

УДК 551.465

©А. А. Родионов¹, Д. А. Романенков¹, А. В. Зимин^{1,2}, И. Е. Козлов^{2,3}, Б. Шапрон^{4,2}

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

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

³Клайпедский Университет, г. Клайпеда, Литва

⁴Французский исследовательский институт эксплуатации морских ресурсов, г. Брест, Франция
dmromanenkov@yandex.ru

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРЫ ВОД БЕЛОГО МОРЯ И ИХ ДИНАМИКА. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обсуждаются данные дистанционных (спутниковых) и контактных наблюдений, направленных на изучение субмезомасштабных динамических процессов и явлений в Белом море, связанных с внутренними волнами, вихрями и фронтальными разделами. На основании многолетнего комплексного мониторинга выявлено широкое распространение короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря и получены их статистические характеристики. Построены карты распределения характеристик субмезомасштабных вихрей на акватории Белого моря. На основе статистического анализа выделены районы вихревой активности, которые оказались близки к зонам гидрологических фронтов. Приведены результаты обработки спутниковой информации, включающие в себя статистическое описание среднего градиента поверхностной температуры и характеристик выделенных фронтальных разделов Белого моря в месячном и декадном разрешении. Наблюдения в районах с выраженной стратификацией выявили сильную динамику вихревых образований в поверхностном слое и значимую изменчивость характеристик и положения фронтальных зон в приливном потоке над неровностями рельефа дна. Результаты проведенных в Белом море исследований показали, что для установления закономерностей субмезомасштабной изменчивости гидрофизических полей под влиянием приливного потока необходимо совместное использование спутниковых и контактных наблюдений в сочетании с модельным физико-математическим подходом. Намечены направления ближайших исследований.

Ключевые слова: субмезомасштабная динамика, вихрь, внутренняя волна, фронт, Белое море.

Во второй половине XX в. внимание исследователей океана было сосредоточено преимущественно на исследовании крупномасштабной и низкочастотной части мезомасштабной (синоптической) изменчивости гидрофизических полей океана, а также тонкой структуры вод и турбулентности [1—3]. В конце прошлого и начале нынешнего века в связи с развитием спутниковых и контактных систем наблюдения и возросшими возможностями вычислительных систем начали интенсивно изучаться процессы и явления в короткопериодной части мезомасштаба (так называемом субмезомасштабе) с характерными размерами структур вод от нескольких сотен метров до десятков километров. Характерное время жизни субмезомасштабных неоднородностей — от нескольких десятков минут до нескольких суток. Эти неоднородности могут порождаться короткопериодными внутренними волнами, малыми вихрями и струями, локальной изменчивостью положения фронтальных разделов. Субмезомасштабные динамические явления характеризуются числами Россби и Ричардсона порядка единицы и играют важную роль в вертикальном и горизонтальном обмене и перемешивании [4, 5].

Субмезомасштабные структуры изучаются теоретически и экспериментально [6—27]. Высокорастворяющие численные модели позволяют воспроизводить эти сложные гид-

родинамические процессы, но в то же время нуждаются в новой экспериментальной информации о субмезомасштабных структурах для согласования ключевых параметров теоретических подходов. Особенности субмезомасштабных процессов и явлений (небольшие размеры и относительно короткое время жизни) требуют организации специализированных экспериментов с применением контактных и дистанционных методов наблюдения для их идентификации и мониторинга. Можно констатировать, что подобные натурные исследования все еще недостаточны в хорошо изученных районах Мирового океана.

В современных условиях спутниковая океанография позволяет расширить наши знания о субмезомасштабных структурах и их динамике на значительных акваториях. Однако качество спутниковой информации сильно зависит от типа и характеристик используемых спутниковых сенсоров и сопутствующих атмосферных условий. Ее ценность повышается при наличии синхронных контактных измерений. Разумная стратегия заключается в сочетании мультисенсорных дистанционных наблюдений и результатов контактных наблюдений, которая позволит не только получить качественно новую информацию для создания усовершенствованных модельных подходов, но и изучить физические механизмы, лежащие в основе динамики процессов на масштабах от несколько сотен метров до 10 км и от десятков минут до нескольких суток. Некоторые результаты реализации такой стратегии и перспективы ближайших исследований применительно к океанографии Белого моря представлены в данной статье.

Белое море является одним из наиболее изучаемых арктических морей России [28—38]. Общая циркуляция вод в Белом море обусловлена наличием питающего (Дерюгина) и стокового (Тимонова) течений в Горле и Воронке (рис. 1), циркуляциями разного знака вращения в Бассейне.

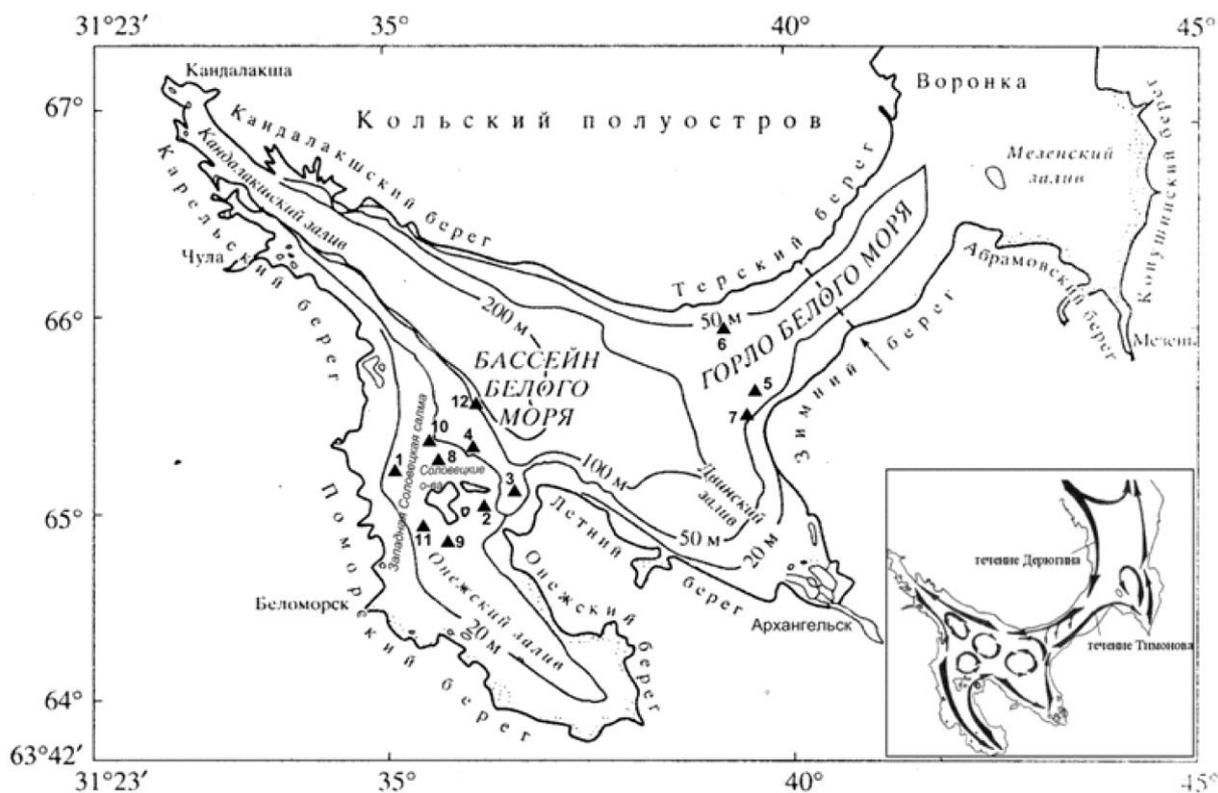


Рис. 1. Карта Белого моря. На врезке — схема течений по [31].

Треугольники с номерами показывают положение полигонов контактных измерений 2008—2013 гг. Полигоны 1 и 9 располагаются над банками Северная и Южная соответственно. Полигоны 3, 2 и 9 — в проливе Восточная Соловецкая салма.

Положение антициклонических и циклонических круговоротов не является стабильным и изменяется в зависимости от сезонной интенсивности стока рек и динамического воздействия атмосферы на акватории моря. Основными источниками формирования водных масс Белого моря служат баренцевоморские и материковые воды. В результате смешения этих основных вод образуются вторичные водные массы. В летний сезон выделяется шесть водных масс: баренцевоморская, горловская, а также поверхностная, промежуточная и глубинная в Бассейне и опресненные воды заливов. Характерной особенностью моря является наличие различно стратифицированных районов, разделенных фронтальными зонами. Для Белого моря характерны стоковые и структурные фронтальные разделы. Стоковые разделы образуются в местах впадения крупных рек или в их эстуариях и проявляются в Онежском и Двинском заливах. Структурные фронты являются границами между стратифицированными и перемешанными водами моря. В Белом море существует две структурные фронтальные зоны: в Горле и в районе Соловецких островов. Сезонный ход является наиболее значимой и устойчивой в многолетнем плане составляющей колебаний гидрофизических полей, а из межгодовых колебаний доминируют квазидвухлетние и квазипятилетние периоды. При этом колебания синоптических масштабов, связанные с атмосферным воздействием, имеют радиусы корреляции во времени и пространстве около 5—8 сут и 40—60 миль соответственно.

Большая часть мезомасштабных колебаний гидрологических элементов в Белом море обусловлена полусуточной приливной волной M_2 с периодом 12.42 ч. В районах с хорошо выраженной стратификацией вод в летний период заметно влияние внутреннего прилива [19, 28, 32, 33]. Применение математических моделей [30, 32—37] позволило получить оценки изменчивости состояния гидрологических характеристик моря на крупномасштабном и мезомасштабном интервалах в зависимости от влияния на них различных условий среды. Однако количественные сведения о субмезомасштабных процессах и явлениях, протекающих в море, все еще недостаточны [37, 38]. Это препятствует внедрению новых математических моделей, усваивающих данные наблюдений высокого пространственно-временного разрешения и позволяющих оценить вклад субмезомасштабной изменчивости в процессы других масштабов.

Короткопериодные внутренние волны (ВВ). С 2006 г. по настоящее время специалистами СПбФ ИО РАН выполняются комплексные экспедиционные исследования в Белом море по изучению изменчивости гидрологических полей на временных масштабах от единиц минут до нескольких приливных циклов [39—48]. Контактные измерения проводятся по единой методике в районах с различной гидрологической структурой вод и морфометрией дна (рис. 1). Основой методики работ является проведение измерений на микрополигонах, сочетающих площадные съемки (выполнявшиеся с привязкой к приливному циклу), постановку многосуточных буйковых станций и многочасовые СТД-сканирования водной толщи с дискретностью 1—2 мин [41, 42, 46].

Для исследований пространственной субмезомасштабной изменчивости на акватории Белого моря специалистами Лаборатории спутниковой океанографии (ЛСО) РГГМУ совместно со специалистами СПбФ ИО РАН были проанализированы спутниковые радиолокационные (РЛ) и ИК-изображения из архива спутниковой информации ЛСО РГГМУ (<http://arctic.solab.rshu.ru>). В настоящее время обработаны спутниковые данные за летние сезоны 2009—2012 гг. В 2009—2011 гг. использовались РЛ-изображения ENVISAT ASAR в режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) и IMP (400×100 км и 25×25 м соответственно). В 2012 г. использовались РЛ-снимки RADARSAT-1 с пространственным разрешением 25 м в режиме съемки SGF и RADARSAT-2 в режиме Fine Quad-Pol с пространственным разрешением 6 м. В дополнение к РЛ-данным проводился анализ по-

лей температуры поверхности моря на основе ИК-данных MODIS Aqua/Terra за лето 2010—2011 гг.

В 2010 г. в ходе экспедиционных исследований в проливе Западная Соловецкая салма (полигон 1, рис. 1) наблюдались интенсивные короткопериодные колебания термохалинной структуры вод (рис. 2). Анализ наблюдений [42] дает основание полагать, что эти колебания возникают в результате трансформации внутренней приливной волны, которая по мере движения вглубь шельфа принимает форму внутреннего бора, а затем на мелководье распадается в цуг интенсивных внутренних волн (ИВВ) с высотой более 12 м. Интересно, что прохождение волн даже при отсутствии их обрушения приводит к значительной интенсификации вертикального перемешивания [42]. По данным наблюдений 2011 и 2013 гг. [45, 46] установлено, что на границе Бассейна и мелководной зоны (полигон 12, рис. 1) наиболее интенсивное внутреннее волнение имеет полусуточный период и отмечается только в слое придонных вод. В мелководной зоне (полигоны 10 и 11, рис. 1) в прилив наблюдается внутренняя приливная волна в виде бора, фронт которой перемещается к берегу, а в отлив — группы короткопериодных ИВВ, волновой вектор которых направлен в открытое море. В узкой части пролива Западная Соловецкая салма (полигон 11, рис. 1), напротив, в отлив наблюдается полная однородность вод, а в прилив — заток холодных вод в придонном слое, на гребне которого распространяются короткопериодные ВВ [46]. В среднем за 5 лет наблюдений (2009—2013 гг.) в районе полигона 1 наибольшую повторяемость имели ВВ высотой 3—5 м и периодом 12—17 мин. Перемежаемость (отношение времени существования короткопериодных колебаний с высотой более 1 м к общему времени наблюдения) составила 50 %. В ходе каждого приливного цикла в районе полигона наблюдалось не менее 4—5 волн, которые можно отнести к ИВВ. Сведения о характеристиках короткопериодных ВВ в других районах моря приведены в [40—42, 45—48]. Регулярность наблюдений пакетов короткопериодных ВВ свидетельствует о преимущественно приливном характере их образования и позволяет дать ключевые предпосылки районирования акватории по возможности их появления [47]. Короткопериодные ИВВ чаще наблюдаются в проливах Соловецких островов в зонах со свалами глубин 30—50 м, а также мористее фронтальных разделов. Это дает основание выдвинуть гипотезу о связи проявлений ИВВ с типом стратификации, морфометрии дна и фазой локального баротропного прилива.

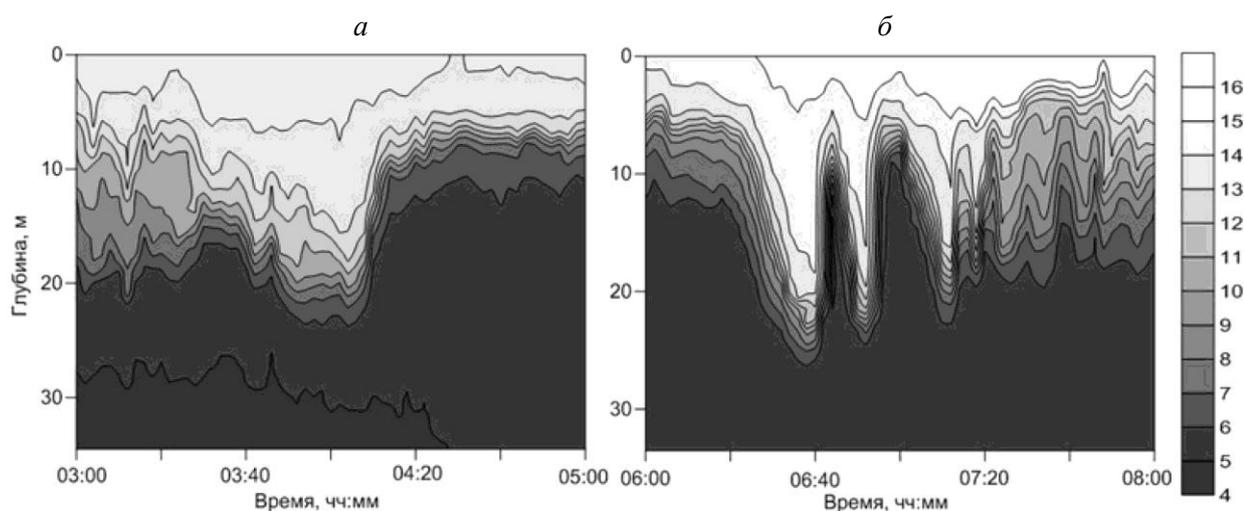


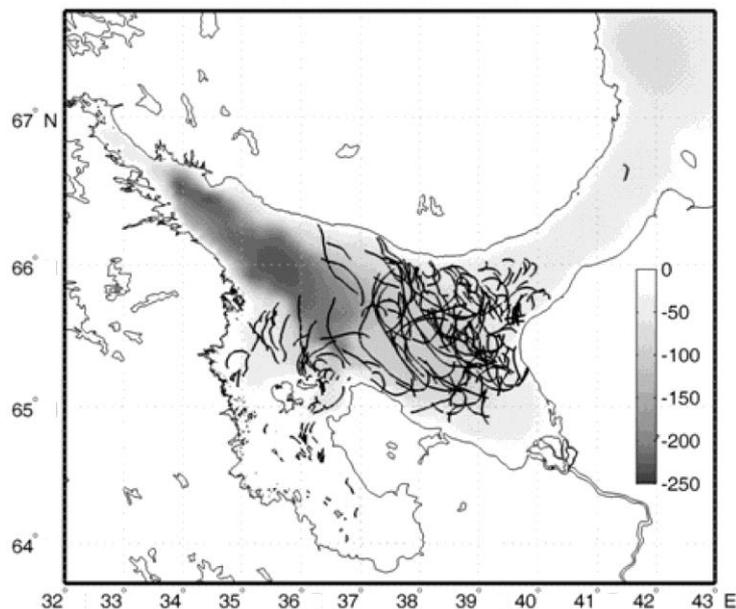
Рис. 2. Временная изменчивость вертикального распределения температуры на полигоне 1 (по данным сканирований СТД-зондом) 09.08.2010 г.
а — в прилив, б — в отлив. Шкала температуры — в градусах.

В ходе оперативного подспутникового эксперимента летом 2012 г. впервые для морей российской Арктики выполнено прямое сопоставление высокоразрешающих спутниковых (RADARSAT-1, 2) и контактных (CTD-сканирование) наблюдений в динамически активном районе Горла Белого моря [48]. По данным спутниковых радиолокационных наблюдений на высокоразрешающих снимках были выявлены поверхностные проявления ВВ, время прохождения которых через район контактных наблюдений (полигон 7, рис. 1) соответствовало прямой регистрации в эти моменты выраженных колебаний изопикн, близких по характеру к ИВВ. Рассчитанные по контактным данным длины и фазовые скорости волн оказались близкими к значениям, оцененным по спутниковым снимкам [48]. Это позволило интерпретировать видимые на снимках структуры как поверхностные проявления пакетов ВВ высотой 2—4 м с периодом 9—12 мин и длиной 200—300 м. Регулярность проявлений таких пакетов на спутниковых изображениях и в измерениях *in situ* в определенные фазы прилива с большой долей уверенности подтверждает их связь с приливной динамикой в регионе. Использование спутниковых данных позволило также установить районы генерации короткопериодных ВВ в Горле Белого моря. Это зоны структурного и стокового (р. Двина) термохалинных фронтов, которые наблюдались в юго-западной части Горла [48].

На основании спутникового мониторинга за 2007—2011 гг. выявлено широкое распространение короткопериодных ВВ на акватории Белого моря, и получены их статистические характеристики [51]. Было выделено два достаточно обширных района частых проявлений короткопериодных ВВ (рис. 3, а). Один район включает восточную часть Бассейна, юго-западную часть Горла и северную часть Двинского залива, а второй район расположен к северу и к северо-востоку от Соловецких островов. Поверхностные проявления дугообразной формы в виде чередующихся светлых и темных полос на РЛ снимках обычно указывают на распространяющийся характер пакетов ВВ, что неоднократно регистрировалось в контактных измерениях [42, 46, 48]. В бассейне, в глубоководной части Кандакшского залива, в мелководном Онежском заливе и в центральной части Горла проявление короткопериодных ВВ носит случайный характер. В целом ключевые черты в пространственном распределении поверхностных проявлений ВВ на РЛ снимках Белого моря сохранялись от года к году, как и общее количество зарегистрированных проявлений.

По данным спутникового мониторинга длины волн в пакетах могут достигать более 2 км. Такие пакеты чаще фиксировались в Бассейне моря, а в некоторых случаях размер их гребней достигал 200 км, покрывая значительную часть моря. Один из таких случаев (рис. 3, б) был изучен детально [52]. Предполагается, что пакеты ВВ возникают в южной части Горла, движутся через все море, трансформируясь при распространении, и окончательно разрушаются в мелководной зоне севернее Соловецкого архипелага. Расчеты, выполненные в рамках двухслойной модели слабонелинейного приближения для ВВ с учетом переменных свойств морской среды и произвольной батиметрии, позволили оценить трансформацию начальных волновых возмущений, возникающих после их генерации баротропным приливом в зоне термохалинного гидрологического фронта в южной части Горла [52]. Результаты моделирования показывают эволюцию начальных волн, следующих через приливной период, так что расстояние между этими волнами оказывается близким к расстоянию между пакетами ВВ, определенному по спутниковому изображению. Также показано, что наблюдаемые крупномасштабные пакеты ВВ могут быть источником ИВВ вблизи пролива Западная Соловецкая салма, т. е. на расстоянии около 200 км от зоны их генерации. Как уже отмечалось, ВВ с амплитудами до 15 м наблюдались здесь (полигон 1, рис. 1) в августе 2010 г. [42]. Фазовая скорость этих волн с периодами 10—20 мин была около 0.9—1.2 м/с, что соответствует длинам волн 0.6—1.4 км. Последние значения близки к длинам волн порядка 0.8—1.5 км в южной части пакета F на РЛ-снимке (рис. 3, б). Группы ИВВ регистрировались в данном районе каждый приливной цикл и визуально наблюдались в виде сликовых полос на морской поверхности.

a



б

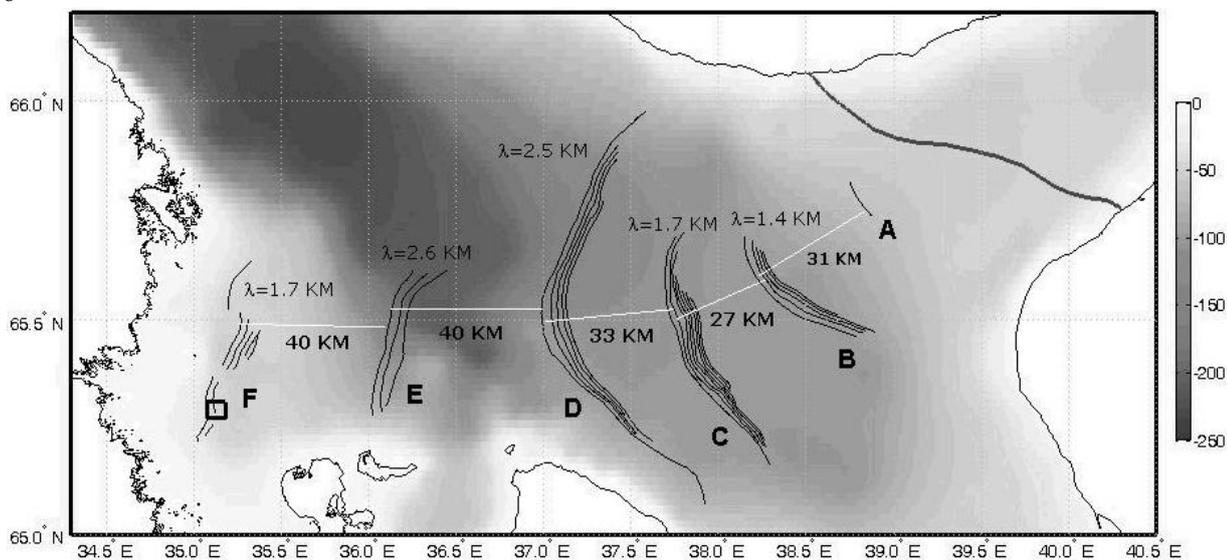


Рис. 3. Поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн на акватории Белого моря по РЛ данным.

Шкала показывает глубины в метрах (© ESA © SOLab). *a* — положение лидирующей волны в каждом из пакетов по данным 2007—2011 гг.; *б* — результат анализа РЛ снимка Envisat ASAR акватории Белого моря от 21.07.2010 г. (18:52 UTC), показывающего пакеты А—F внутренних волн, положение термохалинного фронта в Горле Белого моря (толстая линия) и район натуральных наблюдений (прямоугольник), λ — длина ведущей волны в пакете.

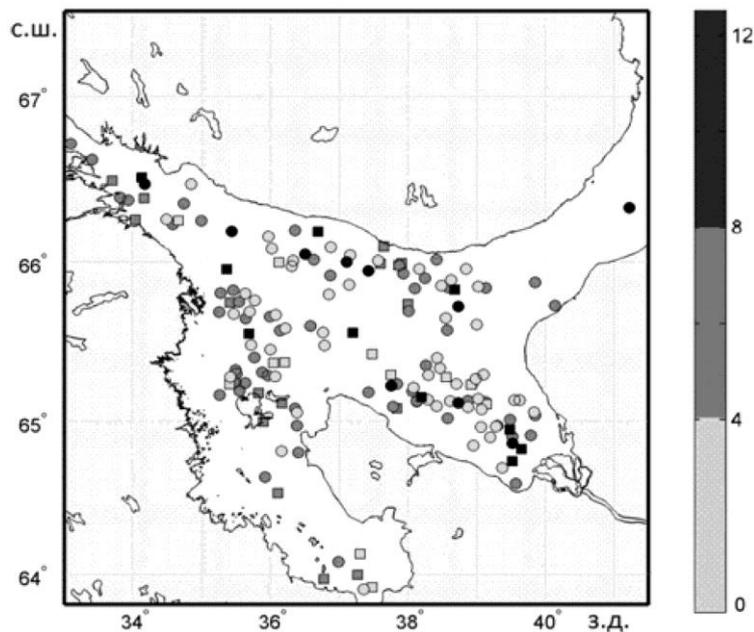
Субмезомасштабные вихревые структуры. На основании результатов спутниковых РЛ и контактных наблюдений (описание этих данных приводится в начале предыдущего раздела) исследовались особенности изменчивости, связанной с субмезомасштабными вихревыми движениями. По данным спутниковых наблюдений выделены районы постоянных проявлений вихревой динамики (рис. 4, *a*), которые показали, что вихри являются распространенным явлением на акватории Двинского залива и Бассейна Белого моря, а также в проливах вокруг островов Соловецкого архипелага [53]. Количество проявлений вихрей циклонического вращения преобладает над количеством вихрей

с антициклоническим вращением. На РЛ снимках были обнаружены одиночные вихри и вихревые структуры разнообразных форм: спиральные, грибовидные, дипольные. В среднем радиус вихревого образования составляет чуть меньше 5 км, что примерно соответствует среднему значению бараклинного радиуса Россби. Величина радиуса Россби в июле-августе варьирует в пределах 1—8 км (расчеты были выполнены по климатическим данным и данным наших контактных измерений за предыдущие годы). Наименьшие значения радиуса Россби отмечаются в мелководных районах моря за счет модификации стратифицированных вод приливным перемешиванием за исключением прибрежных районов с сильным влиянием пресного стока рек на стратификацию. В глубоководной части Бассейна и Кандалакшском заливе значения радиуса Россби максимальны. Наиболее крупные вихри отмечаются в открытой части Бассейна (до 12 км), а самые маленькие вихри отмечены в прибрежной зоне около Карельского берега и Соловецких островов (0.9 км, рис. 4, *а*). При этом вероятностное распределение размеров вихрей имеет двухмодальную структуру (рис. 4, *б*) со средним, максимальным и минимальным значениями 4.7, 13.22 и 0.94 км соответственно, но количество вихрей со средним значением диаметра относительно невелико. Наибольшее число вихревых образований отмечается в Двинском заливе и Бассейне Белого моря вдоль мористых частей фронтальных зон. В Двинском заливе наблюдаются вихри, вероятно связанные со сдвигом скоростей периферии стокового течения Северной Двины. Можно предполагать, что генезис вихрей связан в основном с возмущениями на соленостном фронте под влиянием ветра и приливных процессов. При этом вихри циклонического типа чаще наблюдались в восточной части залива, антициклонические — в северной и центральной частях залива. В Бассейне наибольшее число вихрей отмечается в районе Терского берега вблизи структурного фронта и севернее Соловецких островов над свалом глубин.

С помощью микрополигонных океанографических съемок в районе подводных возвышенностей южнее (банка Южная) и севернее (банка Северная) Соловецких островов (рис. 1) было установлено, что распределение температуры и солености в районе банок имеет квазидвухслойную структуру и испытывает значительную изменчивость под влиянием приливного потока [39]. Так, например, в районе банки Северная в 2009 г. во время полной воды, когда приливное течение было направлено преимущественно на юг, над вершиной банки наблюдалось пятно холодных и соленых вод в форме внутрикноклинного циклонического вихря диаметром 2—2.5 км. В условиях малой воды над вершиной банки значительных аномалий в температуре и солености не наблюдалось, а максимальные градиенты плотности формировались над южными склонами банки. При выполнении микрополигонных съемок 4 раза за цикл в 2010 г. было установлено, что образовавшаяся вихревая структура прослеживается у банки не более 3 часов, а затем «срывается» с вершины банки и движется в направлении доминирующего потока. Подобная картина наблюдалась и над банкой Южная. В соответствии с анализом спутниковой информации повторяющийся характер проявлений вихрей в одни и те же фазы приливного цикла в одних и тех же районах над неровностями рельефа дна позволяет утверждать, что основной причиной возникновения этих вихрей является трансформация приливного потока под влиянием изменений рельефа дна.

Кроме уже отмеченных механизмов формирования вихрей, связанных с топографическими эффектами, обтеканием островов и неустойчивостью фронтальных разделов, следует упомянуть возможность их генерации при разрушении мезомасштабных структур ветровым воздействием, что требует дальнейшего изучения. Поскольку значительная часть вихревых образований наблюдается в проливах и вблизи гидрологических фронтов, это указывает на их важный вклад в процессы водообмена и перемешивания.

а



б

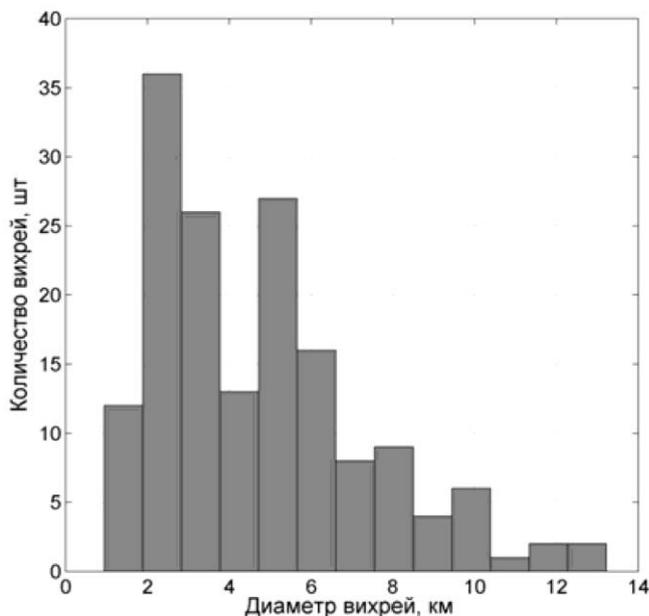


Рис. 4. Субмезомасштабные вихри по данным спутниковых РЛ наблюдений за 2009—2012 гг.
 а — пространственное распределение вихрей антициклонического (квадратами) и циклонического (кружками) вращения. Шкала показывает диаметр вихрей в км;
 б — гистограмма повторяемости диаметров вихрей.

Фронтальные системы. Исходными данными для исследования изменчивости фронтальных зон послужили данные по температуре поверхности моря (ТПМ) с прибора MODIS на спутниках Aqua и Terra за период с 01.05.2010 по 30.09.2010; всего было проанализировано 205 снимков. Контактные наблюдения включали в себя повторяющиеся в разные фазы приливного цикла СТД-измерения на разрезах поперек южной границы Горла (2009, 2012 гг.) и вдоль оси Западной Соловецкой салмы с выходом в Бассейн (2013 г.). Эти исследования позволили получить численные оценки изменчивости характеристик и положения фронтальных разделов на среднемесячном, декадном, суточном и внутрисуточном интервалах.

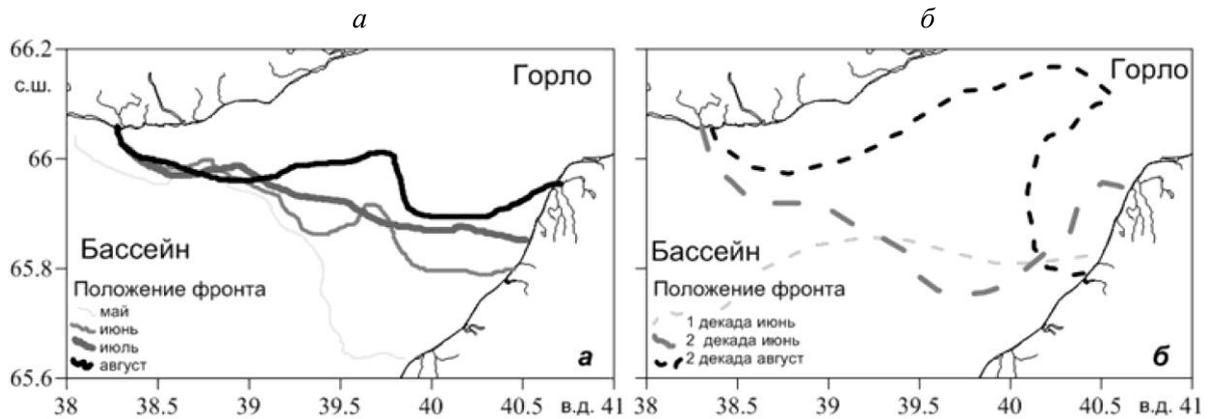


Рис. 5. Положение структурного (горловского) фронта в Белом море по данным спутниковых наблюдений за теплый период 2010 г. по месяцам (а) и за отдельные декады (б).

По данным спутниковых наблюдений величина фонового градиента ТПМ составила $0.1\text{--}0.2^\circ\text{C}/\text{км}$. По значениям градиента от 0.25 до $0.50^\circ\text{C}/\text{км}$ были выделены основные фронтальные разделы: стокковый фронт реки Северная Двина, стокковый фронт реки Онега, структурный фронт Горла, структурные фронты в районе Соловецких островов. Наиболее интенсивным с точки зрения значений градиента является фронты Онежского залива и Горла.

В качестве примера остановимся на результатах спутникового мониторинга на границе Горла и Бассейна Белого моря. Данный район характеризуется наличием структурного (горловского) фронта (рис. 5). Обычно фронт располагается поперек пролива и вдоль юго-западной границы Горла. Ширина фронтального раздела менялась за сезон от 14 до 26 км. Образование фронта начинается в мае. К июню в поле ТПМ явно прослеживается граница между холодными и однородными по структуре водами Горла температурой 4°C и прогретыми поверхностными водами Бассейна с температурой в 8°C . В июне-августе положение фронта хорошо прослеживается по изотермам $9\text{--}12^\circ\text{C}$, и он постепенно смещается вглубь пролива (рис. 5, а). В сентябре граница фронта прослеживается не так явно, как в предыдущие месяцы, поскольку начинает сказываться осеннее выхолаживание поверхностных вод. Декадная динамика фронта сильно зависит от воздействия ветра. Например, в первую декаду июня при ветрах восточных румбов фронт уходит на юго-запад в Бассейн и размывается там; во второй декаде при постоянном северном ветре наблюдается диаметрально противоположная ситуация — фронт идет вдоль Зимнего берега вглубь Горла (рис. 5, б). Во вторую декаду августа при устойчивых южных ветрах в центральной части фронта возникает меандр размером в 50 км. На временном интервале в несколько суток на примере движения стоккового фронта реки Северная Двина можно отметить, что максимальные значения скорости продвижения фронта достигают значения 0.35 м/с при величине градиента $1.7^\circ\text{C}/\text{км}$. Столь значительная изменчивость положения фронтальных разделов может являться источником развития волновой и вихревой субмезомасштабной изменчивости.

По данным СТД-зондирований влияние прилива выражается в смещении положения и изменении интенсивности фронтальных зон. По результатам наблюдений 2013 г. в Западной Соловецкой салме в фазу прилива, соответствующую росту уровня моря, фронт обнаруживается в северной части пролива, а в отлив он смещается мористее. Разность положений в прилив и отлив составляет около 6 миль (11 км). По результатам гидрологических разрезов поперек горловского фронта в 2009 и 2012 гг. наблюдались значительные вертикальные колебания изопикн на $10\text{--}12\text{ м}$ за приливной период, что позволяет объяснить генерацию короткопериодных ВВ в рамках резонансного механизма вместо

традиционного представления о постепенной нелинейной трансформации внутреннего прилива при изменении рельефа дна [48, 52]. Этот механизм допускает, что пакеты нелинейных ВВ могут интенсивно генерируются в транскритическом режиме [17], когда скорость приливного течения близка в некоторых пределах к скорости распространения линейных длинных ВВ, определяемой фоновой стратификацией.

Систематические наблюдения в течение ряда лет за теплый период в различных районах Белого моря выявили существенную изменчивость гидрофизических полей на масштабах от 100 м до 10 км и от 10 мин до приливного периода 12.42 ч и периодическую интенсификацию турбулентного перемешивания [49—50]. Во многих случаях эта изменчивость была связана с генерацией, эволюцией и разрушением короткопериодных ВВ и малых вихревых структур под влиянием интенсивного приливного потока. Приливные течения способствуют также модификации водных масс, образуя фронты перемешивания и трансформируя стоковые фронтальные разделы. Спутниковый мониторинг позволил установить широкую распространенность короткопериодных ВВ и малых вихрей на различных по гидрологическим условиям акваториях моря. Частая повторяемость этих явлений вблизи фронтальных зон и в приливах, а также наши оценки вертикального и горизонтального коэффициентов турбулентного обмена свидетельствуют о важной роли этих явлений в водообмене и перемешивании. Это подтверждает существующее представление о том, что короткопериодные ВВ и субмезомасштабные вихри являются промежуточным звеном между мезомасштабной динамикой и мелкомасштабной турбулентностью.

Комплексный подспутниковый эксперимент в южной части Горла Белого моря позволил объяснить генерацию пакетов короткопериодных ВВ интенсивной динамикой горловского фронта за приливной период. Более того, спутниковые наблюдения свидетельствуют, что возникающие в Горле ВВ являются не только фактором локальной изменчивости стратификации, но и способны распространяться отсюда на расстояния в сотни км, что соответствует численным расчетами. Пока остается неясным, все ли обнаруженные на архивных спутниковых снимках проявления короткопериодных ВВ можно однозначно связать с ВВ приливного происхождения.

Необходимо изучение динамики субмезомасштабных вихрей в различных районах моря для уточнения механизмов их генерации, эволюции и диссипации, а также для оценивания коэффициентов связанного с ними горизонтального перемешивания. Путем обработки спутникового архива РЛ-изображений получены новые сведения о месячной, декадной и суточной изменчивости гидрологических фронтов моря, однако временная частота снимков не позволяет детализировать их динамику на меньших временных масштабах. Вместе с тем отдельные наблюдения *in situ* показывают значимую изменчивость положения и характеристик фронтальных зон за приливной период. Важным остается вопрос, при каких условиях эта изменчивость благоприятна для устойчивого образования вихрей, а при каких — внутренних волн.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление закономерностей субмезомасштабной пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей и их связи с разномасштабными процессами в Белом море на основе модельных подходов и данных целенаправленных контактных и систематических спутниковых наблюдений, для чего необходимо:

- оценить количественные характеристики локальной изменчивости фронтальных разделов различного происхождения на разных периодах;
- выявить физические и географические особенности формирования субмезомасштабных вихревых структур и короткопериодных ВВ;

- подтвердить гипотезу о связи условий формирования субмезомасштабных структур с фазой прилива и типом фоновой стратификации;
- уточнить процессы, контролирующие горизонтальное перемешивание на субмезомасштабах, и получить оценки соответствующих коэффициентов обмена;
- разработать математические модели субмезомасштабных процессов, применимые для акватории Белого моря;
- разработать основы комплексного мониторинга и прогноза процессов на субмезомасштабах в интересах совершенствования морской деятельности.

Обработка и анализ спутниковых данных в рамках данной работы выполнены лабораторией спутниковой океанографии РГГМУ (И. Е. Козлов и Б. Шапрон) при поддержке мегагранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0078), французского проекта ANR-09-BLAN-0365-02, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-31423 мол. а.

Литература

1. Океанология. Физика океана. Т. 1: Гидрофизика океана / Под ред. В. М. Каменковича, А. С. Мони́на. М.: Наука. 1978. 456 с.
2. Там же. Т. 2: Гидродинамика океана. 455 с.
3. Корчагин Н. Н., Монин А. С. Мезоокеанология. М.: Изд-во РАН, 2004. 176 с.
4. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale Processes and Dynamics, in Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds M. W. Hecht and H. Hasumi. American Geophysical Union, Washington, D. C, 2008. P. 17—38. doi: 10.1029/177GM04.
5. Lévy M., Ferrari R., Franks P. J. S., Martin A. P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, № L14602. doi:10.1029/2012GL052756.
6. Munk W. H., Armi L., Fischer K., Zachariassen F. Spirals on the sea // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 2000. V. 456. P. 1217—1280.
7. D'Asaro E. A. Generation of submesoscale vortices: A new mechanism // J. Geophys. Res. 1988. V. 93(C6). P. 6685—6693. doi:10.1029/JC093iC06p06685.
8. Nakamura T., Matthews J. P., Awaji T., Mitsudera H. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. C12014. doi:10.1029/2011JC007754.
9. Redondo J. M., Matulka A., Platonov A., Sekula E., Fraunie P. Eddy measurements, coastal turbulence and statistics in the gulf of Lions // Ocean Sci. Discuss. 2013. V. 10. P. 55—81. doi:10.5194/osd-10-55-2013.
10. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54, № 4. P. 631—654.
11. Susanto R. D., Minik L. M., Zheng Q. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait // Oceanography. 2005. V. 18, N. 4. P. 80—87.
12. Jackson C. R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties. (2nd ed.). Global Ocean Associates, Alexandria, VA, 2004. 560 p.
13. Jackson C. R., da Silva J. C. B., Jeans G. The generation of nonlinear internal waves // Oceanography. 2012. V. 25. N. 2. P. 108—123. doi:10.5670/oceanog.2012.46.
14. Zeng K., Alpers W. Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model // Int. J. Remote Sensing. 2004. V. 25, N. 7—8. P. 1277—1281.
15. Da Silva J. C. B., New A. L., Azevedo A. On the role of SAR for observing «local generation» of internal solitary waves off the Iberian Peninsula // Canadian Journal of Remote Sensing. 2007. V. 33, N. 5. P. 388—403. doi:10.5589/m07-041.
16. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. Modeling internal solitary waves in the coastal ocean // Surveys in Geophysics. 2007. V. 28. P. 273—298. doi:10.1007/s10712-007-9020-0.
17. Grimshaw R., Zhang D., Chow K. Generation of solitary waves by transcritical flow over a step // J. Fluid Mech. 2007. V. 587. P. 235—254.
18. Серебряный А. Н. Сliko и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 275—286.
19. 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. III. М: ГЕОС, 2009. С. 245—250.
20. Морозов Е. Г., Пака В. Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 709—715.

21. Морозов Е. Г., Марченко А. В. Короткопериодные внутренние волны в арктическом фиорде (Шпицберген) // Известия РАН, Сер. ФАО. 2012. Т. 48, № 4. С. 453—460.
22. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Морозов Е. Г. Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // Доклады РАН. 2008. Т. 418, № 4. С. 543—548.
23. Зацепин А. Г. Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51, № 4. С. 592—605.
24. Каримова С. С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 31—47.
25. Gade M., Vyfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L. Slicks as indicators for marine processes // Oceanography. 2013. V. 26(2). P. 138—149.
26. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72—79.
27. Рогачев К. А. Субмезомасштабные струи на континентальном шельфе залива Петра Великого (Японское море) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2010. Т. 7, № 3. С. 186—190.
28. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2: Белое море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
29. Бабков А. И. Гидрология Белого моря. СПб.: ЗИН РАН, 1998. 94 с.
30. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.
31. 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.
32. Семенов Е. В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 1. С. 128—141.
33. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Динамика и энергетика поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Белом море // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 4. С. 844—850.
34. Инжебейкин Ю. И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 152 с.
35. Май Р. И., Фукс В. Р. Нелинейные баротропные приливные явления и остаточная приливная циркуляция в Белом море // VII Междун. специализ. выставка и конф. «АКВАТЕРРА-2004». С.-Петербург, 2004. С. 197—201.
36. Чернов И. А., Толстиков А. В. Численное моделирование крупномасштабной динамики Белого моря // Труды КарНЦ РАН. № 4. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 137—142.
37. Волженский М. Н., Родионов А. А., Зимин А. В., Семенов Е. В., Филатов Н. Н., Булатов М. Б. Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2009. № 3. С. 33—41.
38. 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 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. СПб.: Наука. С. 89—108.
39. 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.
40. Зимин А. В., Родионов А. А., Николаев В. Г. Наблюдения короткопериодных внутренних волн в Белом море // Тр. X Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. С. 229—232.
41. Зимин А. В. Экспериментальные исследования изменчивости гидрофизических полей на шельфе Белого моря в районах с различной вертикальной структурой вод / Система Белого моря. Т. II: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 392—410.
42. Зимин А. В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2012. Т. 52, № 1. С. 16—25.
43. Зимин А. В., Родионов А. А. Мезомасштабная и тонкоструктурная изменчивость гидрофизических полей в течение приливного цикла на шельфе Белого моря // Тр. XI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2012. С. 16—21.
44. 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 года с научно-исследовательского судна «Эколог» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 3. С. 85—88.

45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Зимин А. В., Романенков Д. А., Козлов И. Е., Шапрон Б., Родионов А. А., Атаджанова О. А., Мясо-едов 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.
49. Зимин А. В., Жегулин Г. В. Оценки горизонтального турбулентного обмена в Белом море по данным наблюдений // *Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Наука, 2012. С. 274—277.
50. Жегулин Г. В., Зимин А. В. Характеристики турбулентных процессов в шельфовом районе Белого моря по данным натурных наблюдений // *Тр. XII Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 212—215.
51. 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 // *Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 36—40.
52. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 99—107. doi:10.1016/j.rse.2014.02.017.
53. Атаджанова О. А., Зимин А. В., Козлов И. Е. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Белого моря по радиолокационным изображениям // *Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 215—217.



Статья поступила в редакцию 04.08.2014 г.

© А. А. Rodionov¹, D. A. Romanenkov¹, A. V. Zimin^{1,2}, I. E. Kozlov^{2,3}, B. Chapron^{4,2}

¹St.-Petersburg Branch of P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, St.-Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

³Klaipeda University, Klaipeda, Lithuania

⁴French Research Institute for Exploitation of the Sea, Brest, France

dmromanenkov@yandex.ru

SUBMESOSCALE PROCESSES AND DYNAMICS IN THE WHITE SEA. STATE OF THE ART AND FUTURE RESEARCH

This paper presents a discussion on recent data obtained from combined analysis of remote sensing (satellite) and *in situ* observations for studying submesoscale dynamics in the White Sea associated with internal waves, eddies and frontal features. Multi-year complex monitoring revealed the widespread occurrence of short-period internal waves in the White Sea and allowed to obtain their statistical properties. Main characteristics of submesoscale eddies in the White Sea were also mapped. Statistical analysis shows that main eddy activity areas are found in the vicinity of hydrological fronts. The results of satellite IR data processing provide statistical description of mean sea surface temperature gradient and characteristics of major fronts in the White Sea on the monthly and decadal scales. Field observations in areas with pronounced vertical stratification revealed strong dynamics of eddies in the upper layer and significant variability of characteristics and position of the frontal zones within a tidal cycle over irregular topography. The performed analysis strongly suggests that in-depth understanding of submesoscale variability of hydrophysical fields in the White Sea under the influence of the tidal flow should certainly capitalize on synergy of satellite and *in situ* observations combined with modeling. Perspectives of such a research for the White Sea are discussed and outlined.

Key words: submesoscale dynamics, internal waves, eddies, fronts, the White Sea.