

Б. Шапрон, В. Кудрявцев, Е. Заболотских

ПРОЕКТ МЕГАГРАНТ: ОСНОВНЫЕ ИТОГИ

B. Chapron, V. Kudryavtsev, E. Zabolotskikh

MEGAGRANT PROJECT: GENERAL RESULTS

Приводится обзор основных результатов, полученных по проекту «Мегагрант – РГГМУ» за период 2011–2015 гг. Исследования проведены на базе лаборатории спутниковой океанографии, созданной в 2011 г. для реализации задач проекта.

Ключевые слова: спутниковая океанография и метеорология, методы обработки и анализа спутниковых данных, физическое моделирование, спутниковый информационный портал.

The paper presents the main results obtained in the frame of “Megagrant – RSHU” project in 2011–2015. The project was funded by the Russian Federation Government in the frame of the national support program for the scientific research in the Russian universities under the leadership of invited world level scientists. Presented research was carried out in the satellite oceanography laboratory, founded in 2011 for the project task implementation.

Key words: satellite oceanography and meteorology, satellite data processing and analysis, physical modeling, satellite informational portal.

Введение

В 2010 г. Правительство РФ объявило о начале программы государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования. Поддержка Правительства РФ осуществлялась через выделение Мегагранта высшему учебному заведению для создания лаборатории и проведения на ее базе фундаментальных и прикладных исследований под руководством приглашенного ученого мирового уровня.

В 2011 г. в результате жесткого конкурсного отбора заявка РГГМУ на получение Мегагранта для создания при РГГМУ Лаборатории Спутниковой Океанографии (ЛСО) под руководством французского ученого с мировым именем, доктора Бертрана Шапрона из института IFREMER, была поддержана Советом по грантам Правительства Российской Федерации (решение Совета по грантам, протокол от 21 сентября 2011 г. № 7). Основными задачами Лаборатории являлись:

- Проведение фундаментальных исследований в области физической и спутниковой океанографии и метеорологии, направленных на создание новых

подходов и методов исследования природной среды на основе совместного использования данных спутниковых измерений и моделирования.

- Разработка новых методов и алгоритмов обработки, анализа и применения спутниковых данных для исследования и оперативного мониторинга природной среды, включая опасные природные явления и их воздействие на окружающую среду.
- Создание спутникового информационного портала, обеспечивающего сбор, хранение и предоставление удобного доступа к спутниковым данным, получаемых в «онлайн» режиме из мировых центров спутниковой информации. Создание на этой основе, специализированного Арктического портала, обеспечивающего в реальном масштабе времени мониторинг гидрометеорологического состояния Арктики.
- Проведение образовательной деятельности, подготовка специалистов мирового уровня (магистры, аспиранты, кандидаты наук) в области исследования и применения спутниковых данных для исследования природной среды.

Актуальность создания ЛСО в РГГМУ была обусловлена, в первую очередь, разрывом между огромными потоками информации, поступающих с быстро развивающейся мировой спутниковой наблюдательной системы, и конечными пользователями (ученые и специалисты, студенты и аспиранты), которым адресована эта информация, но которые «не знают» о ее существовании и/или не обладают необходимым опытом ее применения для фундаментальных и прикладных гидрометеорологических исследований.

В настоящее время основную часть коллектива Лаборатории (15 человек) составляют молодые ученые, программисты, аспиранты и студенты. К работе в Лаборатории на временной основе также привлекаются сотрудники, аспиранты и студенты РГГМУ. Исследования Лаборатории осуществляются в тесном сотрудничестве с российскими и западными учеными. За относительно короткий срок существования Лаборатории получен ряд важных научных результатов, которые опубликованы в высокорейтинговых международных и российских журналах (включая 27 статей, входящих в базу данных Web of Science и SCOPUS), и доложены на 52 международных конференциях и семинарах. Лабораторией создан спутниковый информационный портал SATIN (<http://satin.rshu.ru>), предоставляющий удобный доступ к разнообразным спутниковым данным по Мировому океану, и Арктический online портал SIOWS («Storm – Ice – Oil – Watch – System», <http://arctic.solab.rshu.ru/>), нацеленный на «онлайн» мониторинг гидрометеорологического состояния Арктического региона на основе спутниковых и модельных данных. Ниже приводится обзор основных научных результатов, полученных сотрудниками ЛСО в рамках проекта Мегагрант.

Развитие новых методов и моделирование

Моделирование микроволнового излучения

Спутниковые радиометрические измерения характеризуются возможностью получения регулярной оперативной информации об атмосфере и подстилающей поверхности в глобальном масштабе и, дополняя комплекс традиционных

гидрометеорологических наблюдений (контактных и дистанционных наземных), вносят существенный вклад в улучшение анализа погодообразующих процессов и климата. Все пассивные микроволновые исследования в рамках Мегагранта базировались на физико-математическом моделировании радиоярких температур уходящего излучения системы океан – атмосфера. Моделирование проводилось для характеристик каналов радиометров Advanced Microwave Sounding Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E) на спутнике Aqua, AMSR2 на спутнике GCOM-W1 и Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) на спутнике Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). Геофизическая модельная функция состоит из эмпирических моделей излучения океана и упрощенных моделей атмосферного поглощения, учитывающих наличие излучения и поглощения кислорода, водяного пара и жидко-капельной влаги облаков. Модель ограничена условиями отсутствия рассеяния, т.е. для частот Ka -, K - и Ku -диапазона применима в условиях отсутствия осадков, а для частот C - и X -диапазона и для условий дождя с интенсивностью, не превышающей 20 мм/ч. На основании сравнения результатов моделирования с измерениями спутниковых радиометров при использовании нескольких моделей спектров поглощения атмосферных газов, позволяющих рассчитать излучение атмосферы, и моделей излучения океана, основанных на новых экспериментальных данных, опубликованных в научных изданиях в последние годы, выбрана оптимальная комбинация моделей, обеспечивающая наименьшую среднеквадратичную разность между радиометрическими измерениями и модельными расчетами [31, 16].

Калибровка измерений спутниковых микроволновых радиометров

Преимущества данных пассивных микроволновых инструментов, связанные с возможностью их использования для количественных оценок геофизических параметров, реализуются только при обеспечении калибровки измерений. Особую значимость решение проблем калибровки приобретает для климатических исследований, базирующихся на длинных временных рядах данных, полученных различными инструментами. Однородность рядов радиоярких температур обеспечивается как интеркалибровкой спутниковых инструментов, так и калибровочными работами, основанными на моделировании радиоярких температур и выполнении расчетов с использованием наземных измерений параметров океана и атмосферы, определяющих уходящее излучение. В рамках проекта Мегагрант было проведено сравнение расчетных значений радиоярких температур с измеренными с целью определить систематический (средний) корректирующий сдвиг между результатами вычислений и измерениями для последующего использования в качестве настроечной поправки.

Полученные поправки к радиоярким температурам в соответствующих каналах спутниковых микроволновых радиометров вместе с разработанной геофизической моделью могут быть использованы в дальнейшем при разработке алгоритмов оценки параметров, основанных на результатах модельных расчетов. С использованием корректирующих поправок к радиоярким температурам, которые интегрально компенсируют неточности модели и ошибки внутренней калибровки продуктов уровня Level 1B, можно проводить любые исследования, связанные с разработкой

алгоритмов восстановления параметров океана и атмосферы по данным радиометров AMSR-E и SSMIS [30, 16].

Развитие новых алгоритмов восстановления гидрометеорологических параметров

Возможность оценки геофизических параметров по данным спутникового микроволнового зондирования зависит от чувствительности радиояростной температуры к изменениям параметров. Эта возможность реализуется преимущественно для параметров атмосферы над поверхностью океана и для самих параметров океана, а также для сплоченности морского льда.

Используя подход, основанный на физическом моделировании радиояростных температур уходящего излучения и последующей корректировки модельных значений радиояростных температур, в рамках проекта были разработаны новые алгоритмы восстановления интегрального содержания влажности в атмосфере (влагозапаса атмосферы), интегрального содержания жидкокапельной влаги облаков (водозапаса атмосферы), температуры поверхности океана, скорости приводного ветра, интенсивности дождя и интегрального поглощения микроволнового излучения в атмосфере на частоте 10,65 ГГц по данным как исторического спутникового радиометра AMSR-E на спутнике Aqua, так и действующего радиометра AMSR2 на спутнике GCOM-W1. Новые методы были созданы на основе использования Нейронных Сетей в качестве метода решения обратной задачи. Все методы имеют повышенные точности в условиях тропических и внетропических циклонов и полярных ураганов [10, 17].

Метод оценки интенсивности дождя был верифицирован на основании сравнения результатов применения метода к данным радиометра AMSR2 с несколькими готовыми спутниковыми продуктами по интенсивности дождя, созданными в оперативном центре хранения и обработки информации Remote Sensing Systems (RSS) по данным TMI и AMSR2 [22].

Для скорости приводного ветра было разработано два алгоритма: высокочастотный и низкочастотный. Оба алгоритма были протестированы с использованием базы данных японского аэрокосмического агентства, содержащей более 5000 измерений морских буев, полей ветра по данным скаттерометра MetOp-A ASCAT для базы данных внетропических циклонов в Северной Атлантике и измерений с морских платформ в Северном и Норвежском морях [17]. Результаты применения высокочастотного алгоритма для изучения поля ветра во внетропическом циклоне в Тихом океане, в сравнении с полем ветра оперативного продукта Японского Космического Агентства JAXA, приведены на рис. 1.

Поля ветра по данным AMSR2, обладающие сравнительно высоким пространственным разрешением и высокой точностью, могут быть успешно использованы как в качестве исходных данных при моделировании различных процессов в атмосферном погранслое, так и для оценки качества прогноза [24].

В рамках проекта был также создан новый метод идентификации радиочастотных помех С- и Х-диапазона над океанами, основанный на анализе соотношений модельных значений радиояростных температур для всего диапазона изменчивости естественных условий, реализующихся в океане и атмосфере [21].

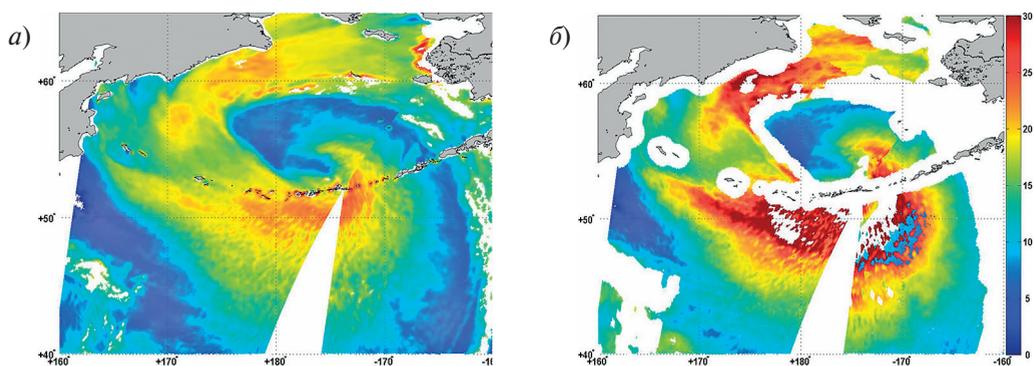


Рис. 1. Поля ветра во внетропическом циклоне в Тихом океане 15 ноября 2013 г., восстановленные по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2: *а* — с использованием нового алгоритма; *б* — оперативный продукт по скорости ветра JAXA

Разработка новых схем ассимиляции данных спутниковых микроволновых измерений при моделировании эволюции полярных циклонов

В рамках исследований, направленных на усовершенствование методов совместного использования спутниковых данных и методов численного моделирования, решалась задача прогнозирования таких опасных погодных явлений, как полярные циклоны. Для моделирования была использована Advanced Research WRF модель WRF-ARW, базирующаяся на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости. На основе анализа исходных данных, которыми являлись данные обработки спутниковых наблюдений было выявлено две области Баренцева моря, где в холодное время года в период 2009–2011 г. наблюдалось максимальное количество полярных циклонов. Оцененные по данным AMSR-E параметры были не только использованы в качестве начальных полей при гидродинамическом моделировании полярных циклонов, но и ассимилированы с использованием новой 4D-var схемы ассимиляции, что позволило улучшить качество прогноза эволюции полей геофизических параметров. Анализ результатов численных экспериментов показал, что при ассимиляции данных спутникового зондирования гидродинамическая мезомасштабная модель WRF хорошо воспроизводит атмосферные процессы в этих областях и позволяет изучать процессы, происходящие в арктической атмосфере (рис. 2) [42].

Мульти поляризационные PCA измерения

Современные спутниковые радиолокационные (РЛ) системы являются радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), работающими на ко- (ВВ и ГГ) и кросс поляризациях (ВГ), например, RADARSAT-2 (Канадское космическое агентство), TerraSAR-X (Германское космическое агентство), Sentinel-1 (Европейское космическое агентство), PALSAR-2 (Японское космическое агентство). Наличие ко- и/или кросс поляризационных каналов измерений открывает новые возможности для исследования морской поверхности и поверхностных проявлений океанических процессов.

Основная идея нового подхода анализа ко поляризационных РСА измерений сформулирована в работе [7]. Удельная эффективная площадь радиолокационного рассеяния (УЭПР) на ГГ и ВВ поляризациях представляются в виде суммы поляризованного рассеяния, связанного с традиционным двух масштабным Брэгговским рассеянием, и неполяризованными отражениями от обрушений волн. Существенный вклад неполяризованного рассеяния в УЭПР поверхности океана была подтверждена в ряде натуральных экспериментов. Как предложено в работе [8], РСА изображения на ВВ и ГГ поляризациях могут быть преобразованы в два новых изображения, несущих информацию о коротких (Брэгговских) ветровых волнах (поляризационная разность), и обрушениях волн, формирующих неполяризованную составляющую РЛ рассеяния. Поскольку Брэгговские волны (их длина порядка нескольких см) обладают малым масштабом релаксации (порядка 10 м), то поляризационная разность должна описывать изменчивость приводного ветра и наличие сликов. Второе, неполяризованное, изображение формируется обрушениями волн, которые чувствительны к градиентам поверхностных течений. Таким образом, предложенный подход позволяет разложить исходные ВВ и ГГ РСА изображения на два новых, которые несут информацию о разных физических процессах на морской поверхности. Этот подход позволяет существенно повысить информационные возможности РСА измерений для исследования океанской среды. Пример анализа ВВ и ГГ РСА изображений с применением нового подхода показан на рис. 3.

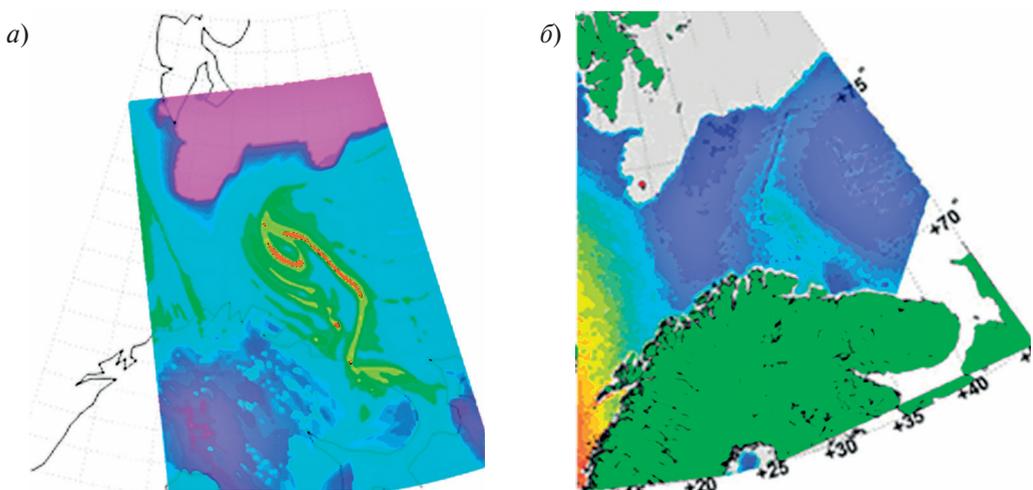


Рис. 2. Поля влагозапаса атмосферы в полярном циклоне в Баренцевом море 8 января 2009 г.:
a — 24-часовой численный прогноз; *б* — восстановленное по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2

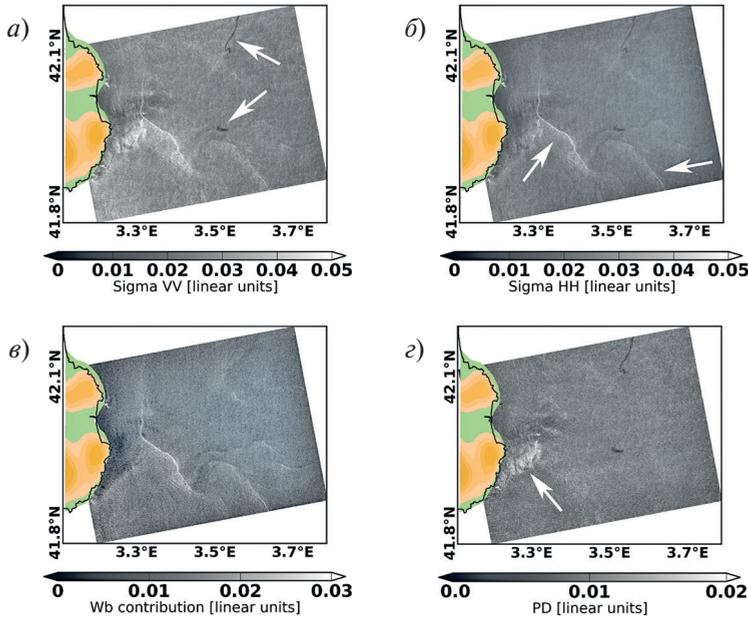


Рис. 3. RADARSAT-2 PCA изображение прибрежной зоны в Средиземном море, 17:40 UTC 18 Декабря 2010:
a — PCA на ВВ-поляризации; *б* — PCA на ГГ-поляризации;
в — вклад неполяризованного рассеяния; *г* — поляризационная разность.
 Стрелками показаны проявления:
a — поверхностных slickов; *б* — поверхностного течения; *г* — особенностей изменчивости ветрового поля

Влияние ТПО на восстановление скорости ветра по данным спутниковых скаттерометров

Спутниковые скаттерометры являются основным инструментом исследования полей скорости ветра из космоса. Метод восстановления скорости ветра основан на зависимости РЛ рассеяния от интенсивности шероховатости морской поверхности, которая, в свою очередь, зависит от ветровых напряжений. В высоких широтах (где температура океана близка к нулю) температура поверхности океана (ТПО) может влиять на уровень спектра шероховатости за счет влияния на плотность воды и воздуха, а также вязкость воды. Эти эффекты не были ранее включены в стандартные алгоритмы восстановления ветра по скаттерометрическим измерениям (алгоритмы типа CMOD). В работе [4] предложено обобщение стандартных алгоритмов за счет использования физической модели спектра волн, учитывающей влияния ТПО на короткие волны, в модели радиолокационного рассеяния в применении к анализу данных измерений скаттерометров QuikScat Ku-band и ASCAT C-band. Показано, что учет эффекта ТПО на обратное рассеяние, позволяет объяснить наблюдаемое расхождение между восстановленным ветром и данными измерений, которое достигает 0,5 м/с. Введение ТПО коррекции в стандартные алгоритмы позволяет улучшить точность измерения скорости ветра спутниковыми скаттерометрами в высоких широтах.

Восстановление характеристик ледяного покрова по данным спутниковых скаттерометров

Активные микроволновые измерения являются одним из наиболее эффективных инструментов исследования ледяного покрова в Арктике в условиях почти постоянного присутствия облачности и дефицита освещенности. Помимо своего прямого назначения (измерения скорости ветра), спутниковая скаттерметрия позволяет также определять границы и структуру ледового покрова. В работе [41] предложен метод идентификации ледяного покрова по данным спутникового скаттерометра ASCAT, установленного на спутниках серии MetOP. Метод основан на различии особенностей рассеяния радиоволн на морской поверхности и поверхности, покрытой льдом. Эти различия включают:

- азимутальную зависимость рассеяния (поверхность льда азимутально изотропна)
- зависимость рассеяния от угла падения (для ледового покрова эта зависимость более слабая, чем над водной поверхностью);
- изменчивость рассеяния на повторяющихся витках спутниковых измерений (в отличие от морской поверхности, рассеяние на поверхности льда не изменяется при повторяющихся измерениях).

В результате предложен новый эффективный метод идентификации границ ледового покрова по данным спутниковых скаттерометрических измерений. Показано, что контрасты УЭПР ледового покрова в Арктике обладают значительной пространственной изменчивостью, ассоциируемой с пространственными изменениями структуры ледового покрова, уровнем торосистости и наличием полыней. Поле контрастов УЭПР, иллюстрирующее неоднородность ледяного покрова, полученное в результате суточного цикла измерений представлено на рис. 4. Применение предложенного метода позволяет также исследовать пространственно-временную эволюцию ледового покрова, и оценивать его скорость дрейфа и деформацию.

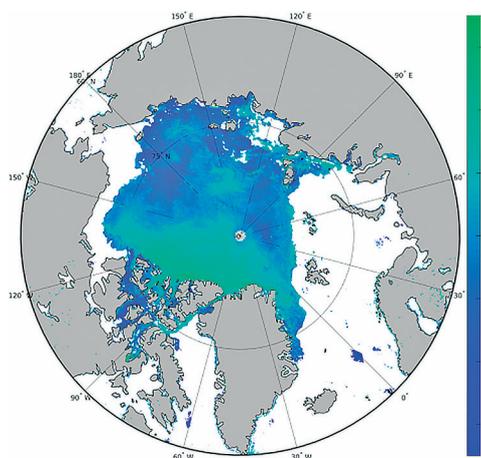


Рис. 4. Нормированное поле УЭПР ледяного покрова в Арктике по данным спутникового скаттерометра ASCAT за 15 ноября 2013 г. Изменения УЭПР связано со структурой ледового покрова, уровнем торосистости и наличием полыней. Белый цвет показывает области поверхности океана, свободные от льда

Моделирование влияния волн и течений на Доплеровский сдвиг частоты РСА сигнала

РСА сигнал содержит информацию как об интенсивности шероховатости морской поверхности, рассеивающей радиоволны, так и скорости ее движения (через Доплеровский сдвиг частоты сигнала). Доплеровский сдвиг содержит информацию не только о скорости поверхностного течения, но в большей степени зависит от орбитальных скоростей длинных (энергонесущих) поверхностных волн, которые несут на себе и модулируют короткие волны (шероховатость), рассеивающие радиоволны. В работе [2] предложена модель, описывающая влияние ветровых волн и их обрушений на сдвиг Доплера частоты при различных условиях РСА наблюдений (азимут, угол падения, поляризация, длина радиоволны). Модель учитывает влияние различных механизмов рассеяния (резонансное Брэггское, зеркальные отражения, отражения от гребней обрушающихся волн) на доплеровскую частоту. Модель протестирована на данных измерений УЭПР и доплеровской частоты РСА Envisat ASAR и продемонстрировала свою адекватность. Модель использовалась для анализа полей доплеровских сдвигов и УЭПР у побережья Бретани (Франция) в Атлантическом океане, характеризуемом интенсивными приливными течениями. Показана существенная роль модуляции УЭПР на формирование поле Доплеровских течений. Модель может быть использована в качестве инструмента анализа спутниковых РСА измерений доплеровского сигнала, позволяя исключить влияние волн, и восстановить поля поверхностных течений, являющихся основным объектом исследования [2].

Взаимодействие океана и атмосферы

Исследования в области взаимодействия океана и атмосферы позволяют создать физический базис для развития новых методов обработки и анализа спутниковых измерений.

Спектры коротких ветровых волн и обрушения

В работе [9] предложена новая модель спектра коротких ветровых волн (в диапазоне длин волн от миллиметра до десятка метров). Модель спектра основана на решении уравнения баланса энергии волн, учитывающей притоки энергии ветра, диссипацию энергии за счет обрушений и вязкости, генерацию волн микро обрушениями (генерация паразитных капилляров) и обрушениями волн метрового диапазона. Модель протестирована на данных натуральных измерений спектров волн оптической стереосистемой и измерениях обрушений волн (см. рис. 5).

Модель спектра волн включена в модель радиолокационного рассеяния, что позволило существенно улучшить качество анализа и интерпретации РСА измерений различных океанографических явлений. В частности, эта модель использована для анализа РСА наблюдений нефтяных и биологических сликов [26]. Установлено, что поверхностные пленки подавляют не только короткие волны, но и обрушения ветровых волн дециметрового — метрового диапазона. Этот факт открывает новые возможности идентификации нефтяных загрязнений и их выделения на фоне биологических сликов и штилевых зон.

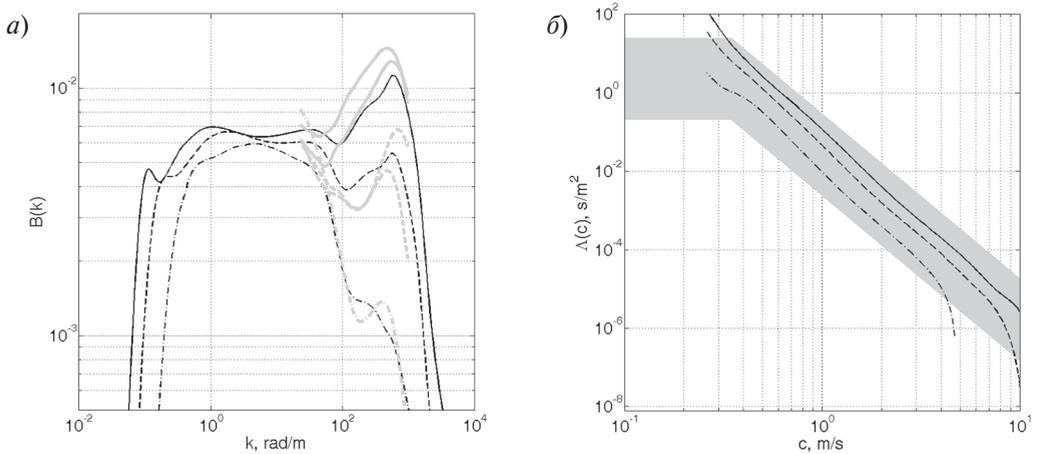


Рис. 5. *a* — спектры насыщения ветровых волн; темные сплошные линии — модельные расчеты при скорости ветра 5 м/с (штрих-пунктир), 10 м/с (штрих), и 15 м/с (сплошная); серые линии — измерения при скорости ветра 4,6 м/с (штрих-пунктир), 10,3 м/с и 10,2 м/с (штрих), и при 14,4 м/с и 15,9 м/с (сплошная); *б* — длина гребней обухающихся волн как функция скорости их движения при скорости ветра 5 м/с (штрих-пунктир, 10 м/с (штрих) и 15 м/с (сплошная). Заштрихованная область — измерения

Потоки тепла и импульса и их связь с ветровыми волнами

Волны генерируются ветром и тем самым осуществляют сопротивление морской поверхности воздушному потоку. Сопротивление осуществляется также за счет отрывов воздушного потока от гребней обрушающихся волн. Описание сопротивления морской поверхности, а так же тепло- и влагообмена на поверхности является одной из основных задач взаимодействия океана и атмосферы. В работе [13] предложена модель атмосферного пограничного слоя взаимосвязанного с ветровыми волнами. Модель дает взаимосогласованное описание характеристик турбулентного потока и параметров ветрового волнения, включающих обрушения волн.

Параметризация процессов обмена на поверхности при сильных ветрах для усвоения в численных моделях

Одной из целей модели являлось построение физически обоснованных параметризаций процессов обмена теплом и импульсом на морской поверхности для последующего использования в численных моделях эволюции и прогноза тропических и полярных циклонов. Пример усвоения новой параметризации в моделях эволюции тропических циклонов приведен в работе [23], где показано, что более точное описание взаимодействия ветра и волн при сильных ветрах и его влияния на потоки тепла и импульса приводит к значительному улучшению качества численного моделирования динамики ураганов.

Приложение к оценке ветроэнергетического потенциала акваторий.

Основными достоинствами РСА являются высокое пространственное разрешение (порядка 10 м) и возможность измерения ветра в непосредственной близости к береговой черте, что позволяет проанализировать особенности пространственной структуры ветровых полей в прибрежных зонах. Особенности поля ветра связаны с эффектами

затенения и разгона ветрового потока при смене подстилающей поверхности с суши на воду. При установке ветрогенераторов в прибрежных областях необходимо учитывать эти эффекты. В лаборатории проведено исследование особенностей поля ветра и даны оценки ветроэнергетического потенциала в прибрежной зоне (в приложении к Финскому заливу) на основе данных спутниковых измерений РСА [32]. Дана оценка ветроэнергетического потенциала Финского залива и его сезонная изменчивость, а также дана оценка числа ветро энергетических установок, замещающих «типичные» электрогенерирующие станции [23].

Применение спутниковых данных для исследования геофизических явлений

Исследования ураганов

Несмотря на обширную сеть измерений с буйев и специально организованных самолетных измерений скорости ветра в тропических циклонах, поля ветра можно получить только с использованием данных спутниковых измерений. Для пассивных микроволновых измерений отделение ветрового сигнала от дождевого представляет собой большую проблему. В рамках проекта был предложен оригинальный метод восстановления скорости ветра в ураганах, основанный на разделении вкладов в излучение дождя и системы океан–атмосфера без дождя, основанный на анализе полей радиояркостных температур над районами интенсивных осадков в ураганах [20].

Разработанный метод позволяет восстанавливать поля ветра в ураганах по данным радиометра AMSR2. Рис. 6 демонстрирует пример применения разработанного метода для восстановления поля скорости приводного ветра в 3-х тропических циклонах в Атлантическом океане.

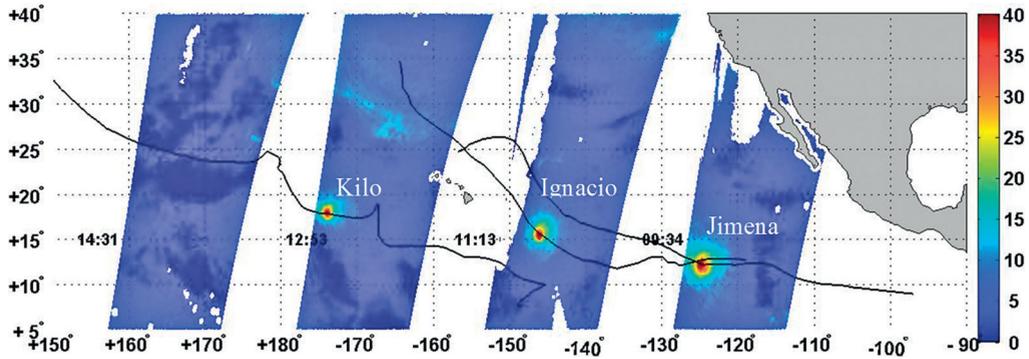


Рис. 6. Поля скорости приводного ветра, восстановленные по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2, для системы из трех циклонов в Тихом океане 29 августа 2015 г. Белые области замаскированы с использованием метода идентификации радиочастотных помех

Измерения спутниковых микроволновых радиометров могут быть использованы для оценки температуры и солёности океана и изучения пространственно-временной изменчивости следов ураганов [3]. За счет ураганной скорости ветра, развиваемой в

тропических циклонах, двигаясь над океаном, они оставляют за собой след, температура поверхности океана в котором на несколько градусов ниже, чем в не затронутых циклоном областях. Падение температуры происходит за счет вовлечения более холодных вод в верхний перемешанный слой океана вследствие эрозии термоклина, вызванной активным турбулентным и волновым перемешиванием под воздействием ураганных ветров. Подобные аномалии температуры поверхности океана смещены вправо от траектории циклона относительно направления его движения (в Северном полушарии). Традиционно, это объясняется тем, что в правом секторе циклона скорость ветра выше за счет добавления скорости передвижения самого циклона. Однако существует и другое объяснение, основанное на наблюдаемом значительном усилении волн в правом секторе урагана. Это явление было исследовано в проекте экспериментально и теоретически.

Волны в ураганах

Данные измерений волн спутниковыми альтиметрами Jason-1, Jason-2, CryoSat-2 и SARAL/AltiKa были использованы для исследования особенностей генерации волн ураганами/тайфунами. Для этого была создана база измерений высот волн альтиметрами, пересекающих тайфун через область максимального ветра (глаз циклона) в направлении с переднего-правого сектора в левый-задний сектор, где ожидается наибольшее и наименьшая высоты волн соответственно. Пример подобного измерения представлен на рис. 7. Во всех случаях измерений отмечалась значительная асимметрия высот волн между левым и правым секторами тропического циклона. Показано, что в большинстве случаев эта асимметрия не может быть объяснена асимметрией поля скорости ветра в циклоне. Это означает, что необходимо учитывать иной механизм генерации, объясняющий аномальную генерацию волн в правом относительно направления движения циклона секторе, где направление ветра совпадает с направлением движения циклона. Для объяснения наблюдаемого феномена предложена аналитическая модель генерации волн движущимся ураганом, основанная на обобщении теории подобия для ветровых волн. Показано, что усиление волн в правом секторе ураганов/тайфунов объясняется эффектами захвата ветровых волн. Сопоставлены результаты модели и альтиметрических измерений, сделан вывод об адекватности модели и ее способности воспроизводить наблюдаемую асимметрию высот волн в левом и правом секторах циклона за счет учета эффекта «захвата волн». Результат исследования представлены в работе [25]).

Полярные циклоны

Полярные циклоны (ПЦ) представляют собой кратковременные, но очень интенсивные атмосферные вихревые образования, которые развиваются над морской поверхностью, имеют характерный масштаб до 1000 км и характеризуются штормовыми скоростями ветра. Время жизни таких мезоциклонов не превышает, как правило, 1–2 дней, что, совместно со сравнительно небольшими размерами, затрудняет их обнаружение и изучение. Поля интегральной влажности атмосферы, восстановленные по данным спутниковых микроволновых радиометров, могут быть успешно использованы для детектирования полярных циклонов. С использованием этих полей за период 1995–2009 гг. построена новая климатология ПЦ над морями Северо-Европейского

бассейна [19]. За этот период обнаружено 637 ПЦ, рис. 8*а*. Распределение наблюдаемых ПЦ по месяцам показано на рис. 8*б*.

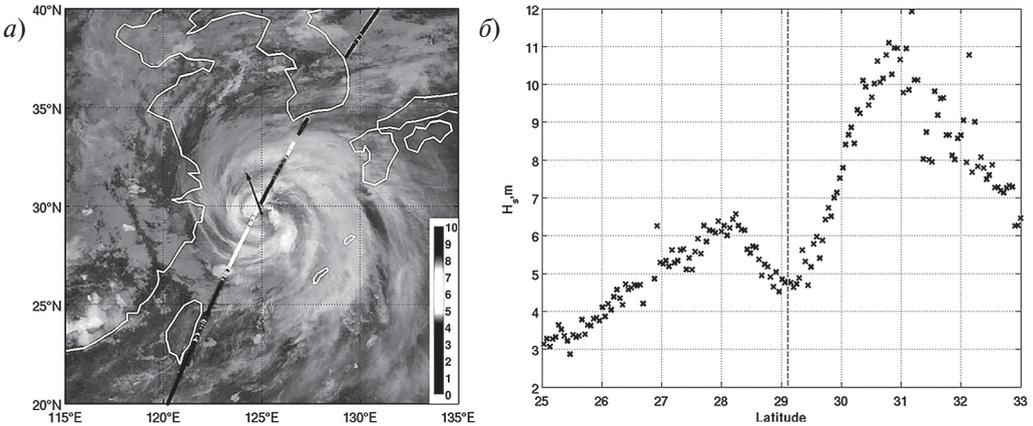


Рис. 7. *а* — инфракрасное изображение тайфуна Muifa с геостационарного спутника MTSAT-2 за 6 августа 2011 г. 12:30 UTC, стрелка в центре циклона указывает направление его движения; показан трек альтиметра, проходящий через тропический циклон в 12:19 UTC, цвет соответствует значениям высоты значимых волн по шкале, показанной в нижнем правом углу (значения в метрах);
б — значения высоты значимых волн вдоль трека альтиметра

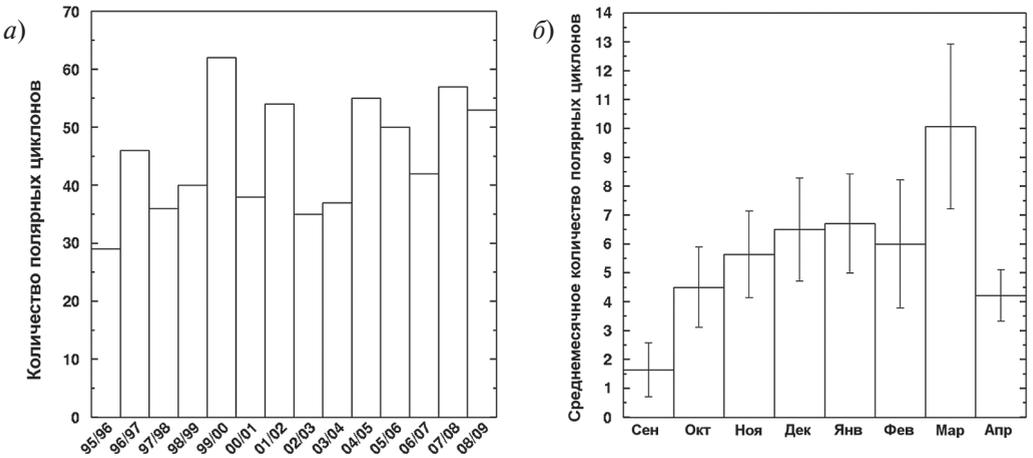


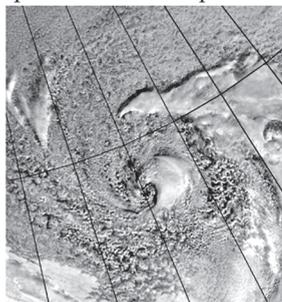
Рис. 8. Сезонное (*а*) и среднемесячное (*б*) количество обнаруженных полярных циклонов за период с 1995 по 2009 г. над морями Северо-Европейского бассейна

Анализ новых статистических данных позволил сделать вывод о существовании небольшой тенденции (2,6 %) к увеличению количества ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна. В отличие от других работ, в которых максимальное количество

ПЦ наблюдалось в январе, наши исследования показали, что максимальное количество ПЦ генерируется в марте.

Анализ спутниковых изображений облачности и восстановленных полей параметров океана и атмосферы позволил сделать вывод о возникновении новых районов распространения мезомасштабных циклонов в российских морях Арктики связи с потеплением климата и уменьшением площади ледяного покрова. Детальное рассмотрение нескольких случаев мезоциклонов позволило определить типичные условия их формирования и выявить общие закономерности развития. Восточноарктические мезоциклоны в основном образуются вблизи кромки льда или в центральной части старых окклюдированных циклонов. При благоприятных синоптических ситуациях и под влиянием орографии МЦ возникают вблизи островов и побережья материка [38]. В восточной Арктике преобладают мезоциклоны со спиральной формой облачной системы (рис. 9).

Север Восточно-Сибирского моря

Aqua MODIS
05.09.2007 00:05 UTC

Карское море

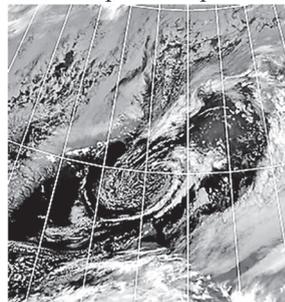
Terra MODIS
29.09.2012 08:00 UTC

Рис. 9. Примеры облачных систем мезомасштабных циклонов над восточной Арктикой

Волны в Арктике

Данные спутниковых альтиметров Envisat RA-2 и SARAL/AltiKa были применены для исследования ветрового волнения в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях за период 2002–2013 гг. Для анализа были отобраны полностью изолированные свободные ото льда области. Поиск подобных областей осуществлялся с использованием данных о концентрации льда, полученных спутниковыми микроволновыми радиометрами. Проведение анализа в изолированных свободных ото льда областях позволило рассматривать ветровое волнение без присутствия зыби. Анализ проводился в рамках теории подобия развития ветрового волнения. Высота значимых волн и площадь свободной ото льда области были масштабированы с использованием скорости ветра и ускорения свободного падения для получения безразмерных переменных. Получены зависимости безразмерных высоты значимых волн и длины волны от безразмерной площади свободной ото льда области. Проведено сопоставление полученных зависимостей с известными эмпирическими законами развития ветрового волнения при ограниченных разгонах [11].

Применение РСА для исследования суб- и мезо масштабных явлений

Уникальная возможность 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 в Арктике

На основе анализа спутниковых РСА изображений исследованы характеристики поля нелинейных внутренних волн в арктических морях России. В результате анализа было проведено районирование короткопериодных внутренних волн в арктических морях [35], выделены основные районы их генерации и распространения (рис. 10), а также очаги наблюдения крупно масштабных внутренних волн [35, 40, 12]. Результаты анализа проиллюстрированы на рис. 10, где показано, что основные зоны наблюдения внутренних волн находятся над областями континентального склона Баренцева моря в районе арх. Шпицберген и арх. Земля Франца-Иосифа, прибрежной области вдоль Кольского п-ва, в проливах Горло Белого моря и Карские Ворота, а также в глубоководных районах моря над желобом Св. Анны, Новоземельской впадиной и вблизи мыса Желания.

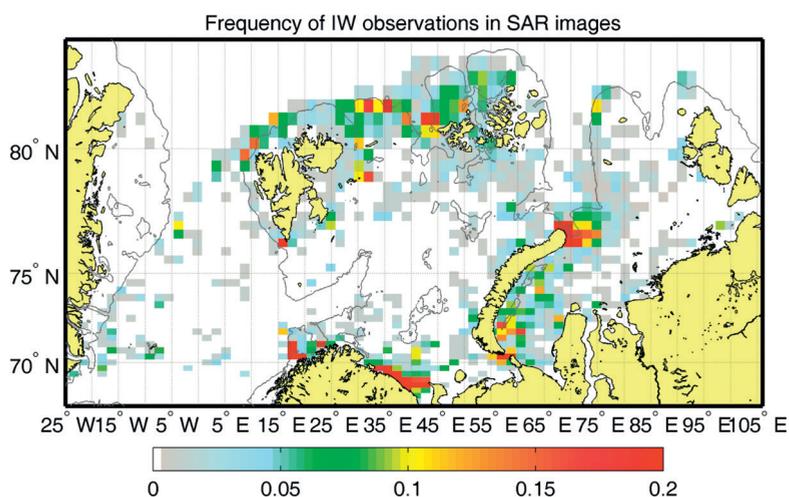


Рис. 10. Пространственное распределение частоты встречаемости пакетов внутренних волн для акватории морей Гренландского, Баренцева и Карского по данным спутниковых РСА измерений

На основе РСА наблюдений за кинематикой пакетов внутренних волн была проведена оценка «массосодержания» верхнего слоя Баренцева моря и его внутрисезонной изменчивости [35]. Сопоставление спутниковых наблюдений с результатами судовых измерений и численного моделирования выявило особенности вертикальной структуры наблюдаемых внутренних волн [34], механизмы их генерации и распространения [12, 39].

Мезомасштабные течения

Предложен новый метод анализа мульти поляризационных РСА изображений [8, 14, 25], который позволяет исследовать поле мезомасштабных течений в океане. В ходе анализа было установлено, что определяющим механизмом проявления 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. Предложенный в этих работах метод декомпозиции 4-поляризационных РСА измерений показал возможность идентификации поверхностных течений, внутренних волн и фронтальных разделов на фоне пространственно-неоднородного поля ветра (рис. 11).

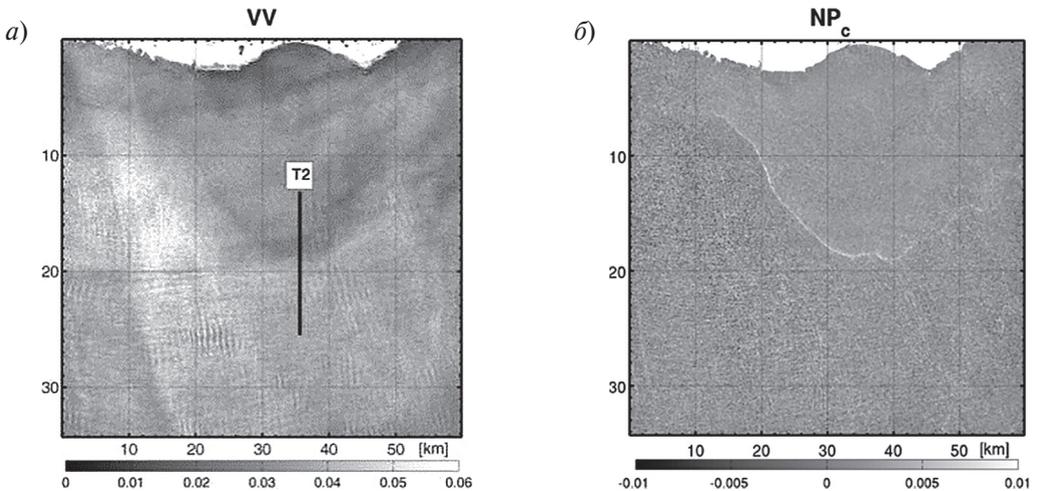


Рис. 11. РСА изображения RADARSAT-2 за 1 августа 2012 г. с проявлением структурного фронта в юго-восточной части Горла Белого моря:
a — исходное изображение на ВВ-поляризации;

б — новая компонента поля обрушений волн, обусловленная взаимодействием волн и течений и полученная в ходе применения метода декомпозиции РСА изображений [14]

Апвеллинг

РСА также является эффективным инструментом наблюдения прибрежных апвеллингов. Это продемонстрировано на примере совместного анализа спутниковых РСА и ИК изображений апвеллинга в Балтийском море [7]. Проявление прибрежного апвеллинга в спутниковых измерениях показано на рис. 12. Результаты анализа показали, что проявление фронта апвеллинга в РСА изображениях обусловлено изменением режима стратификации атмосферного погранслоя над фронтом и гашением ветровой ряби пленками поверхностно-активных веществ в зонах конвергенции поверхностных течений. Величина РЛ контрастов фронта является универсальной функцией безразмерного параметра стратификации, зависящего от перепада ТПМ через фронт и скорости ветра.

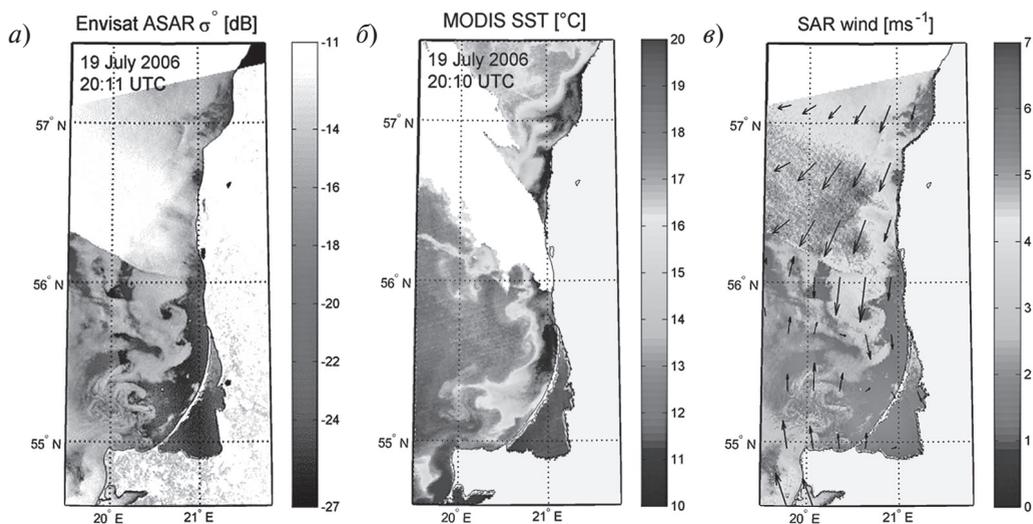


Рис. 12. Проявление прибрежного апвеллинга в спутниковых измерениях 19 июля 2006 г.: *а* — PCA изображение Envisat ASAR (20:11 UTC); *б* — поле ТПМ MODIS Terra (20:10 UTC); *в* — поле скорости приводного ветра, восстановленное по PCA изображению (*а*). Стрелками отмечено направление ветра по модели NCEP, © ESA © NASA

Синергетика РСА и оптических измерений для исследования мезомасштабной изменчивости и поверхностных загрязнений

Совместный анализ дистанционных измерений в различных спектральных диапазонах и с применением различных методов зондирования существенно расширяет информационные возможности спутниковых данных для исследования океана. В рамках проекта предложен новый подход исследования океана на основе использования оптических и радиолокационных данных. Комбинация именно этих данных обусловлено развитостью системы наблюдения Земли оптическими сканерами (например, сканеры MODIS на спутниках Terra и Aqua, радиометры AVHRR на серии спутников NOAA) и РСА системами, например, RADARSAT-2, Sentinel-1, PALSAR-2.

Основное применение оптических сканеров — изучение «цвета» океана (фитопланктона, взвеси, растворенного органического вещества) по данным измерений в видимом диапазоне и температуры поверхности океана (ТПО) по измерениям в ИК диапазоне. При этом солнечная радиация, отраженная от морской поверхности, является шумом. Однако в областях солнечного блика (составляющих около 30 % данных) отражённая радиация составляет значительную часть регистрируемого излучения, что исключает возможность применения алгоритмов восстановления «цвета» океана. В проекте разработан метод восстановления пространственных вариаций среднеквадратичного наклона (СКН) морской поверхности по солнечному блику, регистрируемому оптическими сканерами из космоса. Вариации СКН могут быть связаны с поверхностными проявлениями различных процессов, происходящих в верхнем слое океана, например, нефтяные и биологические slicks, внутренние волны, границы мезо масштабных течений и фронтальные

разделы [1, 5]. С этой точки зрения предложенный метод является дополнительным (наряду с РСА измерениями) источников измерений шероховатости поверхности.

Мезомасштабная изменчивость

Реализация подхода синергетического анализа данных, предложенного в работе [5], позволяет получить из оптических и РСА измерений следующий набор геофизических параметров:

- а) поле ТПО (по ИК измерениям);
- б) поля ветра и дрейфовых течений (по РСА);
- в) поле геострофических течений (по ТПО);
- г) поле вторичной агеострофической циркуляции, поля конвергенции и дивергенции течений (как результат взаимодействия геострофических и дрейфовых течений);
- д) поле аномалий поверхностной шероховатости (обрушения волн, СКН), трассирующее неоднородности течений (по РСА и солнечному блику);
- е) поля оптико-биологических параметров (по каналам видимого диапазона).

Результаты применения синергетического подхода на примере исследования течения мыса Игольного приведены на рис. 13, 14.

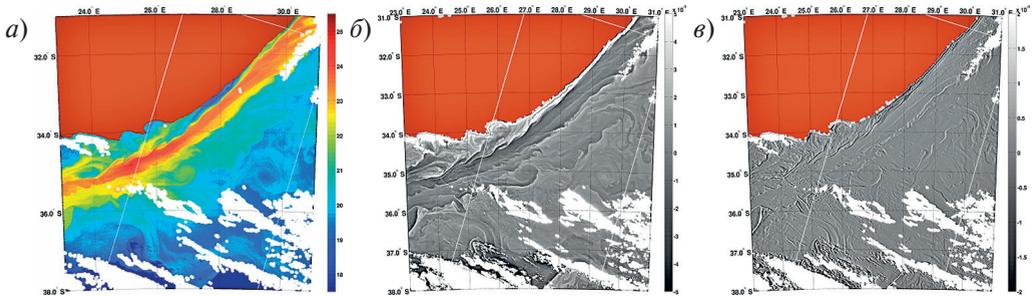


Рис. 13. Поле ТПО (а), поле завихренности геострофических течений (б), поле дивергенции течений (в).

Поле завихренности получено по полю ТПО с использованием уравнения сохранения планетарной завихренности. Дивергенция течений является результатов взаимодействия дрейфового течения с геострофическим

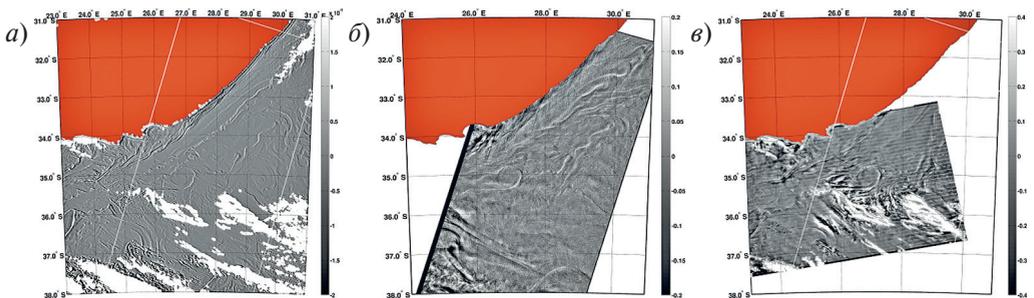


Рис. 14. Поле дивергенции (а) и поля аномалий ветрового волнения, трассирующие дивергенцию течений: обрушения волн по данным РСА (б) и СКН по данным оптического сканера (в).

Зоны конвергенции течений соответствуют ярким областям, а дивергенции — темным

В работе показано, что поля контрастов шероховатости морской поверхности (обрушений волн и СКН) совпадают в пространстве с зонами конвергенции течений, привязанных к фронтальным областям. Этот экспериментальный факт открывает новую возможность применения спутниковых измерений для идентификации зон конвергенции и дивергенции, являющихся зонами повышенной биологической продуктивности и зонами промысловых скоплений рыб.

Нефтяные загрязнения

Предложенный синергетический подход может быть также эффективно применен для мониторинга поверхностных загрязнений [1]. В качестве иллюстрации на рис. 15 приведен пример анализа поверхностных проявлений катастрофического нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе. В результате анализа обработанных спутниковых изображений показано, что предложенный метод восстановления СКН дает возможность оценить пространственное распределение поверхностных загрязнений и контрасты СКН. Совместный анализ контрастов снимков в СКН и в параметрах РСА сигнала позволяет определить физико-химические свойства поверхностной пленки, сформировавшей снимок, и определить, является этот снимок природным или имеет антропогенное происхождение.

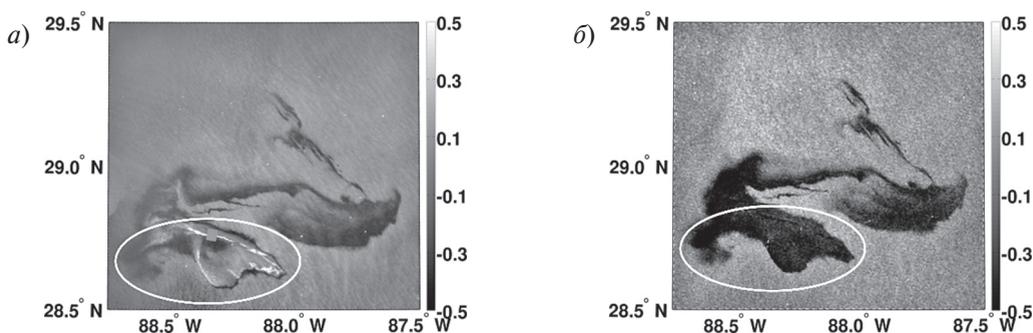


Рис. 15. Фрагмент изображений сканнера MERIS (15:56 GMT) (а) и ASAR (15:58 GMT) (б) в районе нефтяной платформы Мексиканского залива Дипвотер Хорайзон (англ. Deepwater Horizon). Изображения содержат нефтяной разлив и представлены в терминах удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) в линейных единицах и контрастов СКН

Системы распространения и анализа спутниковых данных

Работа со спутниковыми данными сопряжена с рядом проблем для пользователей, которые часто лишены возможности более широкого использования этих данных из-за больших объёмов, сложностей с доступом к данным, большого разнообразия форматов и типов данных. Создание информационной системы, обеспечивающей быстрый и удобный доступ к разнородным спутниковым продуктам, являлось одной из основных целей проекта Меггрант. Для этого в ЛСО разработан спутниковый информационный портал SATIN (<http://satin.rshu.ru>), обеспечивающий сбор, хранение и распространение данных, поступающих в online режиме из мировых центров данных,

и специализированный Арктический портал SIEWS («Storm – Ice – Oil – Watch – System», <http://arctic.solab.rshu.ru/>), являющийся инструментом мониторинга окружающей среды в Арктическом регионе на основе спутниковых данных. Ниже приводится описание этих информационных систем.

Инфраструктура

Инфраструктура системы распространения и анализа спутниковых данных состоит из следующих систем (рис. 16):

- система загрузки и хранения данных;
- система обработки данных (POSADA);
- система индексации и хранения метаданных, каталог данных (SATIN);
- API каталога;
- система мониторинга (ODYSSEY);
- арктический портал.



Рис. 16 . Инфраструктура системы распространения и анализа спутниковых данных

Спутниковый информационный портал SATIN (<http://satin.rshu.ru>)

Для поиска, получения, отображения, распространения и хранения данных дистанционного зондирования на базе программно-математического комплекса NAIAD, разработанного в центре CERSAT/IFREMER, в ЛСО РГМУ реализован спутниковый информационный портал SATIN (от англ. SATellite Data Search and Manage INformation Portal). Главная цель спутникового информационного портала SATIN — решить основные проблемы, возникающие при работе со спутниковыми данными, и предоставить пользователям быстрый и гибкий инструмент для поиска и извлечения готовых продуктов из большого числа архивов спутниковых данных, которые точно соответствуют его потребностям и интересам.

Возможности SATIN:

1. Каталог с предварительными изображениями: пользователь должен иметь возможность просматривать данные без их предварительной загрузки и обработки. Данные должны аннотироваться сопутствующей мета-информацией (номер орбиты, дата измерений и т.д.), а также ссылками на описание продукт.
2. Гибкий и интуитивный семантический поиск.
3. Загрузка отфильтрованной выборки или отдельного файла спутниковых данных через ряд различных протоколов доступа к данным: OPeNDAP, FTP, HTTP.

4. Персонализация, включая создание наборов фильтров, ведения истории поиска.
5. Помимо всего, будет присутствовать социальная составляющая: комментарии пользователей, тэги, избранные и популярные спутниковые снимки.
6. Предъявляются требования к мультиязычности: поддержка русского и английского языков с возможностью добавления новых локализаций.

Арктический портал

Арктический портал SIOWS («Storm – Ice – Oil – Watch – System», <http://arctic.solab.rshu.ru/>) — проект, нацеленный на удобное представление и агрегацию различных спутниковых данных (а также данных *in situ* и моделей) об Арктическом регионе (рис. 17). Ключевой особенностью данного проекта является возможность синергетического анализа на основе продуктов, представленных на портале.

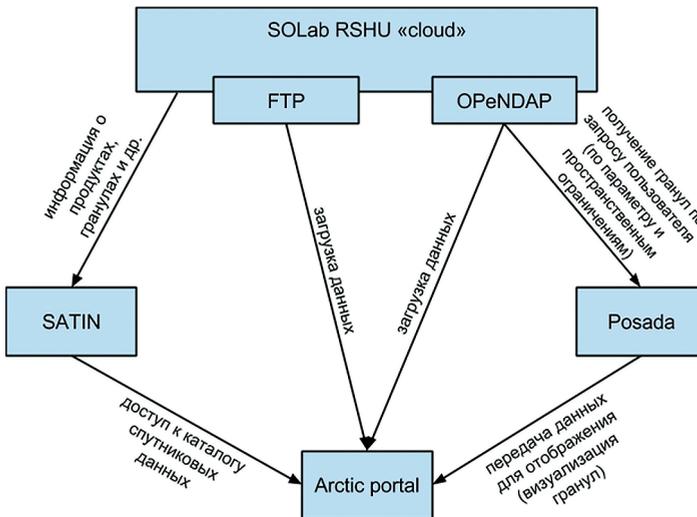


Рис. 17. Взаимодействие Арктического портала с основными модулями системы распространения и анализа спутниковых данных

Основные функции Арктического портала:

- выбор слоёв с регулируемой прозрачностью и доступностью в зависимости от уровня масштабирования. Слоями могут быть: навигационные карты, морские радары, карты нефтеразливов и льда, местоположения судов по данным радаров с синтезированной апертурой (PCA), таких как RS2 и Cosmo SkyMed и Автоматической идентификационной системы, а также огромное количество другой вспомогательной спутниковой и метеорологической информации (температура поверхности океана, облачность и др.);
- интерактивные элементы для доступа к детализированной информации (покрытие спутниковыми данными, карты судов, нефтяных разливов, льда, *in situ* измерений и др.);

— возможность доступа к архивным данным, для визуализации прошлых ситуаций. Арктический портал располагается по адресу <http://arctic.solab.rshu.ru/>. Некоторые из представленных на портале данных являются продуктами работы алгоритмов, разработанных в ЛСО, а именно: восстановленные по данным оптических сканеров MODIS и MERIS контрасты среднеквадратичного наклона (на англ. MSS).

Основные публикации ЛСО по проекту:

Статьи, входящие в базу данных Web of Science и SCOPUS

1. Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B., Johannessen J., Collard F. Joint sun-glitter and radar imagery of surface slicks. // *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 120, pp. 123–132.
2. Hansen M.W., Kudryavtsev V., Chapron B., Johannessen J., Collard F., Dagestad K.-F., Mouche A. Simulation of radar backscatter and Doppler shifts of wave-current interaction in the presence of strong tidal current. // *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 120, pp. 113–122.
3. Grodsky S.A., Reul N., Reverdin G., Carton J.A., Chapron B., Quilfen Y., Kudryavtsev V. N., Lagerloef G. Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations. // *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L20603. — DOI:10.1029/2012GL053335.
4. Grodsky S., Kudryavtsev V., Bentamy A., Carton J., Chapron B. Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? // *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L12602. — DOI:10.1029/2012GL052091.
5. Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B., Johannessen J., Collard F. Imaging meso-scale upper ocean dynamics using SAR and optical data. // *Journal of Geophysical Research*, 2012, vol. 117, C04029. — DOI:10.1029/2011JC007492.
6. Kozlov I., Dailidienė I., Korosov A., Klemas V., Mingélaite T. MODIS-based sea surface temperature of the Baltic Sea Curonian Lagoon. // *Journal of Marine Systems*, 2012, vol. 129, pp. 157–165.
7. Kozlov I., V. Kudryavtsev, Johannessen J., Chapron B., Dailidienė I., Myasoedov A. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea. // *J. Adv. Space Res.*, 2012, vol. 50, iss. 8, pp. 1125–1137.
8. Kudryavtsev V., Chapron B., Myasoedov A., Collard F., Johannessen J. On dual co-polarized SAR measurements of the Ocean surface. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, vol. 10, iss. 4, pp. 761–765.
9. Yurovskaya M. Yu., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N. Directional Short Wind Wave Spectra Derived from the Sea Surface Photography. // *Journal of Geophysical Research*, 2013, vol. 118, p. 1–15.
10. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing. // *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, iss. 13, pp. 3347–3350.
11. Golubkin P.A., Chapron B., Kudryavtsev V. N. Wind waves in the Arctic seas: Envisat and AltiKa data analysis. // *Marine Geodesy*, 2014. — DOI:10.1080/01490419.2014.990592.
12. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea. // *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 147, pp. 99–107.
13. Kudryavtsev V., Chapron B., Makin V. Impact of wind waves on the air-sea fluxes: A coupled model. // *Journal of Geophysical Research*, 2014, vol. 119, pp. 1217–1236.
14. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J.A. Quad-polarization SAR features of ocean currents. // *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, vol. 119, iss. 9, pp. 6046–6065.
15. Reul N., Quilfen Y., Chapron B., Fournier S., Kudryavtsev V., Sabia R. Multi-Sensor Observations of the Amazon-Orinoco River Plume Interactions with Hurricanes. // *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2014, vol. 119, iss. 12, pp. 8271–8295.
16. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. An updated geophysical model for AMSR-E and SSMIS brightness temperature simulations over oceans. // *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 147, pp. 2317–2342.
17. Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B. GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-A ASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic. // *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 147, pp. 89–98.
18. Skrunes S., Brekke C., Eltoft T., Kudryavtsev V. Comparing Near Coincident C- and X-band SAR Acquisitions of Marine Oil Spills. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, vol. 53, iss. 4, pp. 1958–1975.
19. Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data. // *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, iss. 13, pp. 5603–5609.

20. *Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Reul N., Chapron B.* New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1 AMSR2. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, 2015, iss. 99, pp. 1–14.
21. *Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B.* Radio frequency interference identification over oceans for C and X band AMSR2 channels. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters (GRSL)*, 2015, vol. 12, iss. 8, pp. 1705–1709.
22. *Zabolotskikh E.V., Chapron B.* Validation of the new algorithm for rain rate retrieval from AMSR2 data using TMI rain rate product. // *Advances in Meteorology*, 2015, vol. 2015, pp. 1–12.
23. *Zweers N., Makin V., de Vries H., Kudryavtsev V.* The Impact of Spray-Mediated Enhanced Enthalpy and Reduced Drag Coefficients in the Modelling of Tropical Cyclones. // *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, vol. 155, iss. 3, pp. 501–514.
24. *Чечин Д.Г., Заболотских Е.В., Репина И.А., Шапрон Б.* Влияние бароклинности в атмосферном пограничном слое и экмановского трения на приземную скорость ветра во время холодных вторжений в Арктике. // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, 2015, т. 51, № 2, с. 146–157.
25. *Kudryavtsev V., Golubkin P., Chapron B.* A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events. // *Journal of Geophysical Research*, 2015, vol. 120. — DOI:10.1002/2015JC011284.
26. *Hansen M., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J.* Wave breaking in slicks: impacts on C-band quad-polarized SAR measurements. // *IEEE, Geoscience and Remote Sensing letters*, 2015.
27. *Монзикова А., Кудряцев В., Мясоедов А., Шапрон Б., Зилитинкевич С.* Об особенностях поля ветра над морской поверхностью в прибрежной зоне. // *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*, 2015.

Статьи, опубликованные в журналах из списка ВАК:

28. *Зимин А.В., Родионов А.А., Шапрон Б., Романенков Д.А., Здорovenнов Р.Э., Козлов И.Е., Мясоедов А.Г., Шевчук О.И.* Работы с научно-исследовательского судна «Эколог» по проекту «МЕГАГРАНТ» в Белом море, выполненные в июле-августе 2012 г. // *Учёные записки РГГМУ*, 2012, № 26, с. 281–285.
29. *Голубкин П.А., Заболотских Е.В., Шапрон Б., Кудряцев В.Н.* О следах тропических циклонов в полях температуры поверхности океана по спутниковым данным. // *Учёные записки РГГМУ*, 2013, № 32, с. 107–113.
30. *Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б., Анискина О.Г., Дикинис А.В., Смирнова Ю.Е.* Валидация модели переноса излучения на частотах микроволновых радиометров SSMIS и AMSR-E и её применение при анализе морских погодных систем с использованием усовершенствованных алгоритмов. // *Учёные записки РГГМУ*, 2013, № 29, с. 146–160.
31. *Заболотских Е.В., Митник Л.М., Шапрон Б., Анискина О.Г., Смирнова Ю.Е., Дикинис А.В.* Улучшенные модели поглощения атмосферы и излучения океана в диапазоне 5–100 ГГц для расчёта яркостных температур системы океан-атмосфера. // *Учёные записки РГГМУ*, 2013, № 29, с. 169–182.
32. *Монзикова А.К., Кудряцев В.Н., Ларсен Сорен Е., Шапрон Б.* Оценка ветроэнергетического потенциала Финского залива. // *Учёные записки РГГМУ*, 2013, № 30, с. 116–133.
33. *Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В.* Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2013, т. 10, № 3, с. 135–141.
34. *Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф.* Короткопериодные внутренние волны в Белом море: Оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // *Исследование Земли из космоса*, 2014, № 3, с. 41–55.
35. *Козлов И.Е., Кудряцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г.* Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2014, т. 11, № 4, с. 338–345.
36. *Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В., Козлов И.Е., Шапрон Б.* Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2014, т. 7, № 3, с. 29–41.
37. *Голубкин П.А., Кудряцев В.Н., Шапрон Б.* Поле ветрового волнения в Арктике по данным спутниковой альтиметрии. // *Исследование Земли из космоса*, 2015, № 4, с. 25–29.
38. *Заболотских Е. В., Гурвич И.А., Шапрон Б.* Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледяного покрова. // *Исследование Земли из космоса*, 2015, № 2, с. 64–77.

39. *Зимин А.В., Козлов И.Е., Атаджанова О.А., Шапрон Б.* Мониторинг короткопериодных внутренних волн в Белом море. // Исследование Земли из космоса, 2015 № 5, с. 51–61.
40. *Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Зимин А.В., Шапрон Б.* Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений. // Исследование Земли из космоса, 2015, № 4, с. 44–59.
41. *Муртазин А.Ф., Евграфова К.Г., Кудрявцев В.Н.* Применение данных скаттерометра ASCAT для исследования ледового покрова в Арктике. // Учёные записки РГГМУ, 2015, № 40, с. 160–173.
42. *Анискина О.Г., Заболотских Е.В., Шапрон Б.* Моделирование эволюции полярных циклонов с использованием данных спутниковой микроволновой радиометрии. // Исследование Земли из космоса, 2015, № 6.

Заключение

Проект финансировался Правительством РФ в рамках программы государственной поддержки научных исследований, проводимых в российских университетах под руководством приглашенных ученых мирового уровня. В результате реализации проекта Мегагрант в РГГМУ создана Лаборатория спутниковой океанографии, представляющей коллектив молодых ученых и программистов, работающих на высоком современном уровне. Успех деятельности Лаборатории подтвержден многочисленными публикациями в ведущих зарубежных и российских журналах, входящих в базу данных Web of Science, Scopus, РИНЦ, которые приведены в списке статей Лаборатории выше. Основная идея выделения Мегагрантов Правительством РФ состояла в том, что после окончания проекта созданная за счет Мегагранта Лаборатория должна осуществлять «самостоятельное» функционирование, привлекая необходимое финансирование за счет участия в различных научных и коммерческих проектах. На данный момент лаборатория спутниковой океанографии, участвуя в различных конкурсах (РФФИ, ФЦП МинОбрНауки, РНФ) и заключая договора с другими организациями, обеспечила финансовую стабильность своего функционирования после окончания проекта (2015) на период до 2018 г., в полном соответствии с идеей и целью Правительства РФ о выделении мегагрантов учебным учреждениям.