СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ПРИЛИВНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ (БЕЛОМ, БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ)

**Зимин А.В., Романенков Д.А., Атаджанова О.А.,
Свергун Е.И., Коник А.А.**

*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва,
+7 812 328-5759, e-mail: zimin2@mail.ru*

A comprehensive study of short-period variability of hydrological fields and sub-mesoscale processes in the tidal Arctic (White, Barents and Kara) seas was carried out on the extensive material of high-resolution contact and remote observations for 2006–2016.

Наблюдения последних лет позволили обнаружить значительную изменчивость температуры, солености и течений на масштабах от сотен метров до единиц километров и от долей часа до суток. Она связывается с короткопериодными внутренними волнами, малыми вихревыми структурами, фронтальной динамикой. Неоднородности с описанным выше пространственно-временным масштабом связывают с процессами и явлениями субмезомасштаба и они являются переходным звеном (в энергетическом аспекте) от мезомасштабных процессов к мелкомасштабным. В силу несовершенства теоретического описания и трудностей экспериментальных наблюдений субмезомасштабных структур, обусловленная ими изменчивость гидрофизических полей оказались недостаточно изученными в прошлые десятилетия. Особенно это относится к морям российской Арктики, где в последние годы отмечаются заметные изменения климатических характеристик вод. Это препятствует эффективному решению прикладных задач при развитии Арктической зоны Российской Федерации [1].

Цель работы: на основе систематических высокоразрешающих контактных и дистанционных наблюдений установить пространственно-временные закономерности субмезомасштабной изменчивости процессов и явлений в приливных арктических (Белом, Баренцевом и Карском) морях на фоне процессов большего масштаба.

Методологическую основу работы составлял подход, базирующийся на получении и комплексной обработке результатов разнородных вы-

сокоразрешающих 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 учтенных по времени и пространству наблюдений на океанографических полигонах и разрезах, выполненные в летние сезоны 2006–2014 гг.; 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., суточные данные температуры продукта GHRSSST OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis за 2007 и 2011 гг. Дополнительно привлекались открытые архивы данных моделирования баротропного прилива и метеорологические карты приземного анализа.

Выявлено [2], что максимальный вклад в короткопериодную изменчивость гидрофизических полей в Белом море наблюдается в интервале от 8 мин до 2 часов в области приповерхностного пикноклина вблизи фронтальных зон. Показано, что эта изменчивость связана преимущественно с прохождением пакетов короткопериодных (нелинейных) внутренних волн и малых вихревых структур.

Короткопериодные внутренние волны в Белом море регулярно встречаются в южной части пролива Горла, в Двинском заливе и вокруг Соловецких островов [3]. В Баренцевом море районы регулярной генерации внутренних волн находятся к западу от арх. Земля Франца-Иосифа, к северо-востоку от арх. Шпицберген, на выходе из пролива Карские Ворота и в южной части моря вблизи Воронки Белого моря. В Карском море основные районы наблюдения волн находятся в проливе Карские Ворота, над юго-восточной частью Новоземельской впадины и к северо-востоку от м. Желания. По данным контактных измерений, выполненных в выделенных по спутниковым данным районах Белого и Баренцева моря, установлено [4], что за сутки в каждом из них отмечается от 50 до 150 волн. Их средняя высота меняется от 2 до 6 м. Наиболее часто регистрируются волны с периодами от 8 до 24 минут. Их средняя высота меняется от 2 до 6 м. Максимальная высота зарегистрированных волн достигла 17.9 м (Белое море). Регулярность наблюдений короткопериодных внутренних волн в контактных данных в определенную фазу прилива подтверждает вывод о преимущественно приливном характере их образования. Оценки вероятности появления экстремальных внутренних волн один раз месяц, показали, что максимальные из них ожидаются в Белом море, в районе Западной Соловецкой салмы и в южной части

Баренцева моря. Скорости придонных течений, индицируемых интенсивными внутренними волнами в относительно мелководных районах шельфа, могут составлять от 7 до 17 см/с. Они способны размывать илистые и песчаные грунты и оказать влияние на устойчивость подводных гидротехнических сооружений.

Субмезомасштабные вихри регистрировались на большей части акватории морей [5]. Районами наибольшей встречаемости вихрей в Белом море были Двинский залив, область севернее Соловецких островов и вдоль Терского берега. В Баренцевом море – южная часть моря, районы к западу от архипелага Земля Франца-Иосифа, возле восточного берега острова Западный Шпицберген, между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, и в Карском море – между северной частью архипелага Новая Земля и полуостровом Ямал, в районе о-вов Уединения и Свердруп. Максимальная частота встречаемости наблюдается среди вихревых структур с размерами близкими к оценкам первого бароклинного радиуса деформации (внутреннего радиуса Россби). Вихри с диаметрами менее 6 км, встречались чаще всего в Карском море – в 95 % случаев. В Белом море они регистрировались примерно в 80% случаев, в Баренцевом – около 85 %. Также есть случаи, когда вихри имели диаметры до 25 км (в частности, в Баренцевом море). Средний диаметр вихрей варьировал от 2.4 км в Карском море до 4.7 км в Белом море.

Показана роль фронтов [6] в динамике короткопериодных внутренних волн и субмезомасштабных вихрей: значительное число вихрей и внутренних волн детектируются во фронтальных зонах или вблизи них. Вихревые структуры регистрируются преимущественно внутри стоковых и прикромочных фронтальных зон; усиление вихревой активности происходит в периоды интенсивной трансформации стоковых фронтов.

Рассматриваются механизмы формирования вихревых структур, среди которых динамика и неустойчивость фронтов различного происхождения, а также топографические эффекты являются наиболее важными. Пик наибольшей вихревой активности наблюдался в июле для Баренцева и Белого морей и в августе – для Карского моря. В Карском и Белом морях значительное количество вихрей располагается вблизи фронтальных зон речных плюмов, причем в Карском море речной сток по климатическим нормам приходится на август, а в Белом море – на июль. Тот факт, что максимальная встречаемость вихрей во всех морях имела место вблизи фронтальных зон и соответствовала месяцам наибольшей активности гидрологических фронтов, должен мотивировать дальнейшие исследования закономерностей изменчивости фронтов и ее связи с субмезомасштабной вихревой динамикой в Арктике.

Максимальное число короткопериодных внутренних волн фиксируется в периоды, когда фронты на поверхности уже четко сформированы. Показано [2], что максимальные коэффициенты горизонтального обмена наблюдаются в районах повышенной встречаемости субмезомасштабных вихрей или короткопериодных внутренних волн. Под влиянием интенсивных короткопериодных внутренних волн вертикальный и горизонтальный обмен под пикноклином усиливается в два раза.

Оценки характеристик внутренних волн выполнены в рамках гранта РФФИ № 18-05-00965-а. Остальные работы в рамках государственного задания по теме № 0149-2018-0014.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратов Н.А. Территориальные особенности размещения и добычи минеральных ресурсов в российском секторе Арктики // Географический вестник // *Geographical bulletin*. 2016. No. 3(38). С. 35–48.
2. Зимин А.В. Закономерности субмезомасштабных процессов и явлений в Белом море // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 104–120.
3. Zimin A.V., Kozlov I.E., Atadzhanova O.A., Chapron B. Complex monitoring of short-period internal waves in the White Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 951–960.
4. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 2. С. 13–19.
5. Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 80–90.
6. Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Козлов И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1. С. 59–72.