

*А.В. Зимин*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ  
И ЯВЛЕНИЙ В БЕЛОМ МОРЕ**

*A. V. Zimin*

**REGULARITIES OF SUBMESOSCALE PROCESSES  
AND PHENOMENA IN THE WHITE SEA**

*В работе приведены итоги комплексных гидрофизических исследований, осуществленных в 2006–2014 гг. в акватории Белого моря. Установлены факторы и количественные параметры изменчивости температуры, солёности, течений на масштабе меньше приливного цикла в зависимости от морфометрии дна, вертикальной структуры вод и близости фронтальных разделов. Оценен вклад субмезомасштабных структур в горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен в разных районах моря.*

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

*The paper presents the results of complex hydrophysical studies in summers 2006–2014 in the White Sea. The factors and quantitative parameters of temperature, salinity and current variability inside tidal period are established, depending on the bottom morphometry, stratification and proximity of the frontal regions. The contribution of submesoscale dynamics into horizontal and vertical turbulent exchange in different areas of the Sea is evaluated.*

*Keywords: observations, internal wave, eddy, front, tide the White Sea.*

**Введение**

В Белом море сильная полусуточная приливная (мезомасштабная) динамика является ключевым фактором, определяющим регулярность и специфические особенности явлений и процессов на локальных акваториях [20, 25]. Однако сведения об изменчивости процессов на временных масштабах от нескольких минут до полусуток (в данной работе они будут называться субприливными) и ассоциируемых с ними субмезомасштабных явлений, которым в Белом море соответствует пространственный масштаб от сотни метров до десяти километров, носят характер качественных оценок или гипотез. Это препятствует эффективному описанию и прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих существенное оборонное и хозяйственное значение.

Белое море является одним из наиболее изучаемых окраинных бассейнов Северного Ледовитого океана [1, 3, 27, 29]. В нем определен состав водных масс, выявлена сезонная изменчивость вертикальной структуры вод, показана тесная связь изменчивости термохалинных полей с синоптическими и приливными явлениями. Установлены основные фронтальные разделы и выявлена их значительная сезонная изменчивость. Мощные приливные процессы создают доминирующие на акватории квазипериодические полусуточные приливные течения. В районах, где хорошо

выражена стратификация, под влиянием приливно-отливных течений должны возникать внутренние волны (ВВ) полусуточного периода, что было показано по результатам численного моделирования [16, 24]. В районах генерации внутренние приливные волны могут иметь амплитуды до 10 м, однако, как показывают расчеты, при распространении они быстро затухают вблизи очагов генерации. Надежных наблюдений внутренних приливных волн в Белом море практически не было, что не позволяло подтвердить или опровергнуть результаты моделирования.

Вихри с пространственными масштабами порядка единиц километров и временем жизни несколько часов были зарегистрированы на границе пролива Горло с помощью ИК-радиометра еще в 1985 г. [3], и считается, что их образование связано со сдвиговой неустойчивостью приливного течения. Однако до настоящего времени нет сведений об особенностях пространственной изменчивости характеристик малых вихрей на акватории Белого моря.

Использование данных дистанционных наблюдений высокого разрешения [14, 18] позволило обнаружить значительную для всего моря мезомасштабную изменчивость температуры и идентифицируемых по ней фронтальных разделов. Известно также, что установившиеся фронты совершают периодические перемещения на 6–8 км вдоль векторов приливных течений с полусуточным периодом [29]. Мезомасштабные особенности динамики вод наблюдались и в ходе экспедиционных исследований [13, 28]. Распределения гидрологических элементов по пространству указывали на возможность меандрирования фронтальных разделов с отрывом от них вихревых образований с масштабами до 10 км. Однако эти спутниковые и контактные данные не позволили зарегистрировать и описывать характер мезомасштабной изменчивости фронтальных разделов. Полностью отсутствуют оценки связи фронтальной динамики и особенностей формирования малых (субмезомасштабных) вихрей и короткопериодных внутренних волн, которые могут существенным образом влиять на процессы вертикального и горизонтального обмена на акватории моря.

Океанологические наблюдения последних лет в Белом море [12, 26] позволили обнаружить значительную короткопериодную изменчивость течений, температуры и солености на отдельных акваториях. Например, в 2010 г. в юго-западной части моря неоднократно регистрировались колебания термоклина высотой 15–17 м и периодом 15–20 мин [4], которые были интерпретированы как проявления короткопериодных внутренних волн. Однако на данный момент отсутствуют сведения о пространственно-временном распределении короткопериодных внутренних волн, хотя Белое море является областью интенсивной диссипации приливной энергии в системе морей Северо-Европейского бассейна [15], и представляется, что короткопериодные внутренние волны могут наблюдаться регулярно и вносить значительный вклад в перемешивание на обширных акваториях. Более того, подробное описание особенностей гидрологических процессов и явлений на субприливных временных масштабах до сих пор отсутствует [22].

Остается открытым вопрос о роли короткопериодной изменчивости в турбулентном перемешивании на различных акваториях Белого моря. Отсутствуют основанные на наблюдениях оценки коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена, учитывающие влияние субприливных процессов и необходимые для верификации результатов численного моделирования. Обычно в численных моделях

эти коэффициенты задаются как параметры, с помощью которых можно добиться достаточно хорошего согласия полученных решений и результатов наблюдений в разные годы [2]. Это препятствует эффективному описанию и прогнозированию гидрологических условий, важных для решения прикладных задач, имеющих оборонное и хозяйственное значение в условиях меняющегося климата.

Цель работы состояла в том, чтобы на основе анализа систематических высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в Белом море в зависимости от фоновых гидрометеорологических условий, приливной и фронтальной динамики.

### Материалы и методы

Методологическую основу работы составлял подход, базирующийся на получении и комплексной обработке результатов разнородных высокоразрешающих по времени и пространству контактных и дистанционных наблюдений, путем их сопоставления, картографирования, статистического анализа, а также теоретического анализа факторов и процессов, формирующих изменчивость гидрофизических полей на субмезомасштабном интервале изменчивости в приливном море.

Исходными данными для исследования являлись: данные учащенных по времени и пространству наблюдений на океанографических полигонах и разрезах, выполненные в летние сезоны 2006–2014 гг. в различных районах Белого моря (рис. 1) по методике, защищенной авторским свидетельством [6]; радиолокационные изображения: Envisat ASAR, Radarsat-1, Radarsat-2 за 2007, 2009–2012 гг.; данные по температуре поверхности моря MODIS Aqua и Terra за 2010 г. Дополнительно привлекались открытые архивы данных моделирования баротропного прилива и метеорологических карт приземного анализа.

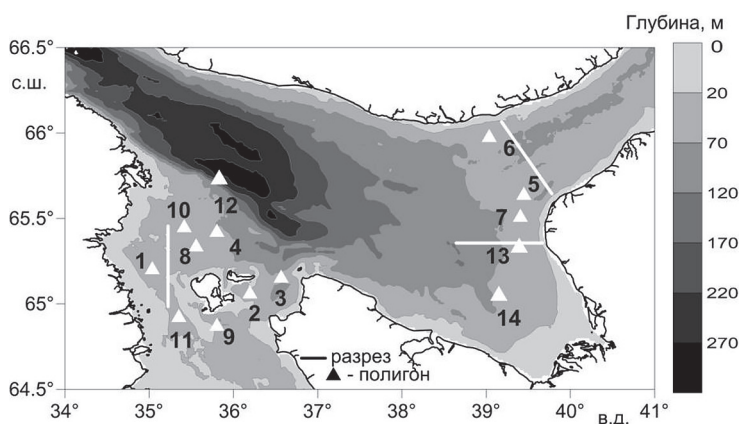


Рис. 1. Схема расположения полигонов и разрезов контактных измерений, выполненных в 2006–2014 гг., совмещенная с картой глубин. Треугольниками обозначены местоположения полигонов, линиями — положения разрезов

Классические гидрологические подходы, основанные на анализе данных стандартных океанографических станций, дали возможность определить особенности вертикальной стратификации вод, индексы наблюдаемых водных масс, положения фронтальных разделов и т.д. Это позволило отнести районы, на которых выполнялись специальные натурные эксперименты, к участкам акватории с тем или иным характерным для моря гидрологическим режимом. Для каждого выделенного гидрологического района с использованием описательной статистики и спектрального анализа производилась оценка изменчивости характеристик вод (температуры, солености, течений) по данным контактных наблюдений в ходе приливного цикла.

По данным высокоразрешающих контактных измерений определялись повторяемость и обеспеченность высот и периодов колебаний изопикн и, таким образом, находились характеристики ВВ. Взаимным корреляционным анализом данных, полученных в разных точках полигонов, определялись характерные скорости и длины внутренних волн, а также направления их распространения. Процедура анализа высокоразрешающих спутниковых радиолокационных изображений по характерным проявлениям аномалий на морской поверхности [17] позволила картировать проявления пакетов короткопериодных внутренних волн на акватории всего моря. Для валидации спутниковых данных выполнялось сопоставление характеристик внутренних волн, наблюдаемыми *in situ* и на радиолокационных снимках. На основе спутниковых данных определялись длина цуга волн, количество волн в цуге, длина лидирующей волны, длина гребня лидирующей волны, направление распространения. На основе обобщения спутниковых данных и доступной гидрометеорологической информации производилась оценка временной изменчивости и выявление определяющих ее факторов, районирование особенностей проявлений и выделение очагов генерации короткопериодных внутренних волн.

Для исследования характеристик субмезомасштабной вихревой динамики выполнялись повторяющиеся в разные фазы приливного цикла микрополигонные океанографические съемки. Они позволили установить наличие вихревых образований и определить их характеристики на отдельных участках акватории. Анализ поверхностных проявлений субмезомасштабных вихрей на всей акватории моря был выполнен с использованием тех же спутниковых изображений (методика изложена в [19]). Он выявил районы постоянной регистрации поверхностных проявлений вихрей, их тип и характеристики пространственно-временной изменчивости.

Исследование фронтальной динамики базировалось на сочетании результатов контактных измерений на разрезах поперек фронтальных зон различного происхождения в разные фазы приливного цикла и спутниковых данных о характеристиках температуры поверхности моря. Комбинирование этих данных позволило получить представление о синоптической и мезомасштабной (приливной) изменчивости положения основных фронтальных разделов Белого моря. Затем путем комбинирования полученной информации строились композитные карты, сочетающие идентифицированные положения фронтальных разделов, вихревых образований и ВВ. Анализ комплексных карт позволил исследовать связь изменчивости фронтальных разделов и интенсивности проявлений субмезомасштабных вихрей и короткопериодных внутренних волн.

Для оценки особенностей турбулентного обмена на масштабах приливного цикла и влияния короткопериодной изменчивости на процессы перемешивания на основе учащенных данных о характеристиках течений рассчитывались коэффициенты вертикального (метод Осборна) и горизонтального (метод Эртеля) турбулентного обмена в различных по типам гидрологических условий районах Белого моря.

### **Количественные характеристики изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод на субприливных временных масштабах**

На всех полигонах отмечается изменчивость термохалинных полей в двух диапазонах колебаний с характерными полусуточным (приливым) периодом и периодами в десятки минут (ассоциируемые с короткопериодными ВВ). В разных по гидрологическим условиям и морфометрии дна районах они проявляются по-разному:

- в глубоководной части Бассейна и заливов Белого моря наиболее интенсивные колебания имеют полусуточный период и отмечаются на границе промежуточных и глубинных вод;
- в мелководной части Бассейна (в шельфовых неглубоких районах с хорошо выраженной двухслойной структурой вод) под влиянием прилива отмечается резкое изменение вертикальной структуры вод, но основной вклад в изменчивость вносят короткопериодные колебания типа интенсивных внутренних волн (ИВВ), распространяющиеся в слое между поверхностными и промежуточными водными массами бассейна (рис. 2); в проливных районах около фронтальных зон (на границе Бассейна и Горла, на границе Бассейна и Онежского залива) ИВВ наблюдаются каждый приливной цикл, их высота значительно превышает толщину верхнего однородного слоя, а длительность колебаний лежит в диапазоне 10–20 мин;
- в районах структурных фронтальных зон (Соловецкие салмы, юго-западная часть Горла) наблюдается доминирование приливных колебаний, приводящее к чередованию «горловского» и «бассейнового» видов вертикальных структур; в период наличия стратификации могут отмечаться короткопериодные колебания незначительной интенсивности;
- в Онежском и Двинском заливах (мелководные районы заливов) на фоне хорошо выраженных полусуточных вариаций термоклина и галоклина отмечаются слабо выраженные короткопериодные колебания, на которые эпизодически накладываются резкие колебания, идентифицируемые как цуги короткопериодных ВВ.

В районах с «бассейновым» типом стратификации средняя толщина слоя, охваченного значительными колебаниями, составляет порядка 10 м. Средняя амплитуда колебаний по температуре за приливной цикл равняется 5 °С, по солености — 1 ‰. Максимальная изменчивость гидрологических полей отмечалась в районах моря вблизи фронтальных зон. Амплитуды колебаний здесь составляли более 8 °С и 1,2 ‰. Они охватывали значительную толщу вод в нижней части слоя скачка. Максимальные по абсолютной величине колебания отмечаются вблизи горловского фронта. На полигонах в глубоководной части Бассейна амплитуда колебаний характеристик гидрофизических полей была меньше средних оценок для всего моря.

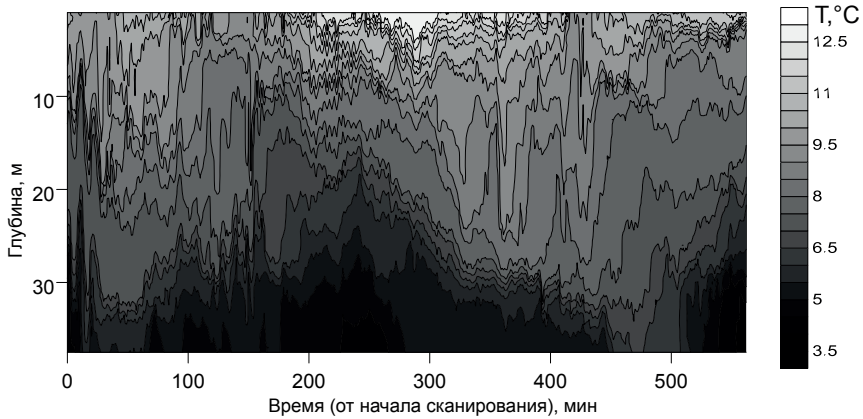


Рис. 2. Временная изменчивость температуры по данным измерений СТД-зондом на полигоне № 7 с 8:53 до 17:10 01.08.2012 г.

В районах с «горловским» типом стратификации изменчивость гидрологических характеристик по вертикали не превышала:  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  — по температуре и  $0,1\text{ }‰$  — по солености. Под влиянием прилива колебания охватывали всю водную толщу.

Для изучения статистической структуры временных рядов температуры и солености на масштабах приливного цикла и менее использовался спектральный анализ. Исходные ряды наблюдений на каждом полигоне разбивались на блоки, соответствующие двум приливным периодам. Для каждого блока выделялась трендовая составляющая гармонического колебания с периодом волны  $M_2$  (12, 24 ч) и оценивался ее вклад в общую дисперсию. Из исходного ряда удалялся тренд. Получался ряд отклонений от тренда, для которого проводился анализ (пример см. рис. 3).

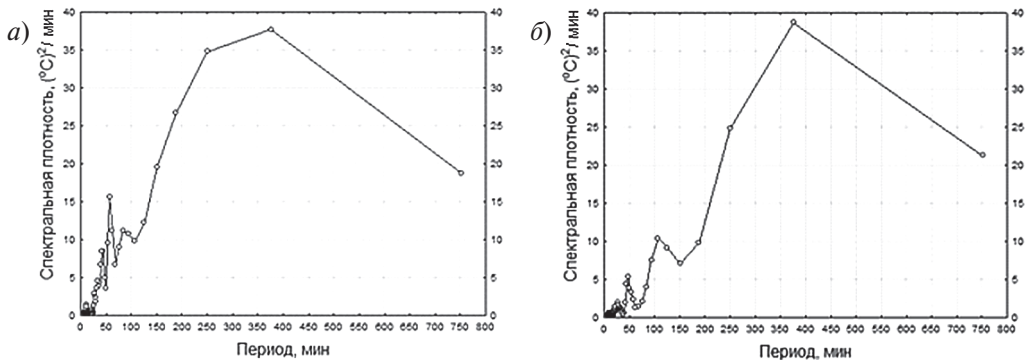


Рис. 3. Функция спектральной плотности с удаленным трендом ( $M_2$ ) по данным наблюдений за температурой на буйковой станции с помощью прибора JFE Ales, установленного на горизонте 12 м (а) и 9 м (б) на полигоне № 4 (Бассейн) 24 июля 2012 г.

В результате анализа на периодах меньше приливного были выделены характерные масштабы: от 12 до 2 ч; от 2 ч до 50 мин, от 50 до 4 мин. Для каждого из выделенных

масштабов рассчитывался вклад в общую дисперсию ряда путем суммирования каждой гармонике, попавшей в данный диапазон.

Колебания с периодом, соответствующим приливу, описывают в среднем 62 % от общей дисперсии исходного ряда, колебания в диапазоне от 2 до 12 ч — 26 %, от 50 мин до 2 ч — 5 %, менее 50 мин — 7 %. Резко отличается от общих тенденций область на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы. Здесь колебания с периодом менее 50 мин вносят вклад в общую изменчивость около 20 %.

Максимальный вклад колебаний с периодом менее 2 ч (до 40 % от общей дисперсии) отмечается в области слоя скачка в шельфовых неглубоких районах моря с хорошо выраженной двухслойной структурой вод около фронтальных зон.

Установлено, что во всех районах моря преобладает устойчивая стратификация вод (температура уменьшается с глубиной, соленость растет), на которую накладываются незначительные по вертикальной протяженности инверсионные (1–2 м) и ступенчатые (1–6 м) структуры. В отдельных случаях величина ступенек достигала 10–15 м.

На большей части акватории моря максимальные тонкоструктурные колебания на профиле температуры отмечаются в области скачка характеристик (на глубине 6–18 м). В среднем пульсации за приливной цикл в области скачка составляют  $\pm 2$  °C и  $\pm 0,5$  ‰. При этом горизонты максимальных положительных и отрицательных пульсаций температуры и солености совпадают, что дает основание предполагать волновой характер их происхождения. Максимальные пульсации по температуре на порядок (8–12 раз) превосходят максимальные пульсации по солености. Они отмечаются в районах моря около проливных зон (мористая граница Западной Соловецкой салмы, южная граница Горла). Самые незначительные по абсолютной величине пульсации (менее 0,9 °C и 0,25 ‰) отмечаются в слабо стратифицированных районах моря (центральная часть пролива Восточная Соловецкая салма, юго-западная часть Горла). Кроме того, на этих полигонах максимальная изменчивость отмечается на глубоководных (29–39 м) горизонтах. Что связано с влиянием адвекции вод в придонном слое под влиянием прилива.

Большая часть тонкой структуры формируется под влиянием процессов, связанных с адвективными процессами, не удовлетворяющими условиям изопикничности. Тонкая структура под влиянием ВВ образуется преимущественно в верхнем 30-метровом слое моря в районах около проливных зон (мористые районы у Соловецких салм, южная граница Горла). Механизмы же, связанные с изопикнической адвекцией, проявлялись примерно в 20 % случаев на горизонтах под слоем скачка в стратифицированных районах моря (Бассейн).

### Короткопериодные внутренние волны

Представления о статистических характеристиках зарегистрированных короткопериодных ВВ можно получить из табл. 1. Внутреннее волнение не отмечалось только в районах с «горловским» типом стратификации. На всех полигонах поле внутренних волн состоит из двух основных компонент — волн приливных периодов и короткопериодных ВВ. В центральной части Бассейна и заливах преобладают волны с полусуточным периодом. На участках шельфа с выраженной двухслойной структурой вод

преобладает короткопериодное волнение, появляющееся регулярно в определенные фазы приливного цикла. Наблюдаемые короткопериодные ВВ можно отнести к первой моде. Самые интенсивные из них (по высоте) распространялись в виде пакетов с максимальной лидирующей волной в цуге. В отдельных районах, располагающихся вблизи фронтов, постоянно отмечаются волны, близкие по своим характеристикам к интенсивным внутренним волнам (ИВВ). Их высота сопоставима с толщиной верхнего однородного слоя. В районе полигона № 1 (на границе Бассейна и Западной Соловецкой салмы), располагавшегося вблизи пролива и фронтальной зоны, за 5 лет наблюдений наибольшую повторяемость имели ВВ высотой от 3 до 5 м и периодом 12–17 мин. Средняя высота ВВ составляла 4,3 м, а период — 14 мин. Перемежаемость внутреннего волнения составила около 50 %. В ходе каждого приливного цикла в районе полигона наблюдалось не менее 2–3 волн, которые можно отнести к ИВВ. На полигонах, располагавшихся в районах Бассейна вдалеке от фронтальных зон и неровностей дна, короткопериодные ВВ были весьма редким явлением, а ВВ экстремальных высот там вообще не отмечались.

Таблица 1

**Пространственная и межгодовая (на примере полигона № 1) изменчивость статистических характеристик ВВ, зарегистрированных по данным контактных наблюдений в Белом море за период 2009–2014 гг.**

Полигон (год)	Кол-во КВВ за цикл М <sub>2</sub> , шт.	Кол-во КВВ за цикл М <sub>2</sub> высотой > 5 м, шт.	Период КВВ: средний (мин.–макс.), мин	Высота КВВ: средняя (мин.–макс.), м
1 (2009)	33	5	11 (3–36)	3,1 (1–7,8)
1 (2010)	46	13	18 (4–72)	5,6 (1–17,9)
1 (2011)	40	5	12 (3–32)	3,7 (1–13,9)
1 (2012)	57	3	7 (4–34)	2,2 (1–7,7)
1 (2013)	48	1	12 (3–36)	2,2 (1–7,6)
2 (2012)	81	3	7 (3–25)	2,6 (1–9)
3 (2012)	68	5	9 (3–24)	2,5 (1–8,3)
3 (2014)	36	8	14 (3–30)	4,5 (1–15)
4 (2012)	12	0	8 (4–26)	1,5 (1–3)
5 (2012)	12	0	9 (5–21)	1,8 (1–4,9)
6 (2012)	0	0	–	–
7 (2012)	57	2	13 (3–42)	2,5 (1–7,6)
8 (2012)	11	0	8 (4–23)	1,6 (1–3,5)
9 (2009)	25	5	14 (4–58)	3,9 (1–14,7)
10 (2011)	12	0	25 (6–68)	1,6 (1–3,3)
11 (2011)	26	0	6 (2–20)	1,7 (1–4,9)
12 (2013)	3	0	30 (18–41)	1,2 (1–1,8)
13 (2014)	21	4	16 (6–32)	1,8 (1–7,0)
14 (2014)	7	0	26 (18–56)	1(1)



Во всех рассматриваемых районах с «бассейновым» типом стратификации спектры короткопериодных ВВ превосходили модельный спектр Гарретта–Манка, а по закону спадаения совпадали с ним. При этом максимальное превышение над модельным спектром наблюдалось на полигоне, расположенном в Восточной Соловецкой салме вблизи неровности дна рядом с фронтом приливного перемешивания.

Оперативный подспутниковый эксперимент для исследования особенностей проявления ВВ на поверхности в Белом море проводился летом 2012 г. на границе Горла и Бассейна [11]. Он включал одновременные судовые и спутниковые наблюдения. Основные задачи работы заключались в описании по данным контактных измерений характеристик короткопериодных внутренних волн в течение приливного цикла, соответствующего гармонике  $M_2$ , а также в оценке пространственно-временной изменчивости характеристик ВВ на основе спутниковых снимков радиолокаторов с синтезированной апертурой, получаемых в оперативном режиме, и в сопоставлении результатов разнородных наблюдений.

Сопоставление характеристик ВВ, полученных на основе контактных и дистанционных наблюдений, показало их удовлетворительное соответствие. При глубине залегания пикноклина 8–15 м в РЛ-изображениях находили проявление ВВ с высотами 2–4 м, длинами 200–300 м и периодами 9–12 мин. Стоит добавить, что в 4 из 6 зафиксированных случаев наблюдения ВВ прохождение сликовых полос на поверхности моря отмечалось визуально. Таким образом, сопоставление разнородных наблюдений показало, что короткопериодные ВВ распространяются, в основном, пакетами и находят свое отражение в судовых, спутниковых и визуальных наблюдениях. Регулярность проявлений таких пакетов на снимках и в измерениях *in situ* в определенные фазы прилива с большой долей уверенности подтверждает их связь с приливной динамикой.

Обобщение спутниковых данных позволило выявить области с различной распространенностью ВВ на акватории Белого моря [5, 8]. По данным спутниковых наблюдений на всех рассмотренных РЛ-снимках было обнаружено 489 пакетов ВВ. Чаще всего ВВ наблюдались в виде пакетов по 2–4 волны с длиной гребня лидирующей волны 16 км. Средняя длина зарегистрированных короткопериодных ВВ — 500 м, период — 12 мин, высота — 2,3 м.

Большинство ВВ зарегистрировано в шельфовых районах с глубинами 30–70 м. В 75 % случаев зарегистрированные проявления ВВ наблюдались в области, охватывающей северо-восток Бассейна, юг Горла и глубоководную часть Двинского залива. Внутри этой области волновые пакеты отмечались чаще всего на границе Горла и Бассейна. В Двинском заливе сигнатуры волн наблюдались реже, преимущественно мористее границы фронта стокового течения реки Северная Двина. Примерно в 20 % случаев отмечались проявления ВВ вокруг Соловецких островов. В основном они привязаны к глубоким частям в районе проливов. Остальные 5 % пришлось на центральную глубоководную часть Бассейна. Не были зарегистрированы ВВ в Кандалакшском заливе, в районах со слабовыраженной стратификацией вод (центральная часть пролива Горло и большая часть Онежского залива) и значительного влияния речного стока (кутовая часть Двинского залива).

Длины волн в пакетах колебались преимущественно в диапазоне от 150 до 1500 м при ширине фронта от 2 до 30 км. Наиболее крупные структуры ВВ отмечались в центральной

части Бассейна. Длины волн там достигали 2,55 км, величина длины фронта лидирующей волны — до 176 км, протяженность пакета поперек фронта — 11,6 км. Они двигались по направлению из Горла, преимущественно в юго-западном направлении, покрывая значительную часть моря. Предполагается, что пакеты ВВ, возникая регулярно в южной части Горла, движутся через все море, трансформируясь при распространении, и окончательно разрушаются в мелководной зоне севернее Соловецкого архипелага.

В отдельных случаях наблюдались системы последовательных пакетов ВВ, пробегающих все море с финальным разрушением в шельфовой зоне у входа в Западную Соловецкую салму. При этом расстояние между цугами составляло 30–40 км, а сами цуги — 3–9 волн. ВВ внутри цуга имели длины от 1,4 до 2,5 км и охватывали значительные акватории моря.

В Двинском заливе волновые пакеты двигаются во всех направлениях. Преобладают группы от 2 до 5 волн длиной 200–1300 м при длине гребня от 3 до 70 км и средней площади 40 км<sup>2</sup>, чаще всегодвигающиеся от стокового фронта, образуемого рекой Северная Двина. В области, прилегающей к Соловецким островам, площади пакетов еще меньше, так как цуги волн содержат в себе не более 2–3 волн; там же часто встречались солитоны.

Проявления ВВ на границе Бассейна и Горла чаще регистрировались в сизигию (28 раз), чем в квадратуру (10 раз). Причем часто они отмечались в прилив и как бы «исходили» из одних и тех же районов, что подтверждает преимущественно приливной характер их образования.

В результате исследований выделены типичные районы регистрации ВВ:

- участки вблизи фронтальных зон с ярко выраженной стратификацией вод, в частности на границе Бассейна и Горла, в Двинском заливе, севернее Соловецких островов;
- участки шельфа с глубинами 30–50 м, где при наличии активной динамики сохраняется стратификация вод и присутствуют значительные неровности дна: подводный желоб на границе Бассейна и Горла, районы Западной и Восточной Соловецких салм.

Выделены районы, где проявление ВВ носит случайный характер: а) Бассейн и Кандалакшский залив (глубоководные участки моря, где приливной поток слабо взаимодействует с дном, большинство КВВ приходят туда из других районов); б) центральная часть Горла и Онежского залива (мелководные участки шельфа, воды которых полностью перемешаны под влиянием приливных процессов).

Отметим, что регулярность наблюдений ВВ в определенную фазу волны  $M_2$  и зависимость количества их проявлений от фазы луны [4, 5, 9, 30] подтверждает вывод о преимущественно приливном характере их образования.

### **Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика**

Величина бароклинного радиуса Россби в Белом море в летний период, полученная на основе климатических оценок, варьировалась в пределах 1–8 км [7]. Наименьшие значения отмечаются в мелководных слабо стратифицированных Двинском

и Онежском заливах и Горле. В глубоководной части Бассейна и Кандалакшского залива значения радиуса максимальны и мало отличаются по месяцам.

По данным измерений на полигонах было установлено, что вихревые субмезомасштабные структуры прослеживаются преимущественно над неровностями дна (банками). Их образование отмечается в определенную фазу прилива. Все зафиксированные структуры имели циклонический тип завихренности и охватывали приповерхностные слои (10–20 м), но не всегда четко отражались на поверхностном горизонте. Как правило, образовавшаяся вихревая структура прослеживалась у банки в течение не более 3–4 ч, а затем двигалась в направлении доминирующего потока и быстро разрушалась. Они имели характерное время жизни от 3 до 6 ч.

По спутниковым данным за четыре года были детектированы 162 вихря (рис. 4). Они являются распространенным явлением на акватории Двинского залива и Бассейна Белого моря, а также в проливных зонах вокруг островов Соловецкого архипелага. Число вихревых проявлений увеличивается с мая по июль, при этом в июне и июле их количество составило более 65 %. В мае вихревые образования практически не наблюдались на акватории (всего лишь 2 %). Остальная часть вихрей пришлось на август (около 19 %) и сентябрь (около 14 %).

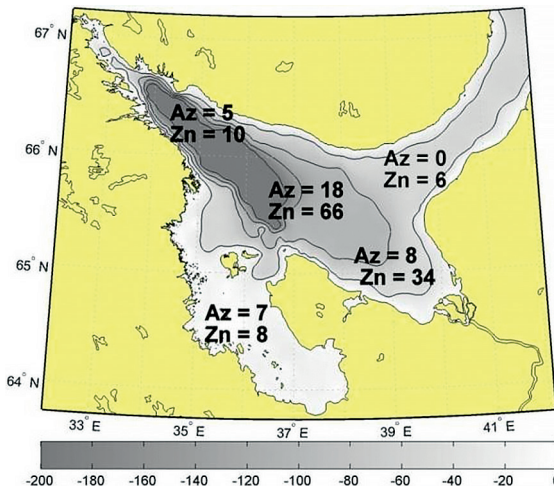


Рис. 4. Количественное распределение вихревых структур по акватории Белого моря

В целом по акватории средний диаметр вихревого образования составляет чуть меньше 5 км, что примерно соответствует среднему значению бароклинного радиуса Россби. Наиболее крупные вихри отмечались в открытой части Бассейна (до 13 км), а самые маленькие — в прибрежной зоне около Карельского берега и Соловецких островов (0,9 км). Чаще всего наблюдались изолированные циклонические вихри диаметром 2–6 км.

В летний период в Белом море в основных фронтальных зонах градиент температуры поверхности моря в 10 раз превышает фоновый градиент по морю. Области, где

проявляются поверхностные фронты, занимают значительную площадь моря, локализованную около среднего положения фронтальных линий. В Двинском заливе эта область занимает почти две трети акватории залива, а величина смещения стокового фронта на его западном фланге достигает за месяц 70 км. Все фронты испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя. Однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров, достигающими размеров до нескольких десятков километров. Наибольшая изменчивость поля температуры в виде возмущений фронтального раздела присуща Горловской зоне. Эта динамика является важным элементом водообмена в проливе.

Проведенный анализ [21, 23] показывает, что интенсивная динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним значениям за лето. Из сравнения месячных (рис. 5, б) и декадных (рис. 5, а) карт фронтальных линий следует, что при изучении сезонной изменчивости положения фронтов следует ориентироваться на декадные данные, которые характеризуют синоптическую изменчивость, а не на среднемесячные оценки этой изменчивости.

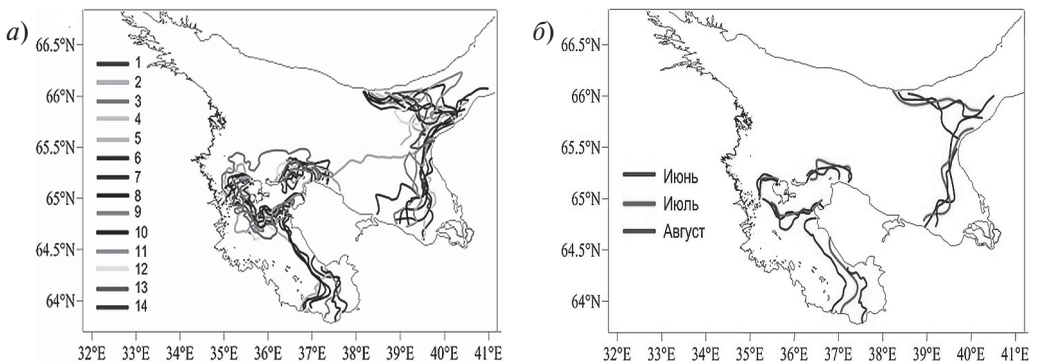


Рис. 5. Сезонная изменчивость положения фронтальных разделов на поверхности Белого моря, где *а* — положения для каждой из 14 декад; *б* — положения по среднемесячным данным

Результаты контактных наблюдений свидетельствуют о значительной мезомасштабной (приливной и ветровой) изменчивости характеристик фронтальных разделов в Белом море. Она проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км. Временной интервал наблюдаемой изменчивости составлял от нескольких часов до суток. Под влиянием приливно-отливных течений и ветра фронтальные структуры различного генезиса могут трансформировать друг друга в Горле. Спутниковые данные подтверждают, что такое взаимодействие часто наблюдается на протяжении всего лета.

Как показал анализ композитных карт, субмезомасштабные вихри и ВВ были детектированы на акватории моря преимущественно во фронтальных зонах или вблизи

от них. В наибольшей степени это характерно для областей изменчивости Двинского и Горловского фронтов. В Двинском заливе наблюдалась повышенная вихревая активность, а с Горловским фронтом мы связываем большую часть наблюдаемых проявлений короткопериодных внутренних волн.

Отмечается, что пик внутриволновой активности приходится на август, а вихревой — на июнь—июль. Повышение вихревой активности происходит на пике формирования стоковых фронтов, когда сезонный прогрев верхнего слоя еще не достиг своего максимума. Большинство вихрей отмечалось в Двинском заливе, в период наибольшей изменчивости его поверхностного фронта. Напротив, когда в середине августа сезонный термоклин сформирован полностью, а активность фронтов проявляется в языках и меандрах, то эти обстоятельства способствуют более эффективной генерации короткопериодных ВВ.

Исследование причин появления субмезомасштабных вихрей показало, что многие из механизмов их генерации реализуются вблизи фронтов или связаны с активной динамикой фронтальных разделов. В частности, неустойчивость шельфово-приливных фронтов и топографические эффекты в приливно-отливном потоке являются специфическим фактором вихреобразования в Белом море.

Механизм образования и проявления ВВ на акватории моря можно разбить на группы. Первая группа — ВВ в центральной части Бассейна, которые распространялись из Горла преимущественно в юго-западном направлении. Это группа регулярно появляющихся ВВ приливного происхождения с очевидным очагом их генерации. Возможный механизм генерации предполагает их образование в результате разрушения бароклинного прилива непосредственно в зоне взаимодействия Горловского термохалинного фронта с сильным приливным потоком. Ко второй группе относятся волны, которые приурочены к областям изменчивости поверхностных фронтов. Размеры гребней ВВ здесь меньше, а выявить преобладающее направление распространения пакетов не удастся. Большая часть поверхностных структур приходится на зоны Горловского и Двинского фронтов. Наконец, остальные волны, которые не относятся к фронтальным (по географической привязке) или регулярным структурам с определенным очагом генерации.

В результате можно сделать вывод, что основными источниками образования короткопериодных ВВ в Белом море являются дезинтеграция бароклинных приливных и инерционных движений, которые активно проявляется во фронтальных зонах.

### **Влияние короткопериодной изменчивости на особенности турбулентного обмена**

Расчеты выполнялись с шагом 2 мин за период в два приливных цикла волны М<sub>2</sub>. Временной масштаб осреднения исходных данных по проекциям скорости для расчета пульсаций течений составлял 30 мин.

Установлено, что значения коэффициентов горизонтальной турбулентной вязкости в среднем составили 10 м<sup>2</sup>/с за приливной цикл; наиболее интенсивный горизонтальный обмен наблюдался в районе Горла, где значения коэффициента горизонтального обмена на порядок превышают средние значения; минимальные значения коэффициентов отмечаются в мелководной части Бассейна на полигонах, выполненных к северу от Соловецких островов и в центральной части Двинского залива, они

на порядок ниже средних оценок; обнаружена анизотропия горизонтального турбулентного обмена (отношение длин осей эллипса составило около 1,5) в прибрежных и проливных районах Белого моря; показано, что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной субмезомасштабной вихревой активности или частых проявлений короткопериодных внутренних волн. Отметим также, что, когда на полигоне регулярно регистрировались ИВВ, горизонтальный обмен в целом за приливной цикл был больше в 1,5–2 раза, чем в их отсутствие.

Коэффициент диапикнической диффузии оценивался для слоя от 6 до 35 м (глубины варьировались в зависимости от полигона) с двумя различными шагами по времени. В первом случае расчет был проведен с шагом 2 мин без осреднения исходной информации для того, чтобы учесть эффекты, связанные с ВВ, а во втором случае — после осреднения данных за два часа, чтобы полностью исключить проявления короткопериодных ВВ. Результаты обоих расчетов усреднялись за приливной цикл.

По результатам расчета значения коэффициентов изменяются от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  м<sup>2</sup>/с, в среднем составляя  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/с. Было установлено, что интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3–4 раза меньше, чем в шельфовых районах; области, где часто регистрируются короткопериодные ВВ, характеризуются повышенной интенсивностью вертикального обмена; под влиянием ИВВ вертикальный обмен под пикноклином усиливается в 2 раза.

### Заключение

На основе обширного массива высокоразрешающих спутниковых и контактных наблюдений за 2006–2014 гг. проведено комплексное исследование субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей в Белом море. Впервые получены числовые оценки внутрприливной изменчивости гидрофизических полей, тонкой структуры вод и особенностей пространственно-временной изменчивости характеристик короткопериодных ВВ, субмезомасштабных вихрей, синоптической и мезомасштабной фронтальной динамики, а также процессов перемешивания для акватории Белого моря в условиях современного меняющегося климата.

В основе исследования лежит разработанная совокупность методов целенаправленного сочетания разнородных спутниковых данных и учащенных контактных наблюдений и их совокупного анализа. Она позволяет оценивать изменчивость характеристик гидрофизических полей и ассоциируемых с ней процессов и явлений на масштабах от сотни метров до десяти километров и от единиц минут до приливного периода на акватории всего моря в теплый сезон [10, 12].

Выявлены новые закономерности изменчивости гидрофизических полей и тонкой структуры вод: на масштабах меньше приливного цикла выделяются три характерных максимума изменчивости — 5–6 ч, 1–2 ч и 8–50 мин; максимальный вклад в изменчивость в интервале от 8 мин до 2 ч (по температуре и солёности до 40 % в общую дисперсию рядов) отмечается в области скачка в районах моря с хорошо выраженной стратификацией вод, но вблизи фронтальных зон; такая изменчивость преимущественно обусловлена прохождением интенсивных короткопериодных ВВ с высотами более 10 м; большая часть тонкой структуры вод формируется под влиянием процессов,

связанных с адвекцией, неудовлетворяющей условиям изопикничности; кинематический эффект внутренних волн оказывает значительное влияние на трансформацию тонкой структуры вод в верхнем 30-метровом слое.

Найдены физико-географические закономерности распределения характеристик короткопериодных ВВ: волны встречаются регулярно — в южной части Горла, в Двинском заливе, вокруг Соловецких островов (около фронтов и неровностей дна); волны встречаются эпизодически — в центральной части Бассейна и Онежском заливе (большинство волн приходят туда из других районов); волны не встречаются в северо-западной части Бассейна, Кандалакшском заливе, кутовых частях Двинского и Онежского заливов; короткопериодные ВВ встречаются чаще в виде трехволновых пакетов со средними характеристиками: длина волны — 500 м, период — 11 мин, высота — 2,5 м; максимальные по площади пакеты волн отмечаются в Бассейне; средние характеристики ВВ в течение теплого сезона в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году; максимальное количество короткопериодных ВВ отмечается в августе; вблизи от фронтальных разделов и неровностей дна (положительных и отрицательных) ВВ появляются регулярно с приливной периодичностью, около приливных фронтальных разделов в неглубоких районах моря с выраженной двухслойной структурой вод высота ВВ регулярно превышает 10 м [8, 9].

Получены физико-географические закономерности распределения характеристик субмезомасштабных вихрей: субмезомасштабные вихри чаще всего встречаются на акваториях Двинского залива и Бассейна в районах фронтов и свалов глубин; субмезомасштабные вихри чаще всего имеют циклонический тип вращения, диаметр 2–6 км; антициклонические вихри регистрируются в три раза реже циклонических, но их диаметры в среднем больше; средние характеристики вихрей в одни и те же месяцы слабо меняются от года к году; максимальное количество субмезомасштабных вихрей наблюдается в июне–июле; над неровностями дна (банками) около Соловецких островов образование субмезомасштабных вихрей отмечается в определенную фазу прилива, они проявляются в верхнем 10–20-метровом слое и прослеживаются в течение 3–4 ч [7].

Установлены особенности локальной фронтальной динамики: интенсивная синоптическая динамика фронтов происходит внутри месячных интервалов, в то время как среднемесячные положения фронтальных линий близки к их средним за лето и не отражают особенности сезонного хода фронтальной динамики; фронты, в первую очередь стоковые, испытывают наибольшие перемещения в первой половине теплого сезона под влиянием синоптических процессов и речного стока на фоне недостаточного прогрева верхнего слоя, однако их высокая динамическая активность сохраняется и позже, проявляясь в виде образования языков и меандров, преимущественно у приливных фронтов, размерами до нескольких десятков километров; значительная мезомасштабная динамика характеристик фронтальных разделов, возникающая под воздействием прилива и ветра, проявляется в усилении (ослаблении) значений вертикального и горизонтального градиентов температуры в несколько раз, в колебаниях глубины залегания термоклина (пикноклина) до 20 м и в смещениях фронтальных разделов на дистанцию до 15 км [12, 21].

Показана роль фронтов в динамике короткопериодных волн и субмезомасштабных вихрей: значительное число субмезомасштабных вихрей и короткопериодных ВВ

(около 65 %) детектируются во фронтальных зонах или вблизи этих зон; субмезомасштабные вихревые структуры регистрируются преимущественно внутри зон стоковых (Двинская, Онежская) и на периферии структурных (Горловская, Соловецкая) фронтальных зон; повышение вихревой активности происходит на пике трансформации стоковых фронтов в неглубоком пикноклине; циклическая динамика фронта приливного перемешивания в Горле является источником регулярных проявлений значительных по размерам гребней короткопериодных ВВ, которые могут распространяться на 200 км от района генерации и существовать в течение 3–5 циклов полусуточной прилива  $M_2$ , пересекая всю акваторию Бассейна [23].

Установлены особенности турбулентного обмена в Белом море на масштабах приливного цикла, учитывающие влияние субприливных явлений: прослеживается анизотропия горизонтального турбулентного обмена в прибрежных и проливных районах Белого моря; максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной встречаемости субмезомасштабных вихрей или короткопериодных ВВ; интенсивность вертикального обмена в мористых районах Бассейна и центральной части Двинского залива в 3–4 раза меньше, чем в районах около фронтальных зон; под влиянием ИВВ вертикальный и горизонтальный обмен под пикноклином усиливается в два раза.

### Литература

1. *Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Ч. I.* — СПб., 1995. — 250 с.
2. *Волженский М.Н., Родионов А.А., Зимин А.В. и др.* Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря // *Фундам. и прикл. гидрофизика*. 2009. № 3. — С. 33–41.
3. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Б.Х. Глуховского.* — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 240 с.
4. *Зимин А.В.* Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 1. — С. 16–25.
5. *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.
6. *Зимин А.В.* Методика выполнения натурных экспериментов по исследованию короткопериодных внутренних волн в морях Северо-Европейского бассейна. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621214 от 24.09.2013.
7. *Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А. и др.* Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1–2. — С. 129–135.
8. *Зимин А.В., Козлов И.Е., Атаджанова О.А. и др.* Комплексный мониторинг короткопериодных внутренних волн в Белом море // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 5. — С. 51–61.
9. *Зимин А.В., Родионов А.А., Жегулин Г.В.* Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // *Фундам. и прикл. гидрофизика*. 2013. Т. 6. № 3. — С. 19–33.
10. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Атаджанова О.А. и др.* Опыт разработки системы мониторинга короткопериодных процессов и субмезомасштабных структур в Белом море и результаты ее апробации летом 2014 г. // *Учен. зап. РГГМУ*. 2015. № 41. — С. 116–125.
11. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. и др.* Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // *Исслед. Земли из космоса*. 2014. № 3. — С. 41–55.
12. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Родионов А.А. и др.* Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. // *Фундам. и прикл. гидрофизика*. 2014. Т. 7. № 1. — С. 85–92.



13. *Инжебейкин Ю.И.* Особенности мезомасштабных вариаций абиотических компонентов экосистемы Белого моря // VIII Регион. науч.-прак. конф. «Проблемы изучения, рац. использ. и охраны природ. ресурсов Белого моря». — Архангельск, 2001. — С. 36–39.
14. *Ионов В.В., Шилов И.О.* Особенности распространения речных вод и динамики океанологических фронтов в Белом море по результатам спутниковых ИК-измерений и натурным наблюдениям в летний период // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 1996. Вып. 2. № 14. — С. 53–61.
15. *Каган Б.А., Софьина Е.В., Рашиди Э.Х.А.* О влиянии Белого моря на приливы в соседних окраинных морях Северо-Европейского бассейна // Известия РАН. ФАО. 2013. Т. 49. № 1. — С. 97–112.
16. *Каган Б.А., Тимофеев А.А.* Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Известия РАН. ФАО. 2005. Т. 41. № 4. — С. 844–850.
17. *Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В. и др.* Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений // Современные пробл. дист-го зонд-я Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. — С. 338–345.
18. *Коросов А.А.* Разработка и применение процедуры комплексного дистанционного зондирования для исследования внутриводных процессов в морях и крупных озерах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. — СПб., 2007. — 26 с.
19. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный мониторинг морей России. — М.: ИКИ РАН, 2011. — 472 с.
20. *Пантюлин А.Н.* Структура и динамика водного тела Белого моря. Динамика, структура и водные массы // Система Белого моря. Т. II, Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — М.: Научный мир, 2012. — С. 309–379.
21. *Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В. и др.* Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2014. Т. 7. № 3. — С. 29–41.
22. *Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В.* Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2012. Т. 5. № 2. — С. 89–108.
23. *Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А. и др.* Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундам. и прикл. гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1. — С. 59–72.
24. *Семенов Е.В., Лулева М.В.* Численная модель приливной и термохалинной циркуляции вод Белого моря // Известия РАН. ФАО. 1996. Т. 32. № 5. — С. 704–713.
25. *Семенов Е.В., Булатов М.Б.* Анализ результатов работы оперативной модели гидрофизических полей Белого моря в июле – августе 2008 г. // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 3. — С. 410–415.
26. *Серебряный А.Н., Пака В.Т., Корж А.О.* Исследование с помощью ADCP течений и внутренних волн в Белом море // Геология морей и океанов: Мат-лы XVIII Межд. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. III. — М.: ГЕОС, 2009. — С. 245–250.
27. *Система Белого моря. Т. II, Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / под ред. акад. А.П. Лисицына.* — М.: Научный мир, 2012. — 784 с.
28. *Солянкин Е.В., Зозуля С.А., Кровнин А.С., Масленников В.В.* Комплексные исследования экосистемы Белого моря. Термохалинная структура и динамика вод Белого моря летом 1991 г. / под ред. В.В. Сапожникова. — М.: ВНИРО, 1994. — С. 8–25.
29. *Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю.* Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. — Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. — 35 с.
30. *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, p. 99–107. — DOI:10.1016/j.rse.2014.02.017.

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