

А.В. Зимин, Д.А. Романенков, О.А. Атаджанова, А.А. Родионов, А.В. Моисеев

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ
СТРУКТУР В БЕЛОМ МОРЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ АПРОБАЦИИ
ЛЕТОМ 2014 Г.**

A.V. Zimin, D.A. Romanenkov, O.A. Atadzhanova, A.A. Rodionov, A.V. Moiseev

**EXPERIENCE OF THE SYSTEM DEVELOPMENT FOR MONITORING
OF SHORT-PERIOD PROCESSES AND SUBMESOSCALE STRUCTURES
IN THE WHITE SEA AND RESULTS OF ITS APPROBATION
IN THE SUMMER OF 2014**

В статье представлены подход к созданию системы наблюдений (мониторинга) за короткопериодной изменчивостью гидрофизических полей и процессов в приливном арктическом море и экспериментальные данные по отработке ее элементов, полученные в ходе экспедиционных работ в различных по гидрологическим условиям районах Белого моря в июле 2014 г.

Ключевые слова: наблюдения, внутренняя волна, вихрь, фронт, прилив, мониторинг, Белое море.

The paper outlines a notion of system observing the short-term variability of hydro-physical fields and monitoring the submesoscale structure in an arctic tidal sea and the results of experimental data to test elements of the system. The data were obtained in July 2014 during field work in the areas of the White Sea with various hydrological conditions.

Key words: observations, internal wave, eddy, front, tide, monitoring, the White Sea.

Океанологические наблюдения последних десятилетий позволили обнаружить значительную изменчивость полей течений, температуры и солености на временных масштабах от минут до нескольких часов, которую обычно связывают с такими явлениями и процессами, как тонкая структура вод, короткопериодные внутренние волны (ВВ), малые (субмезомасштабные) вихревые и струйные структуры, локальная динамика фронтальных разделов. Например, в Белом море неоднократно регистрировались интенсивные колебания гидрофизических полей и аномалии вертикального и горизонтального перемешивания, вызванные короткопериодными ВВ [5, 7, 9, 18] и субмезомасштабными вихрями [16]. В связи с незначительным пространственным масштабом (~0,1–10 км) и малым временем жизни таких структур, их регулярное наблюдение затруднительно. Вместе с тем, научный интерес к исследованию процессов и явлений в субмезомасштабном интервале изменчивости обусловлен тем, что они являются связующим звеном в цепи преобразования энергии движений от синоптических и мезомасштабных процессов к микроструктуре океана. С практической точки зрения для эксплуатации подводной техники и удовлетворения потребностей подводной навигации и акустики необходимо знать не только средние параметры

гидрофизических полей, но и характеристики их короткопериодной изменчивости. Такая информация может использоваться также для совершенствования численных гидродинамических моделей в интересах оперативной океанологии.

Существующие системы наблюдений в различных регионах и морях Мирового океана [1] ориентированы главным образом на слежение за изменчивостью, определяемой процессами и явлениями большего масштаба, чем те, о которых говорилось выше. В значительной степени эти системы опираются на регулярные измерения на стандартных горизонтах и с пространственно-временной дискретностью априори недостаточной для мониторинга короткопериодных и субмезомасштабных процессов и явлений.

Считается, что рациональным путем изучения короткопериодной изменчивости гидрофизических полей океана является выполнение многочасовых (многосуточных) наблюдений в ряде типичных в динамическом отношении точек [15]. Для полноты картины необходимо, чтобы исследования охватывали все типичные акватории моря и велись на регулярной основе. При этом возникают естественные вопросы об экономической эффективности работ, выборе районов и сроков наблюдений. Ответы на эти вопросы приводят к идее системы наблюдений на базе спутниковой и морской подсистем [16]. Она объединяет результаты спутниковых измерений высокого разрешения, охватывающих значительные акватории моря, и учащенные по времени и подробные по пространству морские (полигонные) наблюдения в отдельных районах моря.

По мере накопления результатов морских и спутниковых наблюдений за короткопериодной изменчивостью океанологических характеристик и интерпретации исходной информации должны создаваться базы данных собственно процессов и явлений, определяющих эту изменчивость, которая зависит как от внешних влияющих факторов, так и от типа фоновых гидрологических условий в районе наблюдений. Применительно к Белому морю с доминирующим влиянием приливной динамики на короткопериодную изменчивость такие базы данных должны лежать в основе построения системы мониторинга процессов и явлений соответствующего масштаба с привязкой к хорошо прогнозируемым приливным колебаниям уровня [16]. Задачей системы мониторинга короткопериодной изменчивости гидрофизических полей и процессов является сбор, систематизация и анализ гидрометеорологической информации, форма и содержание которой обеспечивают ее использование для получения количественных оценок приливной и внутрприливной изменчивости гидрофизических полей, тонкой структуры вод и процессов перемешивания, обусловленных короткопериодными ВВ, субмезомасштабными вихрями и мезомасштабной фронтальной динамикой.

Спутниковая подсистема наблюдений дает возможность использовать архивные и оперативные данные со сканеров ASAR (ENVISAT), SAR (RADARSAT-1,2) и MODIS (Terra/Aqua). Комплексный спутниковый мониторинг для непривливаемых морей детально разработан [14]. Значительный объем спутниковых данных в Белом море позволил получить представления о пространственном распределении и некоторых характеристиках короткопериодных ВВ [10, 13, 20], субмезомасштабных вихревых структур [2], фронтальных разделов и их динамике на акватории всего моря [16]. На этой основе выбирались районы для проведения морских наблюдений [11].

Морская подсистема мониторинга базируется на наблюдениях с помощью повторяющихся нестационарных океанографических полигонов и разрезов по методике,

защищенной авторским свидетельством [8]. На полигонах выполняются: квазисинхронные мелкомасштабные океанографические съемки и измерения на буйковых станциях, дополненные данными учащенных океанографических станций (сканирований) с заякоренного в районе полигона судна. Измерения на полигонах из буйковых станций должны охватывать несколько циклов доминирующей в приливе гармонике M_2 .

Мелкомасштабные океанографические съемки выполняются в разные фазы приливного цикла; каждая съемка состоит из нескольких разрезов. Наблюдения за температурой и солёностью производятся с помощью STD-зондов с дискретностью по вертикали не менее одного метра. На полигонах из буйковых станций измерения проводятся профилирующей аппаратурой с частотой измерения, близкой к частоте Вайсяля-Брента, в течение несколько циклов полусуточного прилива. Одновременно выполняются вертикальные сканирования с борта судна с дискретностью 1–3 мин в зависимости от глубины места.

Предлагаемая методика, согласно [17], может быть отнесена к классу специализированных океанографических наблюдений, методика, состав и продолжительность которых зависят от задач исследования. Например, российскими специалистами были выполнены эксперименты в Черном море [12, 14, 19] и в Белом море [10], которые показали необходимость сочетания высокоразрешающих спутниковых данных и наблюдений *in situ* для изучения характеристик субмезомасштабных структур.

Отдельные элементы системы мониторинга были отработаны и испытаны в ходе ежегодных экспедиционных работ 2006–2013 гг. в Белом море и на этапах анализа результатов обработки архивов спутниковой информации [6, 7, 10, 20]. Элементы морской подсистемы мониторинга апробировались в ходе экспедиционных работ, проводившихся с борта НИС «Эколог» в Восточной Соловецкой салме, Двинском заливе и Бассейне Белого моря в июле 2014 г. (рис. 1). Работы выполнялись Санкт-Петербургским филиалом Института океанологии РАН при участии Российского государственного гидрометеорологического университета и Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Экспедиционные исследования на первом этапе включали постановку донной буйковой станции в проливе Восточная Соловецкая салма, на втором этапе — постановку полигона автономных буйковых станций, а также выполнение разрезов и микрополигонных съемок в проливе Восточная Соловецкая салма, в центральной части Двинского залива и в районе, находящемся на стыке Бассейна, Горла и Двинского залива (см. рис. 1). Указанные районы были определены на подготовительном этапе по результатам обработки радиолокационных изображений ENVISAT ASAR (2007–2012) и данных по полям температуры поверхности моря с прибора MODIS спутников Aqua и Terra (2010, 2014). В этих районах [3, 16] было зарегистрировано значительное количество поверхностных проявлений пакетов короткопериодных ВВ (полигон № 1, 2), существенная локальная изменчивость положения фронтальных разделов (полигон № 2, 3), частые поверхностные проявления аномалий, связанных с субмезомасштабными вихревыми образованиями (полигон № 3). Однако эти данные не позволили оценить характеристики короткопериодной изменчивости гидрофизических полей, высоты и скорости распространения ВВ, время жизни субмезомасштабных вихрей. Эти сведения были получены в дополнение к спутниковым данным по наблюдениям при производстве морских работ.

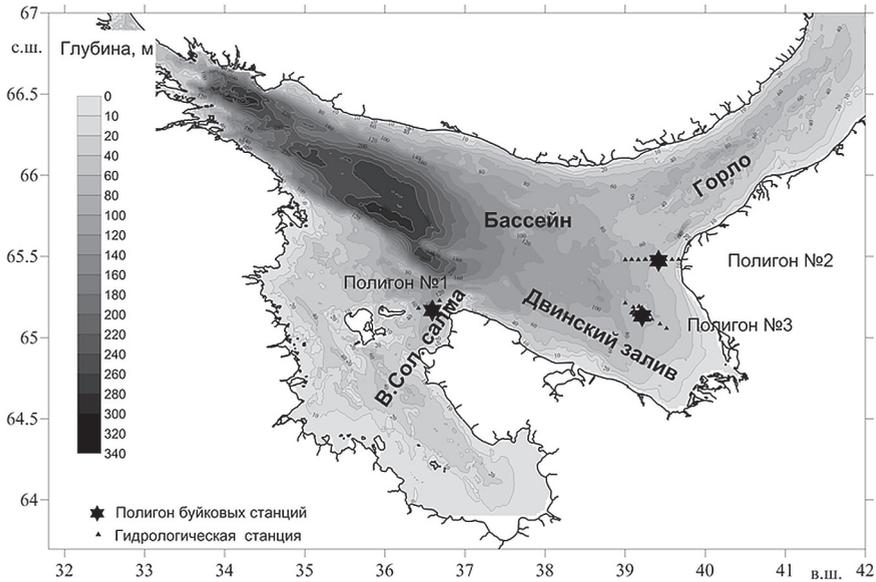


Рис. 1. Расположение районов работ и схема станций, выполненных с борта НИС «Эколог» с 8 по 9 июля и с 22 по 27 июля 2014 г.

Данные сканирующих измерений можно рассматривать как двумерную картину изменения полей температуры и солёности по вертикали и времени, которая даёт наглядное представление об изменчивости процессов. В качестве примера на рис. 2 приводится распределение температуры и солёности, полученное по данным непрерывного сканирования в течение 16 ч 20 мин с дискретностью 2 мин на полигоне № 1 в июле 2014 г., а также колебания уровня моря по датчику давления.

На представленном рисунке чётко прослеживается меняющаяся во времени квазидвухслойная структура вод. Согласно имеющимся представлениям [4], эти слои можно интерпретировать как летние поверхностную и промежуточную водные массы Бассейна Белого моря. Поверхностная водная масса в период работ характеризовалась температурой 7–10 °С и солёностью 26,5–27,0 ‰, а промежуточная водная масса — температурой 0–4 °С и солёностью 27,4–28,4 ‰. При этом глубина залегания и объёмы водных масс в плоскости разреза испытывают значительные колебания. Ход уровня моря демонстрирует правильный полусуточный характер прилива в районе измерений. При падении уровня моря увеличивается объём вод, занимаемых промежуточной водной массой, а в период роста уровня её объём уменьшается. На эти полусуточные приливные колебания термохалинных характеристик накладываются возмущения меньших периодов, связанные с прохождением цугов короткопериодных ВВ. На отдельных горизонтах колебания могут достигать 2–3 °С и 0,5–0,75 ‰ за 10–20 мин. По результатам аналогичных сканирований, выполненных в различных районах Белого моря [5, 7], выявлено, что короткопериодные колебания термохалинных полей широко распространены по акватории моря. Изменчивость, обусловленная

короткопериодными колебаниями, не может быть выявлена в рамках стандартных мониторинговых гидрологических наблюдений. Для иллюстрации сказанного сопоставим результаты наблюдений по применяемой методике с теми результатами, которые были бы получены с использованием классических методов наблюдений.

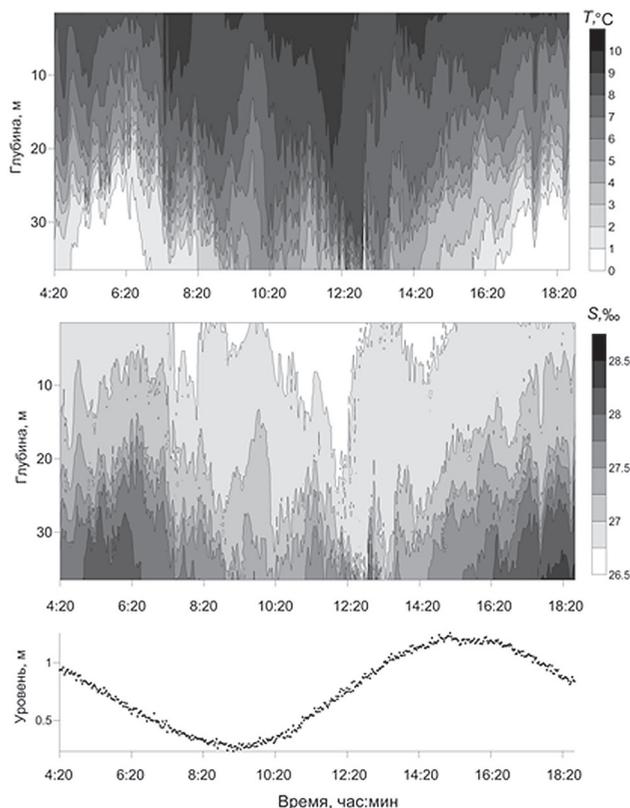


Рис. 2. Фрагмент временной изменчивости температуры и солёности по данным сканирования на суточной станции с заякоренного судна на полигоне № 1 (Восточная Соловецкая салма) с 4:20 до 18:20 23.07.2014 и колебания уровня по показаниям датчика давления ADCP WHS 300, установленного на дно рядом с судном

На основании сканирующих измерений сформируем два массива данных. Массивы высокого (по глубине и времени) и стандартного (соответствующего требованиям [17]) разрешений. Данные высокого разрешения — это данные с дискретностью 1 м по вертикали и 1–4 мин по времени (в зависимости от глубины места на полигоне). Данные стандартного разрешения — это данные измерений на стандартных горизонтах с дискретностью два часа. В первом случае исходные данные позволяли учесть эффекты, связанные с короткопериодными колебаниями (порядка десятки минут), а во втором случае их исключали.

Анализируя значения среднего за приливной период и стандартного отклонений для распределений температуры и солёности, оценим, насколько наблюдаемые характеристики изменчивости зависят от детальности произведенных измерений. Сравнение результатов обработки наблюдений, полученных с использованием стандартной и применяемой методик, приведено на рис. 3. Из рисунка видно значительное различие не только в дисперсии, но и в средних оценках температуры и солёности на различных горизонтах. Очевидно, что это скажется и на оценках параметров ВВ.

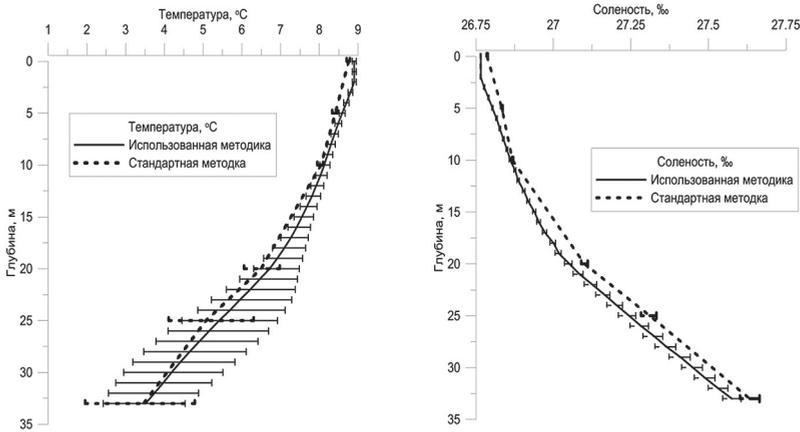


Рис. 3. Средние профили температуры и солёности (линии) и их стандартное отклонение (отрезки) по данным на полигоне № 1 с использованием разных методик наблюдений

Характеристики короткопериодных ВВ (амплитуда h и период τ) оценивались по результатам сканирований, а остальные измерения использовались для учета гидрологических условий в районе проведения работ и определения направления распространения ВВ в соответствии с работой [9]. Длина волны λ может быть найдена как $\lambda = c \cdot \tau$, где c и τ — фазовая скорость и период волны соответственно. Фазовая скорость может быть оценена с использованием дисперсионного соотношения (1) для внутренних волн в приближении двухслойной среды [10]:

$$C = \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{d \cdot (D-d)}{d + (D-d)}}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; ρ — средняя по глубине плотность; D — глубина; d — толщина верхнего слоя; $\Delta\rho$ — разность плотности верхнего и нижнего слоя. Характеристики слоев берутся как средние их значения за приливной период, а граница между слоями определяется по глубине залегания характерной изопикны.

Общее время сканирования водной толщи за период экспедиционных работ составило 57,6 ч, а обобщенные результаты анализа характеристик короткопериодных

ВВ, даны в таблице, в которой приведены среднее, максимальное и модовое значения высот волн и их средние длины, периоды и фазовые скорости. Средняя по всем полигонам амплитуда ВВ составила 2,5 м, средний период — 19 мин, средняя скорость — 0,39 м/с, а длина — 794 м.

Как видно из таблицы, интенсивность внутреннего волнения была различна на полигонах, первые два из которых располагались в зонах сильных приливных течений со скоростями до 80 см/с. Наиболее высокие и короткопериодные волны наблюдались на полигоне № 1, располагавшемся в зоне пролива и характеризовавшемся значительной изменчивостью фоновой стратификации под влиянием приливных процессов (см. рис. 2). Полигон № 2 оказался более спокойным, причем ВВ регистрировались в основном в фазу отлива, когда в районе работ, по данным полигонной съемки, наблюдался язык стокового Двинского течения в 10-метровом верхнем слое, хотя фоновая стратификация сохранялась весь период сканирования. На полигоне № 3, где приливные течения относительно слабы (до 40 см/с), было зарегистрировано всего несколько невыраженных ВВ, что свидетельствует о незначительном вкладе ВВ в изменчивость термохалинных характеристик в этом районе, по крайней мере в период наблюдений.

Таблица

Характеристики короткопериодных ВВ по данным экспедиционных наблюдений 2014 г.

Полигон	Время сканирования, ч	Характеристики волнения						
		$h_{\text{ср}}$, м	h_{max} , м	$h_{\text{мод}}$, м	$\lambda_{\text{ср}}$, м	$\tau_{\text{ср}}$, мин	$C_{\text{ф ср}}$, м/с	Кол-во
1	24,6	4,5	14,5	2,9	377	14	0,26	72
2	25	1,8	7	2,4	625	16	0,38	42
3	8	0,5	0,6	0,5	1381	26	0,53	7

Местоположение полигона № 3 в Двинском заливе (см. рис. 1) выбиралось по данным поискового гидрологического разреза, выполненного в центральной части Двинского залива и пересекающего зону стокового Двинского фронта. Ранее, на основании результатов спутниковых радиолокационных наблюдений было установлено, что вихри являются распространенным явлением на акватории Двинского залива [2]. Всего на спутниковых снимках 2009–2012 гг. Двинского залива было обнаружено 8 антициклонических и 34 циклонических вихревых образования, типичные радиусы которых составляли от 4 до 6 км. Вихри циклонического вращения чаще наблюдались в восточной части залива, а антициклонического — в его северной и центральной частях.

На полигоне № 3, расположенном в 10 км к юго-востоку от фронтальной зоны, отмечалась ярко выраженная двухслойная структура вод, где в отличие от полигона № 1 верхний слой ассоциируется с распресненными водами, образующимися под действием стока р. Северная Двина. Пикноклин располагался на глубинах от 10 до 20 м. Как было установлено, изменчивость термохалинных характеристик в районе работ была связана с динамикой небольшого вихревого образования, о чем свидетельствуют приведенные на рис. 4 горизонтальные поля температуры на глубине 10 м по результатам трех микромасштабных съемок, выполненных 26 и 27 июля.

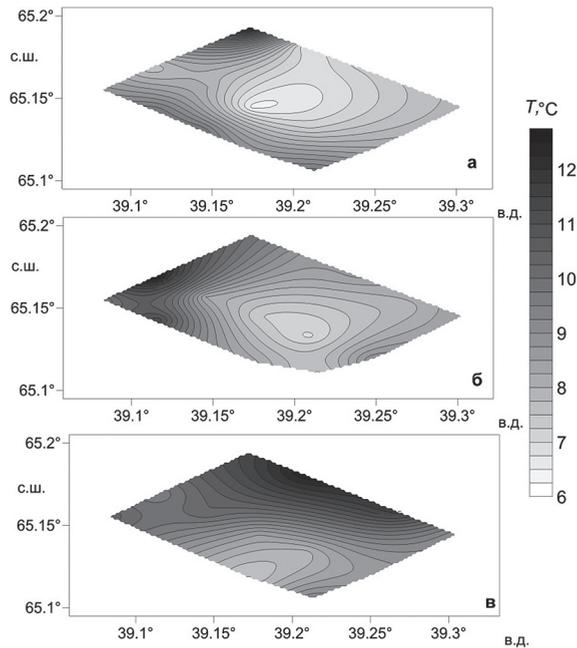


Рис. 4. Распределение температуры на горизонте 10 м по данным микрополигонных океанографических съемок: *a* — с 10:40 до 13:40 26.07.2014; *б* — с 14:30 до 17:30 26.07.2014; *в* — с 8:00 до 11:20 27.07.2014

На горизонте 10 м на этой небольшой акватории температура менялась на 5°C (см. рис. 4*a*), соленость — на $0,7\text{‰}$. При этом максимальный горизонтальный градиент гидрологических характеристик прослеживается в центральной части полигона. По результатам первой съемки (с 10:40 по 13:40 26 июля) в центре полигона наблюдалась ядро холодных и соленых вод диаметром около 3 км, что вероятно связано с подъемом вод в циклоническом субмезомасштабном вихре. Он прослеживался до глубины 13,5 м. Вторая съемка выполнялась через час после завершения первой (с 14:30 по 17:30 26 июля). По ее результатам видно, что циклонический вихрь смещается к югу, а его характеристики (кроме вертикального размера) в целом сохраняются. На третьей съемке, выполнявшейся через 13 ч после второй, вихрь в пределах полигона уже не прослеживается (не наблюдается замкнутой изотермы).

Дальнейший анализ данных экспедиционных наблюдений, требующий привлечения дополнительной метеорологической и доступной спутниковой информации вместе с результатами моделирования приливной динамики, выходит за рамки данной статьи.

В ходе экспедиционных работ в Белом море были отработаны элементы методики мониторинга короткопериодной изменчивости гидрофизических полей и пополнены базы данных о гидрофизических характеристиках и их изменчивости в некоторых районах моря. Районы работ 2014 г. выбирались в соответствии с предполагаемым расположением зон повышенной внутриволновой и/или вихревой активности, что

определялось путем предварительного анализа данных предыдущих экспедиций и архивной спутниковой информации. В целом сделанные предположения оправдались, и в выбранных районах были получены новые данные о короткопериодной и субмезомасштабной изменчивости. В проливе с сильными приливными течениями, расположенном к западу от о-вов Соловецкого архипелага, изменчивость термохалинных характеристик определялась преимущественно приливными колебаниями и интенсивными короткопериодными ВВ. В северо-восточной части Двинского залива вблизи Горла эта изменчивость была связана не только с влиянием ВВ, но и с динамикой гидрологического фронта под влиянием прилива. В центральной части залива, где приливные течения относительно слабы, был обнаружен нестационарный циклонический вихрь с диаметром около 3 км и временем существования не меньше половины приливного периода. Динамика этого вихря существенно трансформировала характеристики вод в небольшой области вблизи фронтальной зоны.

Данная работа частично была выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-05-04639_а.

Литература

1. Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. — М.-Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. — 287 с.
2. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Козлов И.Е. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Белого моря по радиолокационным изображениям. // Труды XII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». — СПб.: «Нестор-История», 2014, с. 215–217.
3. Атаджанова О.А., Жегулин Г.В., Зимин А.В., Зубкова Е.В., Козлов И.Е., Родионов А.А., Романенков Д.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря. // Труды XII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». — СПб.: «Нестор-История», 2014, с. 36–40.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. Б.Х. Глуховского. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 240 с.
5. Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натуральных наблюдений. // Океанология, 2012, т. 52, № 1, с. 16–25.
6. Зимин А.В., Родионов А.А., Шапрон Б., Романенков Д.А., Здореннов Р.Э., Козлов И.Е., Мясоедов А.Г., Шевчук О.И. Работы с научно-исследовательского судна «Эколог» по проекту «МЕГАГРАНТ» в Белом море, выполненные в июле-августе 2012 г. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 281–285.
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. Зимин А.В. Методика выполнения натуральных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
9. 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.
10. 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.
11. Зимин А.В., Романенков Д.А., Родионов А.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2014, т. 7, № 1, с. 85–92.

12. Карлин Л.Н., Чанцев В.Ю., Хаймина О.В., Даньшина А.В., Исаев А.В. Особенности динамической структуры вод прибрежной зоны Туапсе. // Учёные записки РГГМУ, 2009, № 11, с. 113–122.
13. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В. и др. 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.
14. Лаврова О.А. Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. — М.: ИКИ РАН, 2011. — 480 с.
15. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость Мирового океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 262 с.
16. Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В., Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2014, т. 7, № 3, с. 29–41.
17. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 725 с.
18. 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 Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 3. — М.: «ГЕОС», 2009, с. 245–250.
19. Чанцев В.Ю., Даньшина А.В. Субмезомасштабная структура динамики прибрежных вод в районе Туапсе. // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 153–163.
20. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea. // Remote Sensing of Environment, 2014, vol. 147, pp. 99–107. — DOI:10.1016/j.rse.2014.02.017.