний период проявляются интенсивные короткопериодные ВВ каждый приливной цикл. В частности, северо-восточнее Соловецких островов в мористой части Западной Соловецкой салмы периоды ВВ составляют в среднем 20 мин, а их высота может достигать более чем 15 м. Известные численные модели внутреннего прилива в Белом море [8, 9] не позволяют воспроизвести процессы с такими характеристиками. Согласно [9], одним из возможных районов генерации ВВ приливного периода является участок границы шельфа и глубокого бассейна, расположенный севернее Соловецких островов над резким свалом глубин. В этом районе внутренние волны приливного периода при распространении в зону шельфа могут значительно трансформироваться с передачей энергии по спектру в области короткопериодных ВВ. Поэтому специализированные измерения гидрофизических характеристик в этих районах представляют особый интерес для изучения связи мелко- и мезомасштабных процессов и приливной динамики.

С целью получения данных о короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в течение приливного цикла, соответствующего гармонике M_2 (период $T \approx 12.42$ ч), с 15 по 24 августа 2013 г. в юго-западной части бассейна и в проливе Западная Соловецкая салма были проведены экспедиционные исследования. Работы выполнялись с борта т/х «Нерха» сотрудниками Санкт-Петербургского филиала Института океанологии РАН и студентами Российского государственного гидрометеорологического университета.

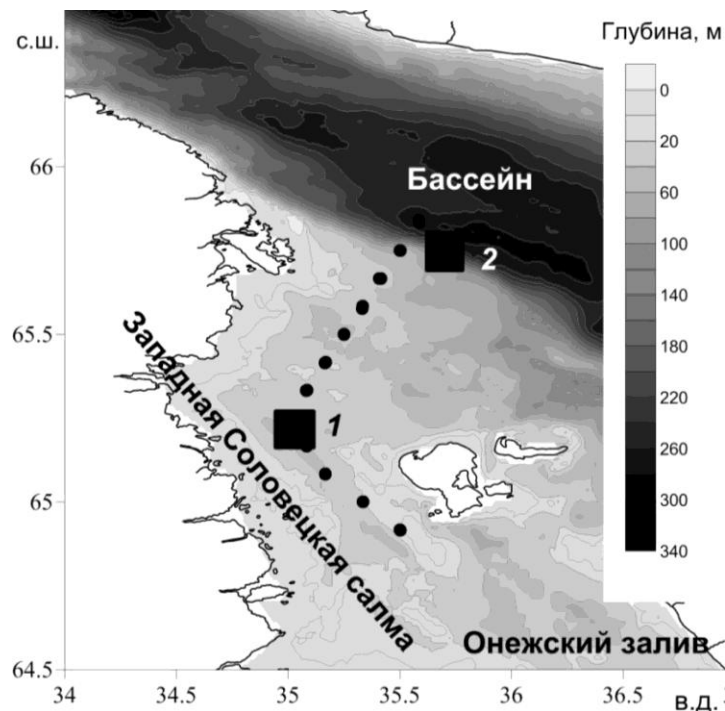


Рис. 1. Схема района работ, совмещенная с картой глубин.

Кружки — точки гидрологических станций на разрезе; 1 — полигон № 1, 2 — полигон № 2.

Экспедиционные работы включали измерения на одном гидрологическом разрезе и двух полигонах (рис. 1). Разрез состоял из 13 океанологических станций и выполнялся дважды (17 августа и в ночь с 18 на 19 августа). Гидрологические полигоны (рис. 1) были развернуты в мелководной части шельфа (полигон № 1) у входа в пролив Западная Соловецкая салма и в глубоководном районе (полигон № 2) на свале глубин впадины бассейна. Заметим, что на полигоне № 1 исследования проводятся с 2009 г. [10]. Работы на полигоне № 1 выполнялись 15—16 и 20—21 августа, а на полигоне № 2 — 19—20 августа. Измерения проводились по единой методике [11], при этом на полигоне № 1 они выполнялись с заякоренного судна, а на полигоне № 2 — в дрейфе. Кроме того, в районе полигона № 1 на весь период экспедиции была установлена придонная станция.

Измерения на разрезе выполнялись дважды: с помощью обрывных зондов ХСТD-1 (США) в глубоководной части и СТD-зонда CastAway (США) в мелководной части. Периоды выполнения наблюдений на разрезе в мелководной части шельфа были привязаны к противоположным фазам приливного цикла.

На полигонах работы сочетали установку буйковой станции с измерителем температуры и скорости течения «Вектор-2» (Россия) и непрерывные (насколько позволяли технические возможности) сканирования водной толщи с борта судна от поверхности до максимально возможного горизонта (дна) с помощью зондов СТD90M (Германия) и CastAway (США). Один цикл сканирования «спуск-подъем» зонда занимал 1 мин на полигоне № 1 и 5—7 мин на полигоне № 2. Сканирование на полигоне № 1 велось в течение трех циклов волны M_2 , а на полигоне № 2 — в течение двух. По данным сканирований определялась временная изменчивость вертикального распределения температуры и солености, а после расчета плотности морской воды оценивались вариации глубины залегания пикноклина. В качестве характерной поверхности выбиралась изопикна, соответствующая среднему положению пикноклина. Полученные вариации глубины ее залегания во времени служили основой для выделения характеристик ВВ. Высота ВВ определялась как средняя величина между высотой переднего и заднего ее гребня на временном ходе глубины залегания средней изопикны, а период — как временной интервал

между соседними экстремумами ее залегания. При выделении ВВ рассматривались колебания высотой более 1 м с периодами более 3 мин на полигоне № 1 и более 20 мин на полигоне № 2.

Придонная станция на полигоне № 1 включала в свой состав установленный на немагнитной платформе акустический профилограф течения ADCP WHS-300 кН (США). Кроме измерений течений он регистрировал колебания уровня и придонной температуры. Дискретность измерений составляла 1 мин, вертикальное разрешение профилирования скорости течения — 1 м.

В начале экспедиции работы выполнялись в погодных условиях, обусловленных развитием малоподвижного заполняющегося циклона. Большую часть времени волнение не превышало 2 балла, скорость ветра — 6 м/с. С 17 августа через район работ стали проходить атмосферные фронтальные образования, в связи с чем погодные условия стали резко переменчивыми. 17, 19—20, 22—24 августа отмечались пасмурная погода, осадки, умеренный ветер с усилением до штормового, волнение от 3 баллов и более; 18, 20—21 августа ветер и волнение стихали до штилевого.

Разрезы температуры, выполненные в разные фазы приливного цикла, представлены на рис. 2. На большей части разреза в поверхностном слое 0—20 м прослеживалась водная масса верхних слоев бассейна [3]. Ее индексы по температуре составляли 7—15 °С и солености — 25.5—27 %. Максимальная температура и минимальная соленость в поверхностных водах наблюдалась на станциях, ближайших к глубоководной части бассейна. Эта водная масса южнее 55-й мили разреза, то есть в проливе Западная Соловецкая салма, занимала всю толщу вод. Ниже, на горизонтах 20—50 м на большей части разреза залегала промежуточная водная масса бассейна [3] с температурой от –0.5 до –5 °С и соленостью 27—28.7 %. Далее 55-й мили разреза промежуточная водная масса не прослеживается. В глубоководной части бассейна на глубинах 70 м и более наблюдались холодные и соленые воды. Это глубинные воды бассейна [3] с характерными индексами по температуре –1.4 °С и солености 29.8 %, которые прослеживались к северу только до 10 мили разреза. Район проведения эксперимента был выбран вблизи границы двух типов вертикальной структуры вод: стратифицированных вод бассейна и слабо стратифицированных вод заливов [3]. Принято считать, что граница, разделяющая эти воды, — структурный фронт [12], располагается севернее Соловецких островов. Положение этой фронтальной зоны хорошо прослеживается по данным измерений как в поле температуры, так и в поле солености. Фронтальная зона, где изотермы выходят на поверхность и упираются в дно, располагалась между 40 и 50 милями разреза. В фазу прилива, соответствующую росту уровня, фронт детектируется в северной части пролива Западная Соловецкая салма, а в отлив он смещается мористее. Разность положений в прилив и отлив оставляет около 6 миль или около 11 км. Изменение положения фронтальной зоны отмечается и в поле температуры поверхности моря по данным спутника MODIS TERRA за 20 августа в 10:00, 10:15, 18:05, 22:40 UTC и за 21 августа в 12:00 UTC.

Полигон № 1 располагался в зоне с двухслойной структурой вод несколько севернее фронтальной зоны. Полигон № 2 располагался в зоне с трехслойной структурой вод.

На рис. 3 приведены примеры временных разверток положения изотерм по данным сканирований в фазу отлива на обоих полигонах. Виден принципиально разный характер их вариаций. На полигоне № 1 (рис. 3, а) наблюдаются четко выраженные цуги короткопериодных внутренних волн на пикноклине, а на полигоне № 2 (рис. 3, б) значимые колебания в районе пикноклина отсутствуют и заметно лишь вертикальное смещение изотерм в нижележащих слоях, которое можно ассоциировать с приливным колебанием.

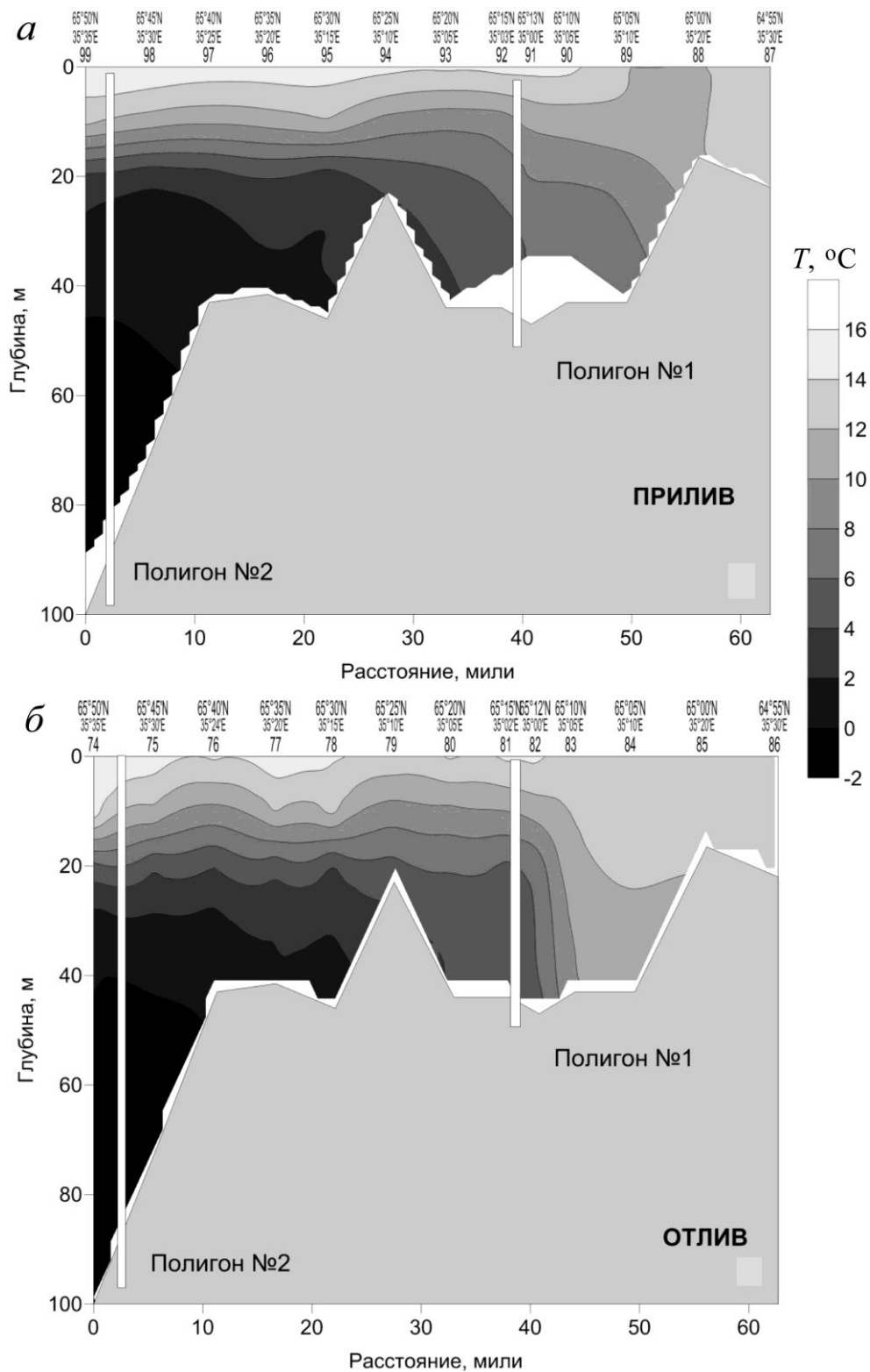


Рис. 2. Распределение температуры на гидрологических разрезах, выполненных поперек шельфа от котловины Белого моря к Онежскому заливу 17.08.2013 (а) и 18—19.08.2013 (б) в разные фазы приливного цикла.

Сверху над разрезами обозначены широта, долгота и порядковый номер станции.
 Вертикальные прямоугольники — расположение полигонов в проекции на разрез.

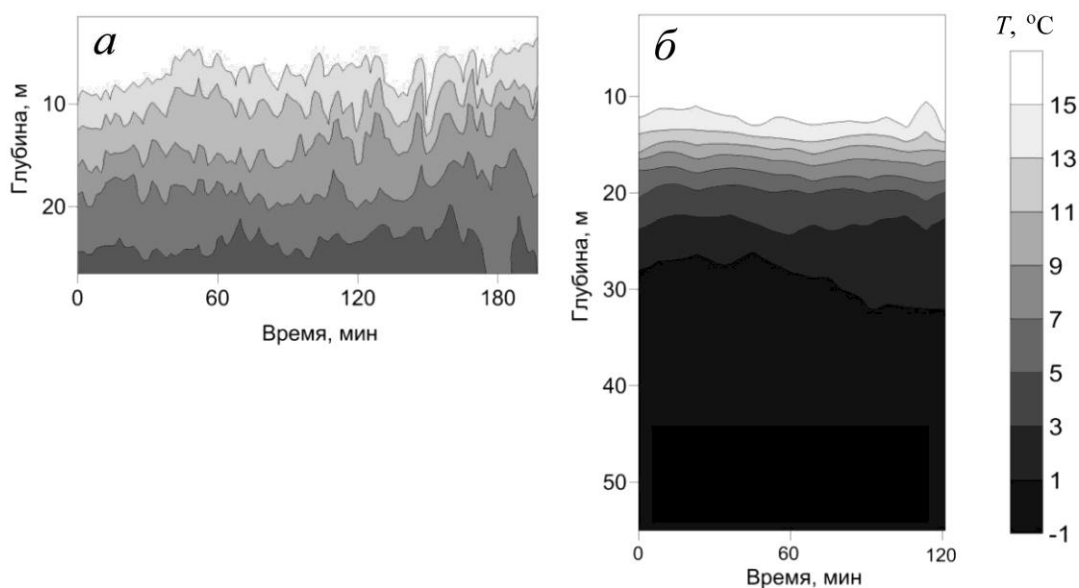


Рис. 3. Пример временной изменчивости вертикального распределения температуры по данным сканирования СТД-зондом в фазу отлива.
a — на полигоне № 1 с 16:19 до 19:35 16.08.2013; *б* — на полигоне № 2 с 10:27 до 12:18 19.08.2013.

На полигоне № 1 изменение глубины залегания изотерм складывается из короткопериодных флуктуаций, наложенных на относительно медленные и слабые низкочастотные полусуточные колебания. Пикноклин располагался на глубине от 10 до 20 м. Перепад температуры в нем составлял от 0.1 до 1.2 °С/м. Наиболее выражены полусуточные вариации в придонных горизонтах, где прослеживаются изменения температуры за приливной период на 1.4 °С, а солёности — на 0.25 ‰. Наступление полной воды в придонной области характеризуется понижением температуры и повышением солёности, а наступление малой воды — повышением температуры и понижением солёности, что находит свое отражение и в вариациях плотности. Кроме того, во время прилива наблюдалось резкое изменение положения пикноклина, после которого наблюдалась его интенсификация, а во время отлива — прохождение цугов короткопериодных внутренних волн.

Статистические характеристики короткопериодных ВВ за три приливных цикла волны M_2 представлены в табл. 1. В районе преобладают ВВ высотой 1—4 м и длительностью колебаний 7—13 мин. Средняя высота ВВ составляла 2.5 м, а период — 10 мин. Временная перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования короткопериодных колебаний с высотой более 1 м к общему времени наблюдения (усреднено по трем полусуточным периодам) составила 60 %. Каждые 12 ч наблюдений регистрировались 2 волны высотой более 5 м. Внутренняя волна максимальной амплитуды около 8 м была зарегистрирована в фазу отлива как головная в цуге из 3 волн.

По данным сканирований на полигоне № 2 температура менялась от —2 до 17 °С. Пикноклин залегал на глубине около 18 м и почти не испытывал значительных короткопериодных вариаций. Амплитуда короткопериодных колебаний составляла не более 1 м. Статистические характеристики короткопериодных ВВ за два приливных цикла волны M_2 представлены в табл. 2. Средняя высота ВВ составляла 1.2 м, а период — 30 мин. Перемежаемость составила 12 %. Однако под пикноклином прослеживаются полусуточные вариации температуры, которые на глубине 35 м составляли около 1 °С за приливной цикл. При этом амплитуда колебания глубины изотермы 1 °С составляет около 7 м. Наступление полной воды в придонной области характеризуется понижением температуры, а наступление малой воды — повышением. Причем колебания под пикноклином визуально не связаны с процессами в самом пикноклине.

Таблица 1

**Повторяемость высот и периодов короткопериодных внутренних волн
по данным сканирования на полигоне № 1**

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1	2	1.4	77	53.10
2	3	2.5	35	24.14
3	4	3.3	20	13.79
4	5	4.3	8	5.52
5	6	5.3	3	2.07
6	7	6.9	1	0.69
7	8	7.6	1	0.69
Σ			145	100.00

Интервал периодов ВВ		Среднее значение интервала в периоде, мин	Повторяемость	
от	до		случаев	%
3.00	9.17	6.37	82	56.55
9.17	15.33	12.19	52	35.86
15.33	21.50	17.82	7	4.83
21.50	27.67	24.22	3	2.07
27.67	33.83	0.00	0	0.00
33.83	40.00	36.17	1	0.69
Σ			145	100.00

Таблица 2

**Повторяемость высот и периодов короткопериодных внутренних волн
по данным сканирования на полигоне № 2**

Интервал высот ВВ		Средняя высота в интервале, м	Повторяемость	
от	до		случаев	%
1	2	1.2	6	100.00
Σ			6	100.00

Интервал периодов ВВ		Среднее значение интервала в периоде, мин	Повторяемость	
от	до		случаев	%
20.00	30.00	21.55	3	50.00
30.00	40.00	34.02	1	16.67
40.00	50.00	41.77	2	33.33
Σ			6	100.00

Основные научные результаты экспедиции:

- получены сведения об изменении положения структурного фронта в мелководной части шельфа под влиянием прилива;
- установлено различие в интенсивности короткопериодных колебаний пикноклина в глубоководной части бассейна и мелководном шельфовом районе;

– в глубоководной части бассейна наиболее по высоте (до 14 м) колебания с полусуточным периодом отмечаются ниже слоя пикноклина;

– в мелководной части шельфа ВВ является суперпозицией полусуточных и короткопериодных колебаний; наибольшие короткопериодные волны отмечаются в отлив, их высота достигает 8 м; длительность колебаний лежит в диапазоне около 10 мин.

Авторы выражают признательность доктору Anders Tengberg (Aanderaa Data Instruments AS и University of Gothenburg) за предоставленную возможность использования CTD-зонда CastAway в экспедиционных работах.

Данная работа выполнена при частичной поддержке Мега-гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078) и содействии НОЦ «Арктика-Океан» ИО РАН.

Литература

1. Бабков А. И. Гидрология Белого моря. СПб: ЗИН РАН, 1998. 94 с.
2. Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2: Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.
4. Серебряный А. Н., Пака В. Т., Корж А. О. Исследование с помощью ADCP течений и внутренних волн в Белом море // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Междун. научн. конф. (школы) по морской геологии. Т. III. М: ГЕОС, 2009. С. 245—250.
5. Зимин А. В., Родионов А. А., Николаев В. Г., Жегулин Г. В. Взаимосвязь мезомасштабных и мелкомасштабных гидрофизических процессов в окрестностях неровностей рельефа дна // Тр. IX Междун. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. С. 382—386.
6. Зимин А. В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т. 52, № 1. С. 16—25.
7. Зимин А. В. Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и характеристик внутреннего волнения в течение полусуточного приливного цикла в шельфовых районах Белого моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 3. С. 293—303.
8. Семенов Е. В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 1. С. 128—141.
9. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Изв. Академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 4. С. 844—850.
10. Зимин А. В., Родионов А. А., Жегулин Г. В. Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 3. С. 19—33.
11. Зимин А. В., Родионов А. А., Здоровеннов Р. Э., Романенков Д. А., Шевчук О. И., Родионов М. А., Жегулин Г. В. Исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле-августе 2012 г. с научно-исследовательского судна «Эколог» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 3. С. 85—88.
12. Пантюлин А. Н. Структурно-динамическое описание водного тела Белого моря // Система Белого моря. Том II: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 309—378.