

На правах рукописи
УДК 551.466.8:551.465:528.8.044.2:528.88

Козлов Игорь Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН И ФРОНТАЛЬНЫХ РАЗДЕЛОВ
В МОРЕ МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ИЗ КОСМОСА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Российский государственный гидрометеорологический университет" (РГГМУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кудрявцев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Репина Ирина Анатольевна

кандидат географических наук
Белоненко Татьяна Васильевна

Ведущая организация: Институт космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита состоится «**18**» декабря 2014 г. в **17 час. 00 мин.** на заседании Диссертационного совета Д – 212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
Электронная почта: igor.eko@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета или на сайте:

<http://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



проф. Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Уникальные возможности спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) наблюдать морскую поверхность с высоким пространственным разрешением вне зависимости от погодных условий определила их высокую эффективность при исследовании внутренних волн, течений, фронтальных разделов и поверхностных загрязнений. Внутренние волны, являясь важным элементом динамической структуры океана, влияют на его «среднее» состояние путем вертикального перемешивания, горизонтального и вертикального переноса импульса и энергии, а их изучение имеет важное прикладное значение, например, для подводного мореплавания и решения акустических задач [Коняев, Сабинин, 1992]. Исследование фронтальных разделов, являющихся областями наиболее интенсивного перемешивания и повышенной биологической продуктивности в океане, представляет исключительный интерес для рыбного промысла [Федоров, 1983].

На сегодняшний день можно вполне утверждать, что РСА являются основным и, подчас, наиболее эффективным инструментом исследования океанских внутренних волн из космоса. В задачах наблюдения суб- и мезомасштабных течений и фронтальных разделов спутниковые РСА представляют собой единственную альтернативу оптическим методам в условиях облачности. В то же время, при всех преимуществах радиолокационных (РЛ) методов, их применение для систематического исследования закономерностей формирования и пространственно-временной изменчивости полей внутренних волн, течений и фронтальных разделов в заданных океанических акваториях, и в частности, в арктических морях, все еще крайне ограничено.

Несмотря на то, что РСА методы давно уже стали «классикой» спутниковой океанографии и широко применяются на практике, физика формирования РСА изображений океанических процессов все еще недостаточно глубоко изучена. В частности, закономерности и количественные соотношения между РЛ контрастом и параметрами исследуемого явления, а также параметрами морской среды и метеоусловиями остаются малоизученными. При этом, интенсивное техническое развитие и запуск мультиполяризационных РСА систем нового поколения открывают принципиально новые возможности для исследования физики формирования РСА изображений и развития более усовершенствованных методов диагностики состояния морской среды на основе РЛ измерений.

Цель и задачи исследования

Основной **целью** работы является исследование основных закономерностей проявления внутренних волн и фронтальных разделов в море и определение их количественных характеристик по данным РСА измерений.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Сформировать базу сопряженных спутниковых РСА и ИК измерений для акваторий Белого, Баренцева, Карского и Балтийского морей, дополненную модельными полями ветра.
2. Исследовать закономерности проявления короткопериодных внутренних волн (КВВ) в РСА изображениях морской поверхности при различных скоростях ветра и углах облучения на основе анализа данных для Белого, Баренцева и Карского морей;
3. Исследовать физико-географические закономерности распространения короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях, а также возможность определения интегральных характеристик верхнего слоя моря на основе спутниковых РСА наблюдений;
4. Определить механизмы формирования РСА проявлений фронтальных разделов на примере прибрежного апвеллинга в Балтийском море и исследовать зависимость РЛ контраста фронта от его характеристик и метеоусловий;
5. На основе анализа 4-поляризационных РСА измерений исследовать роль различных механизмов рассеяния, ответственных за формирование поверхностных проявлений внутренних волн, поверхностных течений и фронтальных разделов, а также возможность их идентификации на фоне пространственно-неоднородного поля ветра.

Научная новизна

- Подготовлена база многолетних данных для комплексного исследования короткопериодных внутренних волн в Белом, Баренцевом и Карском морях, включающая архив спутниковых РСА изображений, результаты их тематической обработки и фоновые метеоусловия;
- Разработана полуэмпирическая модель, позволяющая оценивать характеристики внутренних волн по РСА наблюдениям их поверхностных проявлений при различных скоростях ветра и «геометрии» наблюдений;
- Впервые на основе анализа массива спутниковых РСА наблюдений проведено районирование короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях,

которое, в частности, определяет районы устойчивой генерации КВВ, дает описание пространственного распределения характеристик пакетов КВВ и частоту их появления в заданном районе.

- Проведена оценка «массосодержания» верхнего слоя Баренцева моря и его внутрисезонной изменчивости на основе РСА наблюдений кинематики пакетов КВВ;
- На основе совместных РСА и ИК наблюдений фронта прибрежного апвеллинга в Балтийском море построена полуэмпирическая модель, связывающая величину РЛ контраста фронта с безразмерным параметром стратификации, основанным на измеряемом перепаде температуры поверхности моря (ТПМ) через фронт и скорости ветра;
- На основе анализа ко-поляризационных РСА изображений установлено, что определяющим механизмом проявления внутренних волн и течений в РСА изображениях является рассеяние радиоволн на обрушениях ветровых волн, которые сильно модулируются при взаимодействии ветровых волн и течений; роль брэгговского рассеяния в формировании РЛ контрастов незначительна.
- На основе метода декомпозиции 4-поляризационных РСА измерений показана возможность идентификации поверхностных течений, внутренних волн и фронтальных разделов на фоне пространственно-неоднородного поля ветра.

Научная и практическая и значимость

Разработанная методика определения характеристик КВВ по их проявлениям в спутниковых РСА изображениях реализована в виде программного обеспечения, используемого в исследовательской работе ЛСО РГГМУ. Полученные в работе карты пространственного распределения параметров КВВ могут быть использованы для информационного обеспечения безопасности подводного мореплавания и строительства, а также служить основой при планировании и проведении натурных экспериментов по исследованию КВВ и мезомасштабной изменчивости в арктических морях. Полученные результаты могут также служить в качестве экспериментальной базы для верификации высокоразрешающих численных моделей генерации и распространения КВВ.

Предложенный в работе метод оценки «массосодержания» верхнего слоя моря по РСА наблюдениям внутренних волн может быть использован в различных океанографических приложениях. Предложенная полуэмпирическая модель, связывающая РЛ контрасты с перепадом ТПМ через фронт и скоростью ветра, может быть использована на практике для

диагностики фронтальных разделов в океане в условиях облачности. Предложенный на основе метода декомпозиции 4-поляризационных РСА измерений подход по идентификации динамических процессов в морской среде на фоне пространственно-неоднородного поля ветра может быть использован в практических целях, например, в задачах промысловой океанологии для обнаружения зон повышенной биологической продуктивности.

Положения, выносимые на защиту

- Величина РЛ контрастов внутренних волн зависит от безразмерного параметра, включающего скорость ветра и полуширину солитона ВВ, и уменьшается с их увеличением.
- РЛ контрасты ВВ обладают также явной зависимостью от азимута наблюдений: они максимальны, когда направление ветра перпендикулярно направлению антенны, а внутренние волны сонаправлены ветру.
- Анализ результатов районирования ВВ в арктических морях показал, что основные зоны генерации и распространения внутренних волн в Баренцевом море находятся вблизи арх. Земля Франца-Иосифа, о. Белый и к западу от прол. Карские Ворота; в Карском море – восточнее прол. Карские Ворота, над юго-восточной частью Новоземельской впадины и северо-восточнее м. Желания.
- Прибрежный апвеллинг проявляется в РСА изображениях моря за счет изменения режима стратификации атмосферного погранслоя и гашения ветровой ряби пленками ПАВ в зонах конвергенции поверхностных течений. Величина РЛ контрастов фронта является универсальной функцией безразмерного параметра стратификации, зависящего от перепада ТПМ через фронт и скорости ветра.
- Определяющим механизмом проявления ВВ и течений в РСА изображениях является рассеяние радиоволн на обрушениях ветровых волн, которые сильно модулируются поверхностными течениями; роль брэгговского рассеяния в формировании РСА контрастов незначительна.

Достоверность

Научные выводы, сделанные в диссертации, получены на основе анализа большого массива спутниковых РСА изображений, т.е. их можно рассматривать статистически обеспеченными. Результаты анализа данных РСА измерений и модельных расчетов сопоставлялись (по возможности) с данными контактных экспериментальных исследований. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и

зарубежных журналах, докладывались на международных и российских конференциях.

Апробация работы

Данная работа была выполнена в рамках грантов Европейского Совета (FP7 MONRUK), Норвежского исследовательского совета (MAREBAS, YGGDRASIL), РФФИ (проект АФ-а 14-05-91760, проекты мол_а 14-05-31423, 14-05-31454), Правительства г. Санкт-Петербурга (2010, 2011, 2013 гг), проектов в рамках Федеральных целевых программ Минобрнауки РФ, а также гранта Правительства РФ (Договор №11.G34.31.0078) для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых.

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах, в том числе на Всероссийских Открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН (Москва, 2007, 2008, 2009, 2012, 2013), Международной конференции “Потоки и структуры в жидкостях” (Санкт-Петербург, 2007, 2013), Международном симпозиуме по атмосферной радиации и динамике МСАРД-2009 (Санкт-Петербург, 2009), 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry POLinSAR 2007 (Frcascati, Italy, 2007), SeaSAR International Workshop “Advances in SAR Oceanography from ENVISAT, ERS and ESA third party missions” (Frascati, Italy, 2008, 2010, 2012), ESA Living Planet Symposium (Bergen, Norway, 2010; Edinburgh, UK, 2013), COSPAR Scientific Assembly (Bremen, Germany, 2010; Mysore, India, 2012), EGU General Assembly (Vienna, Austria, 2012); Baltic Sea Science Congress (2009, 2011, 2013), IEEE/OES Baltic Symposium (2010, 2012, 2014), International Scientific Conference “Science of the Future” (Санкт-Петербург, 2014).

Публикации

Представленные в работе результаты и выводы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных изданиях. По теме диссертации опубликовано 17 статей, из которых 11 статей в журналах из списка ВАК, 4 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, 6 статей в трудах международных и российских конференций. Результаты работы защищены 6 патентами (базы данных и полезная программа для ЭВМ).

Личный вклад автора

Автор работы принимал участие на всех этапах исследования от постановки задачи до анализа результатов, разрабатывал компьютерные программы, реализующие предложенные в

работе методы и алгоритмы, производил обработку спутниковых данных.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии, включающей 119 наименований, из них 86 на иностранных языках. Общий объём работы – 158 машинописных страницы, включая 50 рисунков.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю, д.ф-м.н. В.Н. Кудрявцеву за постановку задачи, внимание к работе и терпение, к.ф-м.н. проф. В.И. Сычеву за ознакомление и развитие интереса к методам спутниковой океанографии, проф. Инге Дайлидене (Клайпедский университет) за ценные советы и постоянную поддержку, а также коллегам из Лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ и Санкт-Петербургского отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова за обсуждение результатов работы и помощь. Отдельная благодарность моей жене и родителям за понимание и поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию общих закономерностей проявления внутренних волн в РСА изображениях морской поверхности, а также районированию их основных характеристик в Баренцевом и Карском морях.

В разделе 1.1 описана исходная база данных и методика определения основных параметров внутренних волн по их проявлениям в РСА изображениях морской поверхности.

В разделе 1.2 представлен анализ закономерностей проявления внутренних волн в РСА изображениях при различных скоростях ветра и геометрии РЛ наблюдений относительно направления ветра и направления распространения КВВ. Для этого были определены два типа РЛ контрастов ВВ – контраст K_{iw} , характеризующий глубину модуляции РЛ сигнала поверхностными проявлениями ВВ, $K_{iw} = (\sigma_{max}^o - \sigma_{min}^o) / (\sigma_{max}^o + \sigma_{min}^o)$, где σ_{min}^o , σ_{max}^o – соответственно минимальное и максимальное значения УЭПР для лидирующей волны вдоль поперечного сечения через пакет КВВ, и контраст K_{sm} , определяющий характер изменения РЛ сигнала ВВ относительно фоновых значений УЭПР (моду РЛ проявления ВВ),

$K_{sm} = [(\sigma_{max}^o - \sigma_b^o) - |(\sigma_{min}^o - \sigma_b^o)|] / \sigma_b^o$, где σ_b^o – значения УЭПР в фоновой части РЛ снимка. Показано, что величина контраста K_{iw} уменьшается с увеличением угла падения и скорости приводного ветра. Максимальная величина контраста K_{iw} наблюдается в случае, когда ветер направлен по нормали к направлению антенны РСА, а ВВ сонаправлены ветру. При параллельной ориентации ВВ и дальности РСА (составляет около 60% наблюдений) величину РЛ контраста определяет направление ветра относительно направления распространения ВВ, а максимальный контраст наблюдается, когда ВВ ориентированы по нормали к ветру. Тип моды проявлений ВВ, характеризуемой РЛ контрастом K_{sm} , определяется исключительно ориентацией ВВ относительно направления ветра. Мода положительного (отрицательного) знака наблюдается в случае, когда ВВ распространяются против (по) ветру. Мода двойного знака наблюдается, когда ВВ и ветер ориентированы взаимно перпендикулярно.

Рассмотрен вопрос о зависимости РЛ контраста ВВ от характерных параметров внутренних волн, морской среды и скорости приводного ветра. На основе анализа размерностей была определена модуляционно-передаточная функция (МПФ) РЛ проявлений внутренних волн в виде:

$$K_{iw} / (u_{max} / C) = g / k_r^2 L W^2, \quad (1)$$

где u_{max} – амплитуда орбитальной скорости ВВ на поверхности, C – фазовая скорость ВВ, k_r – волновое число радиолокатора, L – полуширина солитона ВВ, W – скорость ветра на высоте 10 м. Показано, что МПФ уменьшается с увеличением LW^2 , а из трех случаев ориентации ВВ относительно направления ветра более высокая чувствительность МПФ к параметру $(k_r^2 L W^2 / g)$ наблюдается в случае, когда ВВ сонаправлены ветру.

В разделе 1.3 проводится анализ одного из интересных наблюдаемых явлений - РЛ проявлений ВВ в штилевой области. Показано, что РЛ проявления ВВ в штилевой области обусловлены отражением радиоволн от зеркальных участков морской поверхности, возникающих внутри штилевой области за счет увеличения среднеквадратичного наклона морской поверхности, формируемого длинными поверхностными волнами над подошвами проходящих ВВ.

В разделе 1.4 приводятся характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях (Рис. 1). Представлены общая статистика встречаемости КВВ на акваториях морей и детальные карты пространственного распределения их основных характеристик. Показано, что максимальное количество наблюдений КВВ в Баренцевом море приходится на районы моря вблизи арх. Земля Франца-Иосифа, о. Белый и к западу от прол.

Карские Ворота. В Карском море основные районы детектирования КВВ находятся восточнее прол. Карские Ворота, над юго-восточной частью Новоземельской впадины и северо-восточнее м. Желания. Регулярные наблюдения КВВ вблизи арх. Земля Франца-Иосифа позволили определить внутрисезонные изменения фазовой скорости ВВ, связать их на основе дисперсионного соотношения для ВВ низшей внутренней моды с характеристиками верхнего слоя моря и провести оценку «массосодержания» $(\Delta\rho/\rho)d$ верхнего слоя моря и его эволюции во времени.

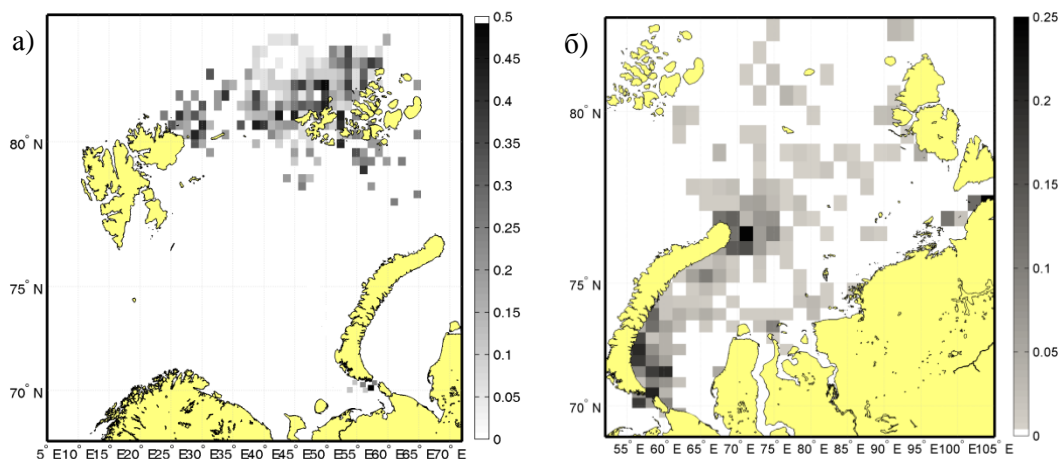


Рис.1. Частота встречаемости внутренних волн в РСА изображениях а) Баренцева моря и б) Карского моря в летне-осенний период 2007 г.

Во второй главе на основе совместного анализа сопряженных ИК и РЛ наблюдений и результатов модельных расчетов проводится анализ проявления фронта прибрежного апвеллинга в РСА снимках юго-восточной части Балтийского моря.

В разделе 2.1 приводится общее описание набора данных и спутниковых наблюдений интенсивного прибрежного апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в июле-августе 2006 года (Рис. 2).

В разделе 2.2 проведен анализ РЛ проявлений апвеллинга на основе модельного блока – модели трансформации АПС над неоднородностями поля поверхностной температуры, определяющей изменения приводного ветра над фронтом, и эмпирической модели СМОД4 [Stoffelen, Anderson, 1997], связывающей величину обратного рассеяния РЛ сигнала со скоростью приводного ветра. Оценка трансформации АПС над фронтом апвеллинга проводилась на основе закона сопротивления для планетарного погранслоя, связывающего динамическую скорость у поверхности воды со скоростью геострофического ветра и параметром стратификации:

$$\kappa \mathbf{G} / \mathbf{u}_* = \ln(\kappa u_* / f z_0) - B(\mu) - iA(\mu), \quad (2)$$

где $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана, μ – параметр стратификации; f – параметр Кориолиса; $\mathbf{G} = G \exp(i\varphi_G)$ – комплексная скорость геострофического ветра с направлением φ_G ; $\mathbf{u}_* = u_* \exp(i\varphi_w)$ – комплексная скорость трения у морской поверхности с направлением φ_w ; $A(\mu)$ и $B(\mu)$ – некоторые универсальные безразмерные функции для планетарного АПС; z_0 – параметр шероховатости. Скорость ветра U_{10} на стандартной высоте 10 м рассчитывалась на основе скорости трения, определяемой из закона сопротивления (2), в виде:

$$U_{10} = u_* / \kappa \ln(10/z_0). \quad (3)$$

Далее скорость ветра U_{10} использовалась для расчета обратного рассеяния РЛ сигнала по модели CMOD4. Результаты модельных расчетов (Рис. 3, а-б) показали, что изменение стратификации атмосферного погранслоя над термическим фронтом является ключевым механизмом проявления фронта апвеллинга в РСА изображениях.

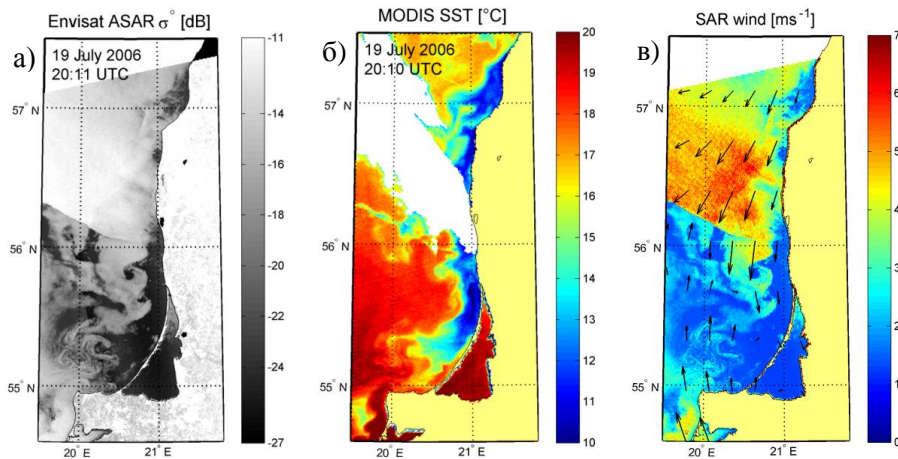


Рис. 2. Проявление прибрежного апвеллинга в спутниковых измерениях 19 июля 2006 года. (а) РСА изображение Envisat ASAR (20:11 UTC); (б) поле ТПМ MODIS Terra (20:10 UTC); (в) поле скорости приводного ветра, восстановленное по РСА изображению (а). Стрелками отмечено направление ветра по модели NCEP. © ESA © NASA

На основе доступных РСА изображений прибрежного апвеллинга проведен анализ зависимости величины РЛ контраста от скорости приводного ветра и величины перепада ТПМ через фронт в виде зависимости $\Delta\sigma_0$ от безразмерного параметра стратификации, определяемого в виде $\mu_f = \kappa^2(g/T_k)\Delta\theta_s/fU_{10}$, где $\Delta\theta_s = \theta_s - \bar{\theta}_s$ – перепад ТПМ через фронт. Диапазон наблюдаемых значений U_{10} и $\Delta\theta_s$ составил 2.5–8.5 м/с и 2–12°С, соответственно. Зависимость $\Delta\sigma_0$ от μ_f была параметризована в виде полуэмпирической модели:

$$\Delta\sigma_0 = a|\mu_f|^4 / (1 + b|\mu_f|^4), \quad (4)$$

где эмпирические коэффициенты $a = -8.1 \times 10^{-6}$ и $b = 10^{-6}$. Делается вывод, что модель (4) может иметь универсальное применение для разных районов и условий РЛ наблюдений, поскольку общие физические принципы, лежащие в его основе, не имеют региональных ограничений. Показано, что проявление термического фронта в РЛ снимках моря возможно при слабых и умеренных ветрах. При этом чувствительность РСА съемки существенно зависит от стратификации набегающего ветрового потока, а максимальный РЛ контраст фронта будет наблюдаться в случае, когда изменения ТПМ через фронт приведут к изменению знака стратификации набегающего ветрового потока.

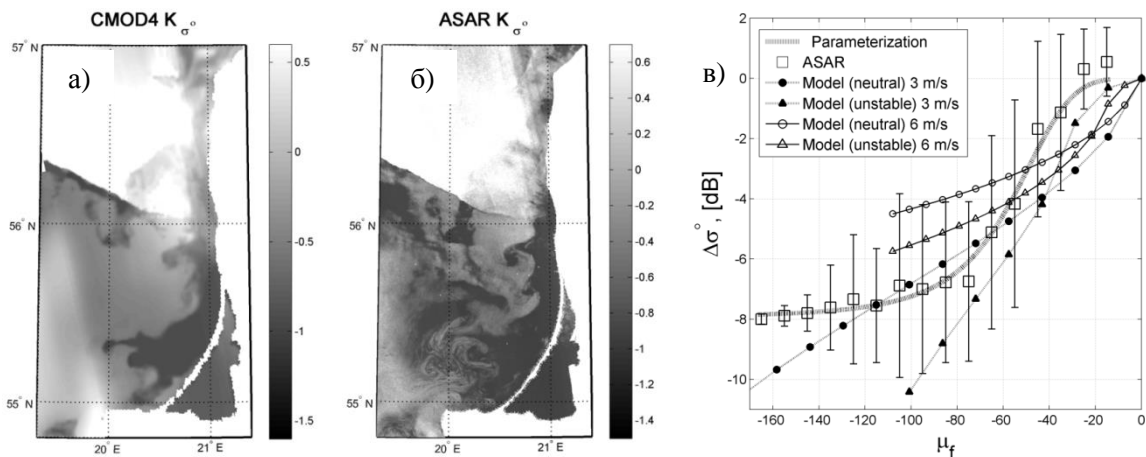


Рис. 3. а) Поле модельных РЛ контрастов; б) поле наблюдаемых РЛ контрастов, в) величина перепада РЛ сигнала $\Delta\sigma_0$ через фронт апвеллинга как функция безразмерного параметра стратификации μ_f . Жирная пунктирная кривая соответствует параметризации РЛ наблюдений на основе модели (4). РЛ наблюдения отмечены квадратами. Модельные кривые рассчитаны для двух скоростей ветра – 3м/с (черные символы) и 6м/с (белые символы) при нейтральной (кольца) и неустойчивой (треугольники) стратификации АПС.

В разделе 2.3 проведен анализ влияния пленок на формирование РЛ проявлений фронта апвеллинга. Образование зон конвергенции/дивергенции поверхностных течений, в которых может происходить пространственное перераспределение пленок ПАВ, определялось на основе модели взаимодействия экмановского и квазигеострофического течений [Klein, Nua, 1990; Isern-Fontanet et al., 2008]. Сравнение результатов расчетов поля дивергенции поверхностного течения с РЛ наблюдениями выявило высокую пространственную корреляцию между положением темных сликоподобных структур в РЛ изображениях и зонами конвергенции течений. Этот факт подтвердил предположение о формировании темных структур в РСА изображениях за счет скопления пленок ПАВ в зонах

конвергенции поверхностных течений.

Таким образом, при слабых и умеренных ветрах РЛ проявления фронта апвеллинга вызваны изменением режима стратификации атмосферного погранслоя над холодным фронтом и гашением ветровой ряби пленками ПАВ в зонах конвергенции поверхностных течений, а их совместный эффект приводит к весьма сложным проявлениям фронта апвеллинга в РСА изображениях моря.

В третьей главе на основе анализа 4-поляризационных РСА измерений (на ВВ-, ГГ-, ГВ-, ВГ-поляризациях) исследуется роль различных механизмов рассеяния, ответственных за формирование поверхностных проявлений внутренних волн, течений и фронтальных разделов, а также возможность идентификации этих явлений на фоне пространственно-неоднородного поля ветра.

В разделе 3.1 приводится описание метода анализа 2-поляризационных РЛ измерений, предложенного ранее в работе [Kudryavtsev et al., 2013]. УЭПР морской поверхности σ_0^{pp} представляется в виде суммы компоненты УЭПР связанной с 2-масштабным брэгговским рассеянием, и компоненты УЭПР σ_{wb} , независимой от поляризации («неполяризованной» компоненты УЭПР или NP) и связанной с рассеянием на обрушающихся волнах:

$$\sigma_0^{pp} = \sigma_{0B}^{pp} + \sigma_{wb}, \quad (5)$$

где pp – обозначает ВВ- или ГГ-поляризации приема-излучения РЛ сигнала. Вклад обрушений волн может быть выделен из полной УЭПР, используя поляризационную разность $\Delta\sigma_0$ (PD) УЭПР на ВВ- и ГГ-поляризациях:

$$\Delta\sigma_0 \equiv \sigma_0^{vv} - \sigma_0^{hh} = \sigma_{0B}^{vv} - \sigma_{0B}^{hh}. \quad (6)$$

Поляризационная разность $\Delta\sigma_0$ определяется рассеянием РЛ сигнала на коротких волнах сантиметрового диапазона, близких к брэгговскому волновому числу, и содержит информацию об изменчивости приводного ветра и наличии slickов на морской поверхности. Поляризационное отношение (PR) РЛ сигнала, определяемое как отношение сигнала на ГГ-поляризации к сигналу на ВВ-поляризации, $PR = \sigma_0^{hh} / \sigma_0^{vv}$, характеризует распределение долей обратного рассеяния между короткими брэгговскими волнами и обрушениями волн.

Компонента NP, связанная с рассеянием радиосигнала на очень «крутых» обрушающихся участках морской поверхности и одинаковая на обеих поляризациях РЛ сигнала [Phillips, 1988; Kudryavtsev et al., 2003], определена в виде:

$$\sigma_{wb} = 0.5(\sigma_0^{vv} + \sigma_0^{hh}) - 0.5\Delta\sigma_0 \frac{(1+p_B)}{(1-p_B)}, \quad (7)$$

где $p_B = \sigma_{0B}^{vv} / \sigma_{0B}^{hh}$ – поляризационное отношение для 2-масштабной модели брэгговского

рассеяния. Описанный подход позволяет преобразовать PCA изображения на ГГ- и ВВ-поляризациях в три «новых» изображения, отображающих: 1. поляризационную разность, $\Delta\sigma_0$ (PD); 2. поляризационное отношение, PR; и 3. вклад обрушений волн, σ_{wb} (NP). Каждая из этих компонент УЭПР связана с конкретным механизмом рассеяния РЛ сигнала и его вкладом в формирование проявлений океанических процессов на PCA изображениях.

В разделе 3.2 дается краткое описание района исследований и исходного набора 4-поляризационных PCA изображений RADARSAT-2, дополненного модельными полями ветра.

В разделе 3.3 проводится анализ фоновых характеристик УЭПР на смежных (ГГ, ВВ) и перекрестных (ГВ, ВГ) поляризациях РЛ сигнала. Анализ фоновых характеристик УЭПР на смежных поляризациях РЛ сигнала показал, что поляризационное отношение (PR) существенно отличается от предсказаний 2-масштабной брэгговской модели (Рис.4, а) и показывает значительный вклад обрушений волн в обратное рассеяние РЛ сигнала. При малых ветрах и направлении антенны перпендикулярно ветру $NP \sim PD^2$, т. е. увеличение обрушений волн с увеличением скорости ветра происходит быстрее по сравнению с ростом брэгговских волн, а при умеренных ветрах и направлении антенны «на ветер» компоненты NP и PD практически линейно зависимы (Рис. 4, г).

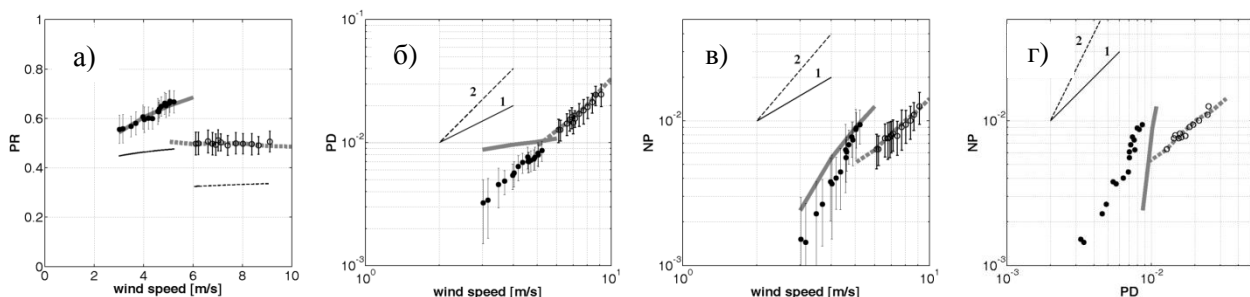


Рис. 4. Фоновые характеристики обратного рассеяния РЛ сигнала по данным спутниковой PCA съемки RADARSAT-2 за 29 июля и 1 августа 2012 г. а) Поляризационное отношение PR; б) поляризационная разность PD; в) неполяризованная компонента УЭПР NP, – как функции скорости ветра; г) зависимость NP от PD. Точки – РЛ наблюдения в направлении «поперек ветра» за 29 июля 2012 г. (угол падения $\theta=32^\circ \pm 0.25^\circ$). Кружки – РЛ наблюдения в направлении «на ветер» за 1 августа 2012 г. (угол падения $\theta=38.5^\circ \pm 0.25^\circ$). Вертикальными линиями показана величина стандартного отклонения PCA измерений. Черными сплошной и штриховой линиями в а) нанесены предсказания 2-масштабной брэгговской модели для РЛ съемки «поперек ветра» и «на ветер», соответственно. Серыми жирными линиями нанесены глобальные РЛ измерения ENVISAT по данным Mouche et al. [2012] для РЛ съемки «поперек ветра» (сплошная линия) и «на ветер» (штриховая линия).

Сигнал СР сильно зависит от скорости ветра, ветровая экспонента равна 1.5 (Рис. 5, а). Линейная зависимость полей NP и СР показывает, что влияние обрушений волн на обратное рассеяние сигнала СР на перекрестной поляризации тоже существенно (Рис. 5, б). Далее проведена оценка вкладов брэгговского рассеяния и обрушений волн в обратное рассеяние на перекрестной поляризации РЛ сигнала на основе отношения СР/PD. В рамках 2-масштабной брэгговской модели это отношение имеет вид (в первом порядке по наклонам волн):

$$\frac{\sigma_0^{vh}}{\Delta\sigma_0} = \frac{|G_{vv}-G_{hh}|^2}{|G_{vv}|^2-|G_{hh}|^2} \frac{s_n^2}{\sin^2\theta} \quad (8)$$

и не зависит от спектра брэгговских волн. Наблюдаемые значения СР/PD значительно (в 2.5 раза или на 4дБ) превосходят предсказания брэгговской модели (Рис. 5, в), что показывает значительное влияние обрушений волн на обратное рассеяние РЛ сигнала на перекрестной поляризации.

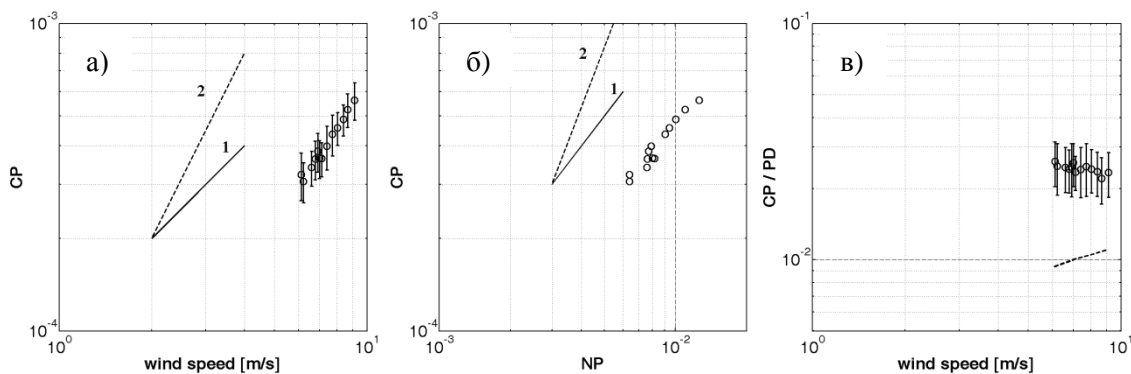


Рис. 5. Фоновые характеристики УЭПР на перекрестной поляризации РЛ сигнала, $CP=(VH+HV)/2$, по данным спутниковой РСА съемки RADARSAT-2 за 1 августа 2012 г. а) Зависимость СР от скорости ветра; б) зависимость СР от NP; в) зависимость отношения СР/PD от скорости ветра. Кружки – РЛ наблюдения в направлении «на ветер» за 1 августа 2012 г. (угол падения $\theta=38.5^\circ\pm 0.25^\circ$). Вертикальными линиями показана величина стандартного отклонения РСА измерений. Черной штриховой линией в в) нанесено предсказание 2-масштабной брэгговской модели.

В разделе 3.4 проводится анализ РЛ проявлений внутренних волн, течений и фронтов в 4-поляризационных РСА изображениях. Показано, что РЛ контрасты проявлений внутренних волн в поле NP значительно выше их значений в поле PD, свидетельствуя о том, что модуляция обрушений волн внутренними волнами является ключевым механизмом проявления ВВ в РСА изображениях. Наблюдаемые в поле PD модуляции спектра брэгговских волн внутренними волнами, по-видимому, связаны с механическим воздействием обрушений волн на морскую поверхность и генерацией паразитной

брэгговской ряби. При этом, короткие брэгговские волны, имеющие малый масштаб релаксации, сами по себе не испытывают прямого воздействия внутренних волн.

Анализ РСА изображений с проявлением фронта в юго-восточной части Горла Белого моря показал, что проявление фронта наблюдается во всех комбинациях РСА измерений за исключением поля PR (Рис. 6). Проявление фронта объясняется ослаблением ветровых напряжений при изменении режима стратификации АПС над холодным фронтом. Ввиду слабой ветровой зависимости поляризационного отношения PR, изменений скорости ветра над фронтом в поле PR не видно.

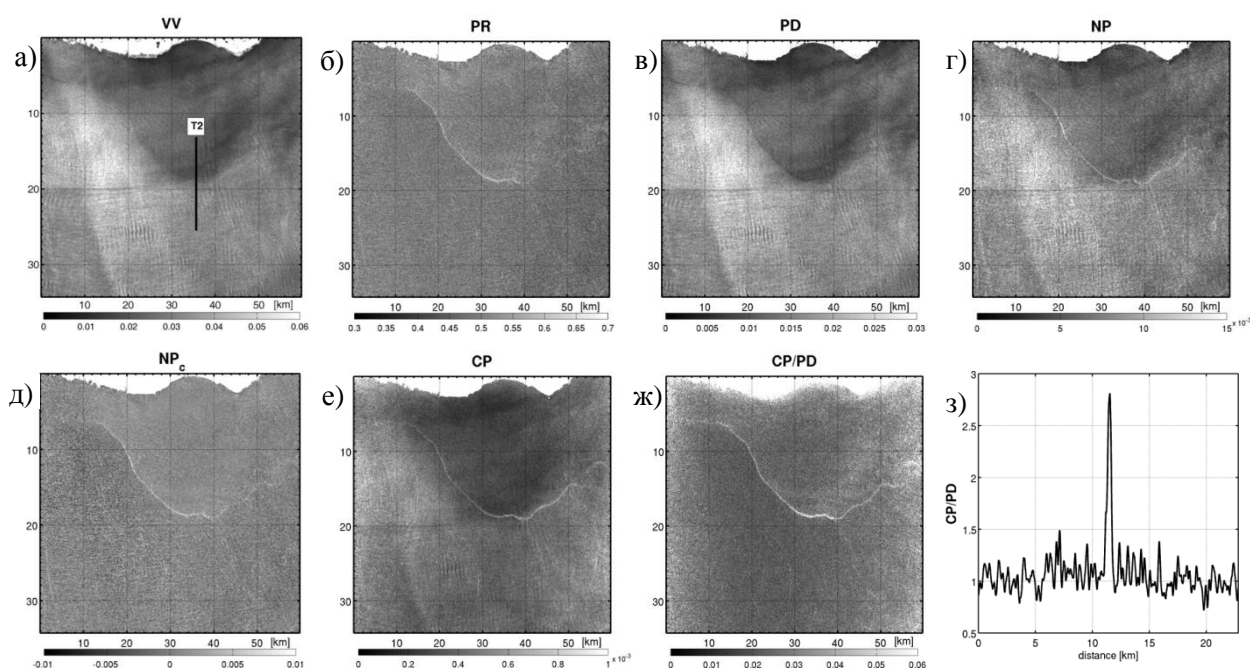


Рис. 6. Компоненты УЭПР для РСА изображения RADARSAT-2 за 1 августа 2012 г с проявлением структурного фронта в юго-восточной части Горла Белого моря. а) Поле УЭПР на ВВ-поляризации; б) поляризационное отношение PR; в) поляризационная разность PD; г) неполяризованная компонента УЭПР NP; д) компонента поля NP, обусловленная взаимодействием волн и течений; е) поле УЭПР на перекрестной поляризации CP; ж) Поле CP/PD; з) Профиль значений CP/PD вдоль сечения T2 в (а) через фронт. Сплошной черной линией в а) показано положение сечения T2 через фронт.

С другой стороны, в полях PR и NP отчетливо видна граница фронта в виде яркой полосы, связанной с интенсификацией обрушений волн в зоне конвергенции течений. Граница фронта также отчетливо видна в изображении CP (Рис. 6, е). Поля NP и CP очень схожи между собой, что позволяет сделать вывод о влиянии обрушений волн на обратное рассеяние сигнала CP. В поле PD, «нечувствительном» к поверхностным течениям, яркой

полосы на границе фронта не видно (Рис. 6, в). В поле CP/PD (Рис. 6, ж), практически независимом от скорости ветра (Рис. 5, в), наличие яркой полосы вдоль границы фронта подтверждает существенную роль обрушений волн на перекрестной поляризации РЛ сигнала. Профиль сечения CP/PD на Рис. 6 (з) показывает 2.5-кратное увеличение сигнала на границе фронта, что соответствует 3.5-кратному увеличению вклада обрушений волн в обратное рассеяние на перекрестной поляризации.

На основе метода декомпозиции 2-поляризационных РСА изображений показана возможность идентификации динамических процессов в морской среде на фоне пространственно-неоднородного поля ветра. Высокая чувствительность сигналов PD и NP к скорости ветра и относительная «нечувствительность» сигнала PD к полю течений позволяют исключить ветровые эффекты из поля NP, оставив только модуляции обрушений волн, связанные с полем поверхностных течений. Представив поле NP в виде суммы $\sigma_{wb} = \sigma_{wb}^W + \sigma_{wb}^C$, где σ_{wb}^W – ветровая компонента поля NP; σ_{wb}^C – компонента поля NP, обусловленная взаимодействием волн и течений. Ветровая компонента поля NP σ_{wb}^W может быть линеаризована в виде:

$$\sigma_{wb}^W - \overline{\sigma_{wb}^W} = A(\Delta\sigma_0 - \overline{\Delta\sigma_0}), \quad (9)$$

где A – коэффициент регрессии; $\overline{\sigma_{wb}^W}$, $\overline{\Delta\sigma_0}$ – осредненные значения соответствующих характеристик. В итоге выражение для компоненты σ_{wb}^C , описывающей влияние взаимодействия волн и течений на поле NP принимает вид:

$$\sigma_{wb}^C = \sigma_{wb} - [\overline{\sigma_{wb}^W} + A(\Delta\sigma_0 - \overline{\Delta\sigma_0})]. \quad (10)$$

Показано, что «фильтрация» ветровой изменчивости (включая атмосферные внутренние волны) из исходного поля NP позволяет явным образом выделить проявление границы течения, привязанной к линии фронта и являющейся, по-видимому, зоной конвергенции течения (Рис. 6, г-д). Предложенный подход может быть эффективно использован для выявления океанических фронтов на РСА изображениях на фоне пространственной изменчивости скорости ветра, являющейся «шумом».

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- Разработана оригинальная методика и ПМО для определения параметров внутренних волн по спутниковым РСА изображениям.
- На основе анализа массива РСА изображений предложена полуэмпирическая модель, связывающая величины РЛ контрастов ВВ с безразмерным параметром, включающим скорость ветра и полуширину солитона. РЛ контрасты уменьшаются с

увеличением ветра и масштаба ВВ. РЛ контрасты ВВ обладают также явной зависимостью от азимута наблюдений, – они максимальны, когда направление ветра перпендикулярно направлению антенны, а внутренние волны сонаправлены ветру.

- Проведена оценка «массосодержания» верхнего слоя Баренцева моря и его внутрисезонной изменчивости на основе РСА наблюдений кинематики пакетов КВВ и показано, что максимальный перепад плотности в пикноклине наблюдается в первой половине сентября, что согласуется с общими представлениями об изменчивости вертикальной структуры вод в рассматриваемом районе;
- Впервые на основе анализа массива спутниковых РСА наблюдений проведено районирование короткопериодных внутренних волн в Баренцевом и Карском морях и показано, что основные зоны генерации и распространения внутренних волн в Баренцевом море находятся вблизи арх. Земля Франца-Иосифа, о. Белый и к западу от прол. Карские Ворота; в Карском море – восточнее прол. Карские Ворота, над юго-восточной частью Новоземельской впадины и северо-восточнее м. Желания.
- На основе совместных РСА и ИК наблюдений фронта прибрежного апвеллинга в Балтийском море показано, что проявление фронта апвеллинга в РСА изображениях обусловлено изменениями режима стратификации атмосферного погранслоя и гашением ветровой ряби пленками ПАВ в зонах конвергенции поверхностных течений. Построена полуэмпирическая модель, связывающая величину РЛ контраста фронта с безразмерным параметром стратификации, основанным на измеряемом перепаде ТПМ через фронт и скорости ветра.
- На основе анализа ко-поляризационных РСА изображений установлено, что определяющим механизмом проявления поверхностных течений в РСА изображениях является рассеяние радиоволн на обрушениях ветровых волн, которые сильно модулируются при взаимодействии ветровых волн и течений; роль брэгговского рассеяния в формировании РЛ контрастов незначительна.
- На основе метода декомпозиции 4-поляризационных РСА измерений показана возможность идентификации поверхностных течений, внутренних волн и фронтальных разделов на фоне пространственно-неоднородного поля ветра.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. **Козлов И.Е.**, Сычев В.И. Реанализ проявлений океанских внутренних волн на изображениях РСА спутника «Алмаз-1» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып.5. Т.2. 2008. С.108-116.
2. **Козлов И.Е.**, Дайлидене И. Изучение апвеллинга в Балтийском море на основе спутниковых ИК- и РЛ-данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т.7. №3. 2010. С. 161-167.
3. **Козлов И.Е.**, Кудрявцев В.Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (86). 2010. С. 60-69.
4. **Козлов И.Е.**, Аверкиев А.С., Густоев Д.В. Наблюдение термических фронтов в районе Гусиной банки Баренцева моря на основе спутниковых радиолокационных данных // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. №20. 2011. С. 152-161.
5. **Kozlov I.E.**, Kudryavtsev V.N., Johannessen J.A., Chapron B., Dailidienė I., Myasoedov A.G. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // Advances in Space Research. Vol. 50. 2012. P. 1125–1137.
6. Зимин А.В., Родионов А.А., Шапрон Б., Романенков Д.А., Здоровеннов Р.Э., **Козлов И.Е.**, Мясоедов А.Г., Шевчук О.И. Работы с научно-исследовательского судна «Эколог» по проекту «Мегагрант» в Белом море, выполненные в июле-августе 2012 года // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. №26. 2013. С. 281-285.
7. **Kozlov I.**, Dailidienė I., Korosov A., Klemas V., Mingėlaitė T. MODIS-based sea surface temperature of the Baltic Sea Curonian Lagoon // Journal of Marine Systems. Vol. 129. 2014. P. 157–165.
8. Зимин А.В., Романенков Д.А., **Козлов И.Е.**, Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 года // Исследование Земли из космоса. №3. 2014. С. 1-14.
9. **Kozlov I.**, Romanenkov D., Zimin A., Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // Remote Sensing of Environment. Vol. 147. 2014. P. 99-107.
10. Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В., **Козлов И.Е.**, Шапрон Б.

Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т. 7. № 3. 2014. С. 29-41.

11. Kudryavtsev V., **Kozlov I.**, Chapron B., Johannessen J.A. Quad-polarization SAR features of ocean currents // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 119, doi:10.1002/2014JC010173.

Патенты

1. Мясоедов А.Г., **Козлов И.Е.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660637 INTERWAVE: «Определение характеристик океанских внутренних волн по их проявлениям в спутниковых радиолокационных снимках морской поверхности». Заявка № 2012618623. Дата поступления 10 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 ноября 2012 г.

2. Зимин А.В., **Козлов И.Е.**, Мясоедов А.Г., Мохнаткин Ф.Ю. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012621188 «Проявления внутренних волн по данным контактных и спутниковых наблюдений в Белом море в 2010 году (ВВ БМ 2010)». Заявка № 2012621065. Дата поступления 9 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 19 ноября 2012 г.

3. Зимин А.В., **Козлов И.Е.**, Атаджанова О.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2013621215. Внутренние волны по данным одновременных контактных и спутниковых наблюдений в Белом море (ВВ КС БМ). Заявка № 2013620969. Дата поступления 31 июля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 24 сентября 2013 г.

4. Зимин А.В., **Козлов И.Е.**, Атаджанова О.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014620713. Субмезомасштабные вихри по данным спутниковых наблюдений в Белом море. Заявка № 2014620317. Дата поступления 24 марта 2014 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 20 мая 2014 г.

5. **Козлов И.Е.**, Зубкова Е.В., Мясоедов А.Г., Шапрон Б.Ж.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014620714. Характеристики внутренних волн в Карском море по данным спутниковой радиолокационной съемки. Заявка № 2014620316. Дата поступления 24 марта 2014 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 20 мая 2014 г.

6. **Козлов И.Е.**, Зубкова Е.В., Шапрон Б.Ж.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014620750. Параметры внутренних волн в Баренцевом море по данным спутниковой радиолокационной съемки. Заявка № 2014620318. Дата поступления 24 марта 2014 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 23 мая 2014 г.