

**Тема ОКЕАН.** Физические основы космического дистанционного зондирования поверхности Океана в микроволновом диапазоне. Гос. Регистрация № 0120.0 602987

Научный руководитель темы: д.ф.-м.н., профессор Е.А. Шарков.

**Особенности генерации и распространения внутренних волн в морях без приливов, выявленные на основе использования комплексной спутниковой информации**

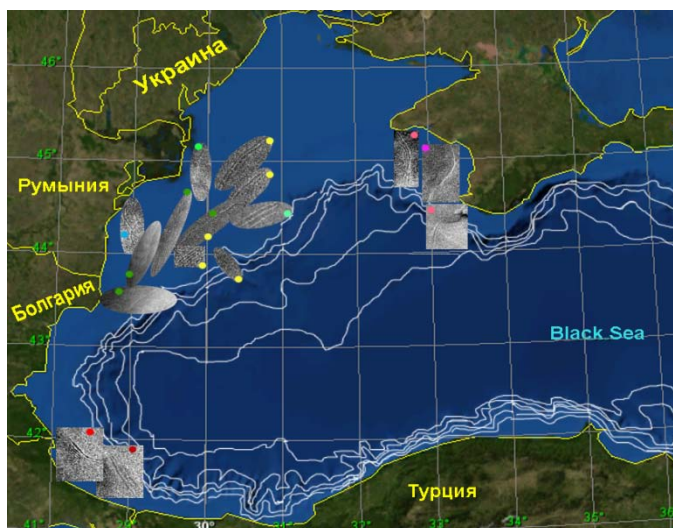
Обобщены результаты исследований особенностей генерации и распространения внутренних волн (ВВ) неприливногo происхождения, полученные в ходе регулярных наблюдений поверхности Черного, Каспийского и Балтийского морей в микроволновом, видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли.

Экспериментальную основу исследования составили радиолокационные изображения (РЛИ) морской поверхности, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на ИСЗ Envisat и ERS-2. Кроме того для интерпретации РЛИ привлекались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA оптического и инфракрасного диапазонов, несущие информацию о полях температуры морской поверхности и мезомасштабной динамике вод. При мониторинге Каспийского моря дополнительно использовались данные сканирующего радиометра ЕТМ+ ИСЗ Landsat 7. Всего за время наблюдений было получено и обработано более 1000 спутниковых изображений морской поверхности районов интереса. Большой объем экспериментального материала обеспечил статистическую обоснованность результатов исследований. Составлены карты пространственного распределения ВВ неприливногo происхождения, выявленных по радиолокационным данным в северо-восточной и западных частях Черного моря и в центральной части Каспийского моря за период наблюдения, и локализованы районы их зарождения и распространения. По спутниковым данным определены основные пространственно-временные характеристики ВВ неприливногo происхождения, выявленных из данных дистанционного зондирования, такие как длина волны, количество цугов и количество волн в цуге, направление распространения, рефракция, длина видимого фронта волны и его ориентация.

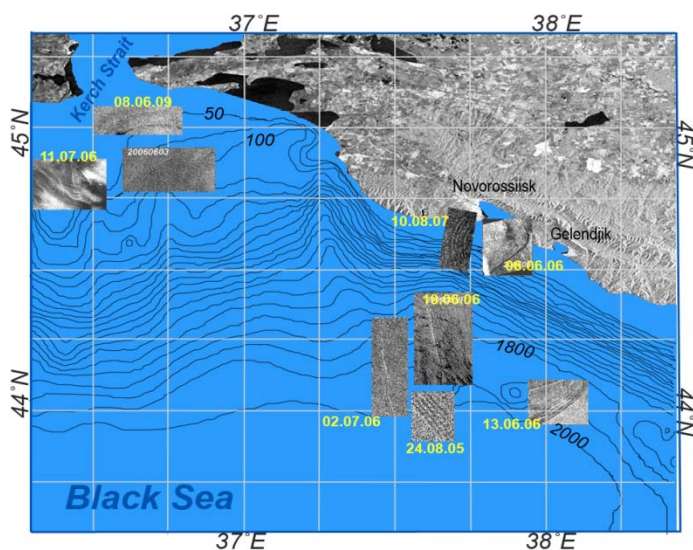
Отмечено наличие значительной сезонной и межгодовой изменчивости как волновой активности, так и ее проявлений в РЛИ морской поверхности. Подтверждена связь между встречаемостью поверхностных проявлений пакетов внутренних волн в радиолокационных изображениях и положением слоя скачка плотности.

Комплексное использование данных различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и ширине полосы съемки дало уникальную возможность восстановить целостную картину метеорологических и гидродинамических явлений и процессов в районах наблюдений, определить возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых внутренних волн неприливногo происхождения и сделать предположения о соответствующих механизмах генерации. Показано, что ВВ бесприливных морях менее интенсивны, чем ВВ, возбуждаемые приливыми течениями на океаническом шельфе, но отличаются разнообразием источников их возбуждения. Зарождение внутренних волн в морях без приливов может быть обусловлено возникновением и релаксацией прибрежного апвеллинга, движением и эволюцией вихрей и диполей различных масштабов, сгонно-нагонными явлениями, осцилляциями гидрологических фронтов, пульсациями ветра, сейшами и пр.

Проведенные нами работы показали, что спутниковое радиолокационное зондирование морской поверхности является действенным средством наблюдения и изучения не только приливных внутренних волн в океане, но и внутренних волн во внутренних морях без приливов, существенно образом отличающихся по своим физико-географическим признакам, по структуре основных течений, по особенностям гидрологического режима и формирования сезонного термоклина, по направлению главенствующих ветров и состоянию приводного слоя атмосферы.



Обобщенная карта-схема распределения ВВ, выявленных по данным спутниковой радиолокации в западном секторе Черного моря



Обобщенная карта-схема распределения ВВ, выявленных по данным спутниковой радиолокации в западном секторе Черного моря

*Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 1. С. 260–272.

*Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-Sensor Survey of Seasonal Variability in Coastal Eddy and Internal Wave Signatures in the North-Eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing, 2010. V. 17. P. 4779–4790.

*Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. (В печати.)

*Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. Акад. наук. 2011. Т. 436. № 3. (В печати.)

*Mityagina M., Lavrova O.* Comparative Analysis of Internal Waves Surface Manifestations Observed by Envisat ASAR in Different Non-Tidal Seas // ESA Living Planet Symp. ESA Special Publication SP-686. 2010. 6 p.

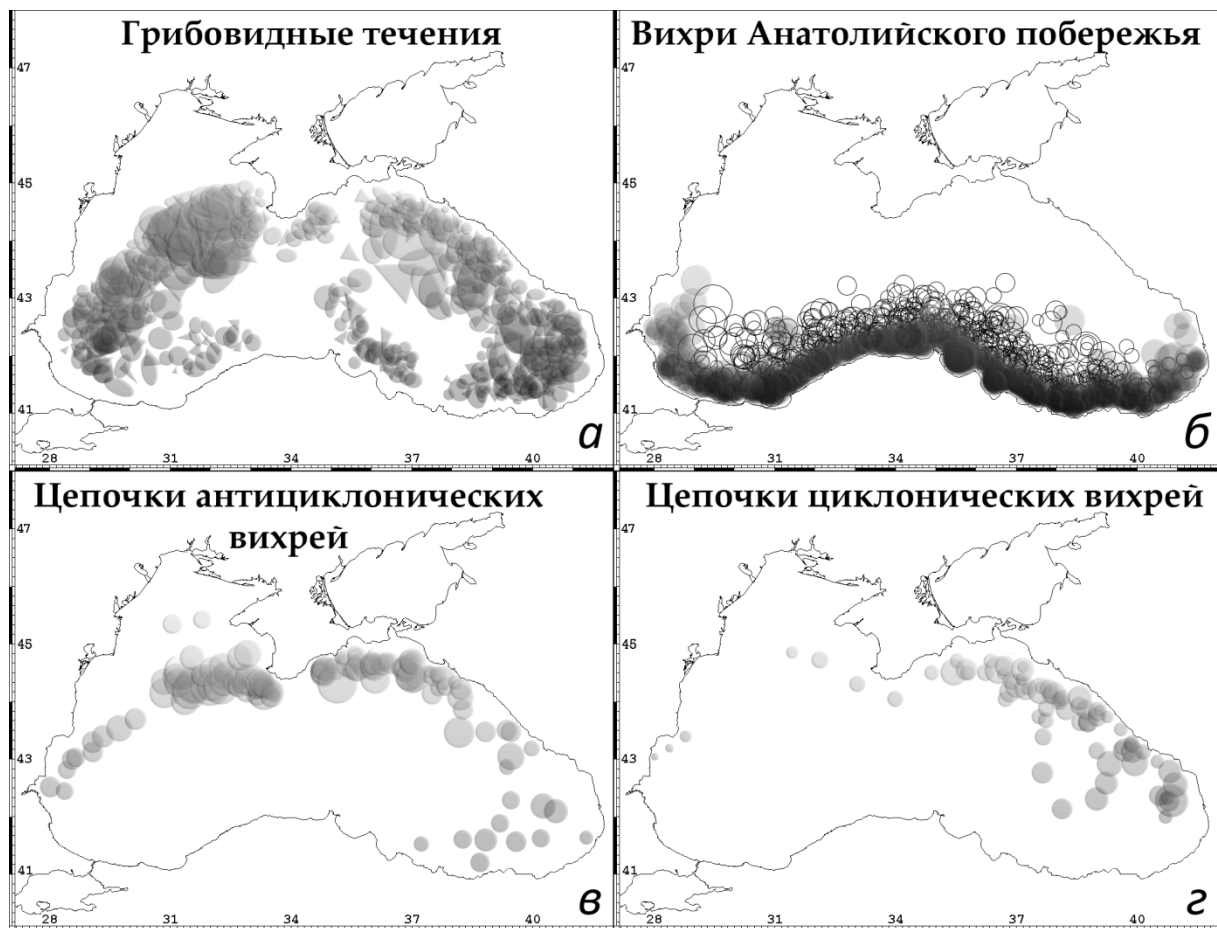
*Lavrova O., Mityagina M., Sabinin K.* Seiches and Internal Waves in the Caspian Sea // Proc. 3<sup>rd</sup> Intern. Workshop SeaSAR 2010. 25–29 Jan. 2010. ESRIN, Frascati, Italy. / Ed. ESA. V. ESA-SP-679. 6 p.

*Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Пространственно-временная изменчивость поверхностных проявлений внутренних волн неприливной природы в различных морях // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 216.

**Митягина М.И.**, канд. физ.-мат. наук, [mityag@iki.rssi.ru](mailto:mityag@iki.rssi.ru), **Лаврова О.Ю.**, канд. физ.-мат. наук, [olavrova@iki.rssi.ru](mailto:olavrova@iki.rssi.ru), **Сабинин К.Д.**, д-р физ.-мат. наук, [ksabinin@vandex.ru](mailto:ksabinin@vandex.ru), **Серебряный А.Н.** д-р физ.-мат. наук, [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com), отд. № 55

### **Исследование мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых структур Черного и Балтийского морей по спутниковым радиометрическим и радиолокационным данным**

Для изучения мезомасштабных вихрей Черного моря были использованы спутниковые изображения, полученные сенсорами AVHRR NOAA (конечный продукт — температура поверхности моря) и Aqua MODIS (нормализованная яркость восходящего излучения для длины волны 551 нм и концентрация *хлорофилла-а*) в период с сентября 2004 по декабрь 2009 г. Общее количество проанализированных изображений около 5500. Пространственное разрешение этих изображений около 1 км, временное — порядка нескольких часов. Особое внимание уделялось нестационарным вихревым элементам циркуляции. Для каждого класса: прибрежные антициклонические вихри, грибовидные течения, цепочки вихрей и вихри Анатолийского побережья были построены обобщенные схемы пространственного распределения всех обнаруженных вихревых структур (рис. 1): грибовидных течений (*а*), вихрей Анатолийского побережья (*б*), цепочек антициклонических (*в*) и циклонических (*г*) вихрей. Более темные области на этих схемах соответствуют более частому проявлению вихрей. Было выявлено, что большинство обнаруженных вихревых структур относится к зоне Основного черноморского течения.



Обобщенные схемы различных типов нестационарных вихрей, детектированных за период сент. 2004 — дек. 2009: *а* — грибовидные течения; *б* — вихри Анатолийского побережья; *в* — цепочки антициклонических вихрей; *z* — цепочки циклонических вихрей

Проведенный анализ межгодовой и сезонной изменчивости показал, что для преобладающего числа типов нестационарных вихревых структур сезон с наибольшей активностью их образования — это гидрологическая весна (период с апреля по июнь). В межгодовом разрезе с этой точки зрения выделяется 2008 г.

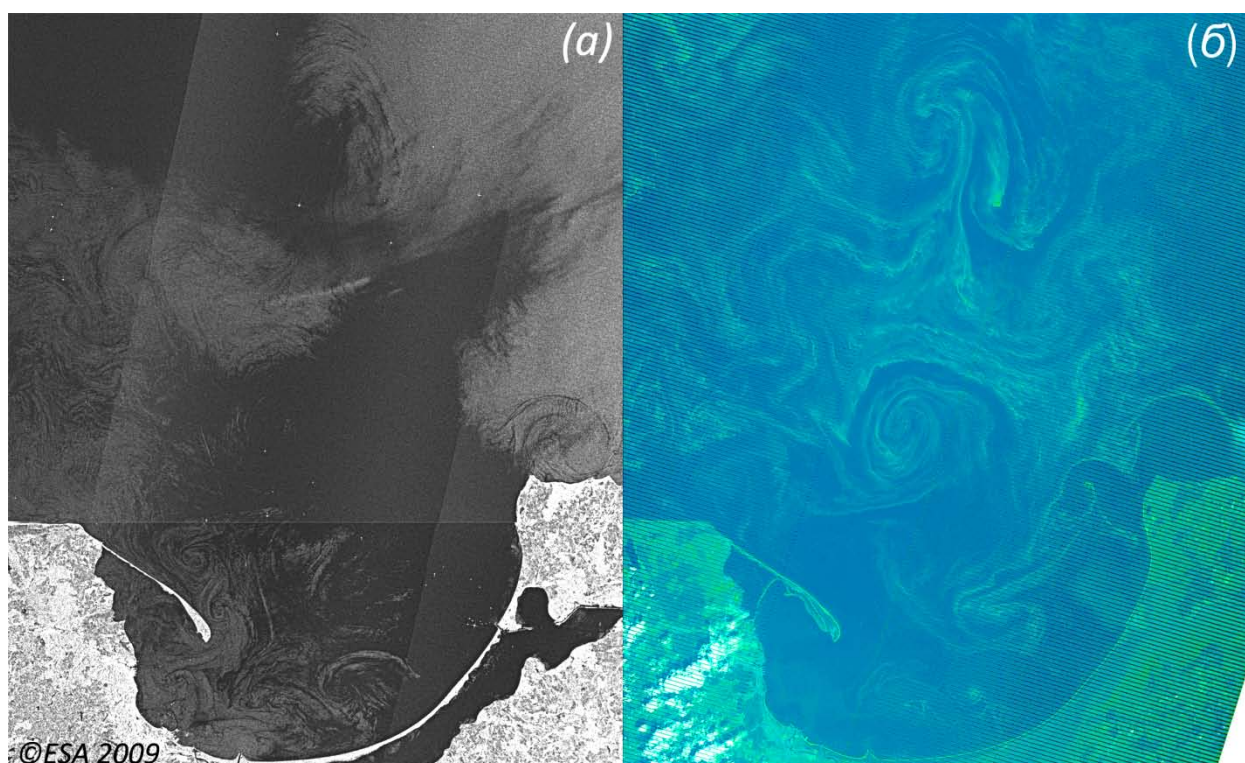
Проведено исследование механизмов проявления мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых элементов поверхностных течений Балтийского моря на спутниковых изображениях, различных по физической природе и пространственному разрешению. Исследование основывалось на радиолокационных изображениях (РЛИ) высокого разрешения Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в 2008–2009 гг. для различных участков акватории Балтийского моря, при использовании радиометрических изображений видимого спектра Envisat MERIS и Landsat ETM+.

В результате совместного анализа указанных данных выявлены особенности проявления на спутниковых изображениях вихревых структур с учетом изменчивости оптических характеристик поверхностных вод Балтийского моря во время летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения диатомовых водорослей.

В частности, было установлено, что во время летнего цветения сине-зеленых водорослей спутниковые изображения, синтезированные в естественных цветах, становятся особенно информативными в плане отображения ими особенностей поверхностной циркуляции вод вследствие наличия близ водной поверхности огромного количества агрегатов клеток водорослей, которые выступают в качестве трассеров течений. В такие периоды в пределах акваторий, охваченных цветением, на изображениях оптического диапазона наблюдаются очень плотно упакованные вихревые структуры широкого пространственного спектра — с диаметром от 2 до примерно 40 км.

Сравнительный анализ таких изображений с квазисинхронными РЛИ показал, что вихревые картины поверхностной циркуляции вод, выявленные по данным РЛИ и по оптическим данным, находятся в удивительно хорошем соответствии, несмотря на различия в пространственном разрешении и принципах построения этих типов изображений. Во время весеннего цветения диатомовых водорослей увеличений мутности воды, достаточных для визуализации циркуляционных структур, отмечено не было.

Другой важной задачей являлось выявление источников поверхностных пленок, благодаря которым происходит проявление гидродинамических структур на РЛИ. Отмеченные в результате проведенных наблюдений случаи несоответствия в проявлении одних и тех же структур на РЛИ и на радиометрических изображениях позволили сделать вывод о том, что поверхностные агрегации цианобактерий не могут служить непосредственным источником таких пленок. Таким образом, можно заключить, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.



Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря на полученных квазисинхронно спутниковых изображениях различной природы: *a* — Envisat ASAR 17.07.2009 г. 09:01 GMT; *б* — цветосинтезированное изображение Landsat ETM+ 17.07.2009 г. 09:33 GMT (каналы 3, 2, 1)

*Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.* Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. (В печати.)

*Lavrova O., Karimova S., Mityagina M.* Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data // Proc. 3<sup>rd</sup> Intern. Workshop SeaSAR-2010. Jan. 25–29, 2010. ESRIN, Frascati, Italy / Ed. ESA. 2010. V. ESA-SP-679. 5 p.

*Karimova S.* Eddies in the Black Sea and their Contribution to Bioproductivity as Seen by Satellite Remote Sensing // Proc. PORSEC 2010. Oct. 18–23, 2010. NTOU, Keelung, Taiwan. P. 29.

*Karimova S.* Eddy Activity in the Black Sea by Satellite Visible, Infrared and Radar Data // Proc. 39th COSPAR Scientific Assembly. 18–25 July, 2010.

*Lavrova O.* Eddies and Eddy Dipoles on SAR and Optical Images // Abstr. Taiwan-Russia Joint Symp. “Remote Sensing of Physical and Biological Processes: Application for Waters Around Taiwan”. Oct. 14–17, 2010. Keelung, Taiwan.

## **Микроволновые исследования нелинейной динамики морских волн. Модернизация комплекса радиолокационной станции**

Закончено создание и успешно проведены натурные испытания комплекса радиофизических приборов, целью которого является проведение, с высоким пространственным разрешением (до 1 м) и малым временем накопления, синхронной скаттерометрической, радиометрической и видеосъемки морской поверхности. Комплекс предназначен для наблюдения тонкой структуры морского волнения и исследования особенностей рассеяния микроволнового излучения на настильных углах зондирования.

Разработана методика измерений морской поверхности и пакет программ для обработки данных, полученных новым комплексом.

Натурные эксперименты по синхронным радио-видео-наблюдениям при различных условиях морского волнения были проведены в сентябре – октябре 2010 г. на базе Южного отделения Института океанологии РАН. Получен большой объём экспериментальных данных, выполнена предварительная обработка и в настоящее время производится тематическая обработка полученных данных.

Продолжены поиски и исследования новых критериев учёта вклада небрэгговского рассеяния волн промежуточных масштабов (3 м и менее) для адекватного описания обратного рассеяния электромагнитных волн на настильных углах. Было показано, что одним из таких критериев могут служить явные различия в характере, полученных в ходе натурных экспериментов, динамических характеристик рассеивателей (распределения по скоростям и «времени жизни»), проявившихся при разных поляризациях и метеоусловиях.

Скворцов Е.И., канд. физ.-мат. наук, [jskvor@iki.rssi.ru](mailto:jskvor@iki.rssi.ru), Раев М.Д., [mraev@iki.rssi.ru](mailto:mraev@iki.rssi.ru), канд. физ.-мат. наук, отд. № 55, Косов А.С., д-р физ.-мат. наук, отд. № 61

### **Микроволновая диагностика состояния морской поверхности, возмущаемой подводным потоком газовой мелкодисперсной среды. Подготовка и проведение лабораторных и натурных экспериментов: оформление договора с ЮО ИО РАН; проведение лабораторных и натурных исследований с поверхностными плёнками, образующимися в результате выноса потока пузырьков газа**

Для повышения точности измерений биофизических характеристик плёнок фитопланктона создана и испытана лабораторная установка, позволяющая методом капиллярной ряби определять коэффициент поверхностного натяжения (в диапазоне 50–80 мН/м) и коэффициент затухания в плёнках на водной поверхности. Разработана специализированная программа, позволяющая по изображениям поверхностной волны, сформированной волнопродуктором, определить профиль стоячей волны и методом минимизации среднеквадратичного отклонения вычислить её основные характеристики — амплитуду, длину волны и затухание. Применение подобной программы позволило достигнуть точности измерений поверхностного натяжения не хуже 0,5 %.

Продолжены лабораторные модельные радиофизические исследования, направленные на определения связи параметров собственного и рассеянного микроволнового излучения (радиолокационных и радиометрических контрастов, доплеровских спектров) с биофизическими характеристиками поверхностной плёнки, образованной микроводорослями фитопланктона (концентрация биомассы, её видовой состав, поверхностное натяжение).

Продолжены исследования динамики образования, развития и распада плёнки фитопланктона на морской поверхности под действием всплывающих мелкодисперсных газовых пузырьков и после прекращения их воздействия.

В результате экспериментов были показано:

1. Минимальная концентрация биомассы, вызывающая гашение капиллярных волн и приводящая к формированию минимально различимого радиолокационного контраста в наших экспериментах составила 0,01–0,12 мгС/л.

2. Предельная величина биомассы клеток, выше которой не наблюдалось изменение контраста, лежала в пределах 0,16–0,2 мгС/л. При этом величина контраста составляла 8–10 дБ.

3. Подводный поток мелких газовых пузырьков увеличивает концентрацию клеток фитопланктона в приповерхностном слое воды, что в свою очередь приводит к заметному гашению капиллярных волн на поверхности и изменению характеристик отражённых сигналов. При этом динамика образования и развития плёнки зависит от видового состава, структуры биомассы, концентрации и распределения по размерам воздушных микропузырьков.

4. В присутствии в водном объёме микропузырьков изменение коэффициента поверхностного натяжения при увеличении биомассы до 0,2 мгС/л достигало 10 %.

5. Установлено, что при отсутствии микропузырьков внесение культуры фитопланктона непосредственно на водную поверхность приводило к изменению коэффициента поверхностного натяжения не более чем на 3–5 %. Этот факт свидетельствует, по-видимому, что в гашении капиллярных волн принимают участие не только микроводоросли фитопланктона, но и «приклеившиеся» к поверхности неразрушившиеся микропузырьки.

Исследования проводились на полигоне Южного отделения Института океанологии РАН, договор на выполнение НИР: «Проведение исследований гидрометеорологических и гидрофизических характеристик полигона для обеспечения дистанционных радиофизических экспериментов комплексной экспедиции 2010 г.» от 1.08.2010 г.

*Скворцов Е.И., Раев М.Д., Булатов М.Г., Шарков Е.А., Лаврова О.Ю., Силкин В.А.* Радиофизические микроволновые исследования образования скоплений фитопланктона на морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 35–40.

*Скворцов Е.И., Раев М.Д., Силкин В.А.* Радиофизические дистанционные наблюдения эволюции плёнки фитопланктона, образованной потоком всплывающих газовых пузырьков // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 3. С. 191–196.

**Скворцов Е.И.,** канд. физ.-мат. наук, [jskvor@iki.rssi.ru](mailto:jskvor@iki.rssi.ru), **Раев М.Д.,** канд. физ.-мат. наук, [mraev@iki.rssi.ru](mailto:mraev@iki.rssi.ru), **Беляков Г.И., Комарова Н.Ю.,** отд. № 55

### **Теоретические, экспериментальные и лабораторные исследования морской поверхности с помощью микроволновой радиометрии**

В рамках выполнения работ по данному направлению проведена комплексная обработка и анализ данных натурных международных экспериментов CAPMOS'05 (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring), CAPMOS'07 и натурных экспериментов 2009 г. на морской гидрофизической платформе Кацивели. Важным направлением экспериментов являлась проверка на практике методики восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярного волнения (ГКВ) с помощью метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРПС) на основе угловых измерений яркостной температуры морской поверхности.

Три серии экспериментов были проведены в июне 2005, августе 2009 и октябре 2010 г. на полигоне Экспериментального отделения Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины вблизи п. Кацивели у южного побережья Крыма. На этом полигоне расположена океанографическая платформа, которая

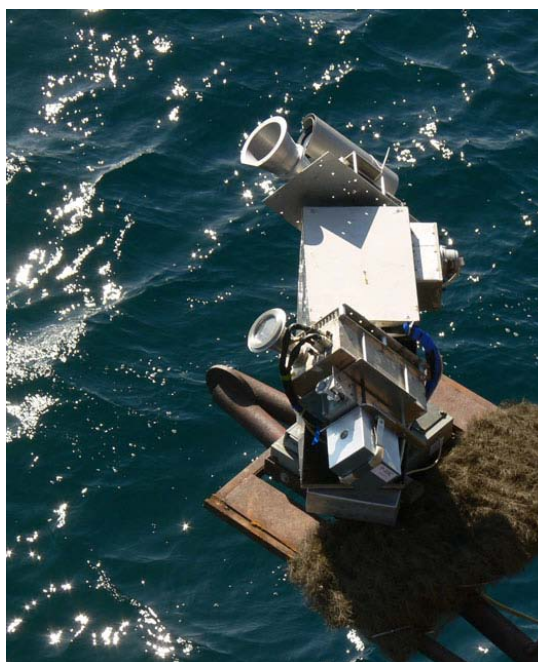
была установленная в 1980 г. для проведения комплексных гидрофизических экспериментов и подспутниковых измерений и в настоящее время являющаяся единственной действующей научно-исследовательской платформой на территории бывшего СССР. Платформа (рис. 1) имеет несколько рабочих уровней. На нижней палубе на высоте 4 м над морской поверхностью размещается научная аппаратура. На основной палубе площадью 2825 м на высоте 12 м над поверхностью расположены научные лаборатории, жилые каюты и прочие бытовые и служебные помещения.



**Рис. 1.** Океанографическая платформа ЭО МГИ НАНУ, расположенная у южной оконечности п-ова Крым



**Рис. 2.** Радиометрический сканирующий комплекс «Траверс», вид с верхней палубы



**Рис. 3.** Радиометрический сканирующий комплекс «Траверс»



**Рис. 4.** Метеорологический комплекс для измерения трех компонент скорости ветра с помощью акустических анемометров

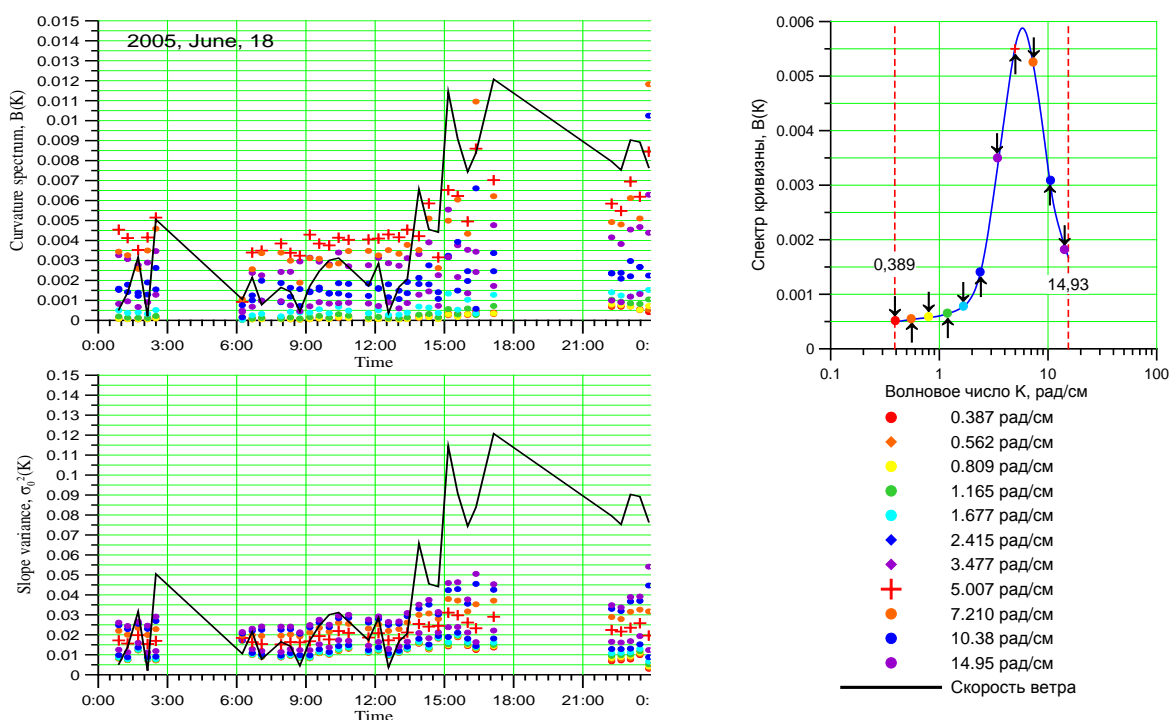
В состав научной аппаратуры, задействованной в экспериментах, входил многочастотный радиометрический комплекс «Траверс» (рис. 2 и 3) и аппаратура для контактных гидрометеорологических измерений. Характеристики волнения измерялись струнным волнографом, температура воды на глубине 1 м измерялась термисторным датчиком. Температура и соленость воды в поверхностном слое измерялась STD-зондом. Измерения температуры и вектора скорости ветра осуществлялись на уровне 21 м над поверхностью воды (рис. 4).



Радиометрический комплекс состоял из радиометра теплового инфракрасного диапазона Р-ИК и набора микроволновых радиометров с рабочими частотами от 20 до 89 ГГц (что соответствует длинам волн от 1,5 см до 3 мм). Все радиометры, а также видеокамера для регистрации изображений поверхности, были закреплены на автоматической поворотной платформе, обеспечивающей вращение по азимуту в диапазоне углов около 300° и по углу места от надира до зенита (см. рис. 3). Поворотная платформа была установлена на нижней палубе с мористой (южной) стороны на конце четырехметрового выноса, служащего для уменьшения влияния переотраженного от конструкций теплового радиоизлучения; на этом же выносе был закреплен струнный волнограф.

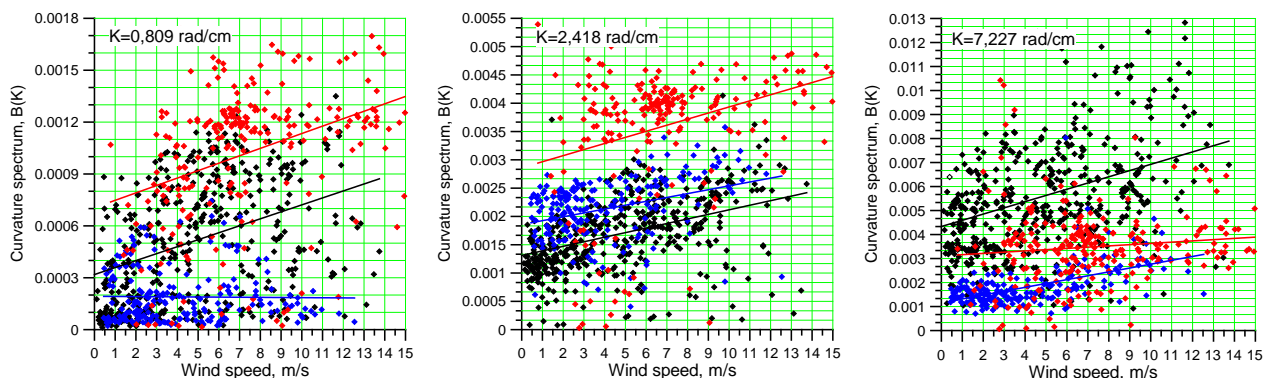
Измерения проводились круглосуточно. Данные регистрировались с частотой 3 Гц (компоненты скорости ветра и пульсации температуры воздуха — 20 Гц) на персональном компьютере, с помощью которого также осуществлялось управление поворотной платформой с радиометрами. Программно можно было задать любой алгоритм вращения. Основной алгоритм состоял в сканировании снизу вверх и обратно со скоростью 0,2 об./мин в диапазоне углов от 20 до 153° по отношению к надиру на шести последовательных азимутальных углах, через каждые 36°, и затем возврат на исходный азимутальный угол. Обратный азимутальный скан осуществлялся при фиксированном угле места порядка 65–70° от надира. Общая продолжительность такого цикла составляла порядка 25 мин. Таким образом, в различных азимутальных направлениях измерялась радиояркая температура морской поверхности на углах от близких к надиру до горизонта, и затем — радиояркая температура атмосферы от горизонта почти до зенита. Обратный скан дает возможность оценить величину азимутальной анизотропии радиотеплового излучения морской поверхности.

Одной из основных задач, решаемых в ходе упомянутых экспериментов, была отработка алгоритма восстановления параметров спектра ветровых волн из дистанционных измерений в микроволновом диапазоне и получение спектра ГКВ в различных гидрометеоусловиях. Обработка трех серий экспериментов позволила получить большой массив спектров ГКВ, полученных в различных условиях. Всего было обработано 14 дней экспериментов 2005 г., 6 дней 2007 г. и 7 дней 2009 г. В качестве примера на рис. 5 приведены восстановленные данные компонент волнения спектров ГКВ и спектров уклонов для 18 июня 2005 г., условные обозначения приведены на рис. 6.



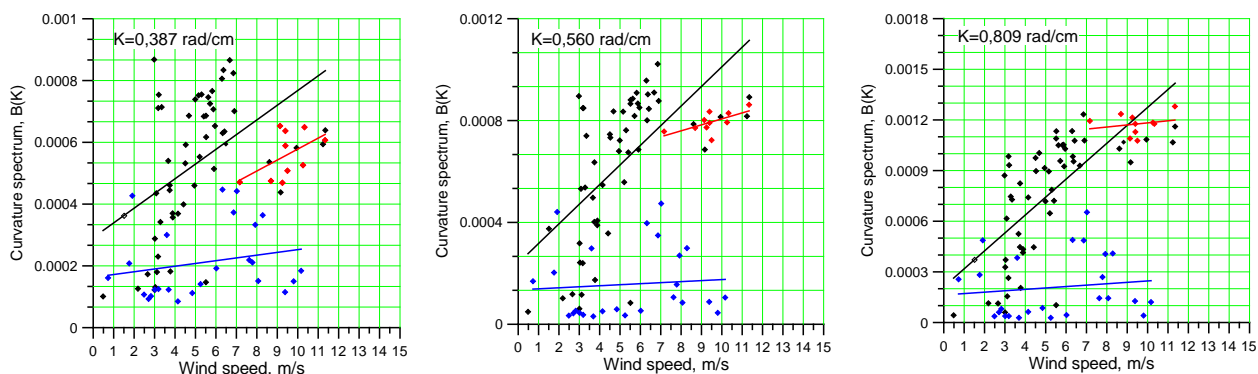
**Рис. 5.** Временные зависимости значений спектра кривизны (верхний график) и функции дисперсии уклонов (нижний график) для выделенных интервалов волновых чисел (обозначения — на рис. 6), Черная непрерывная линия — скорость приповерхностного ветра на высоте 21 м

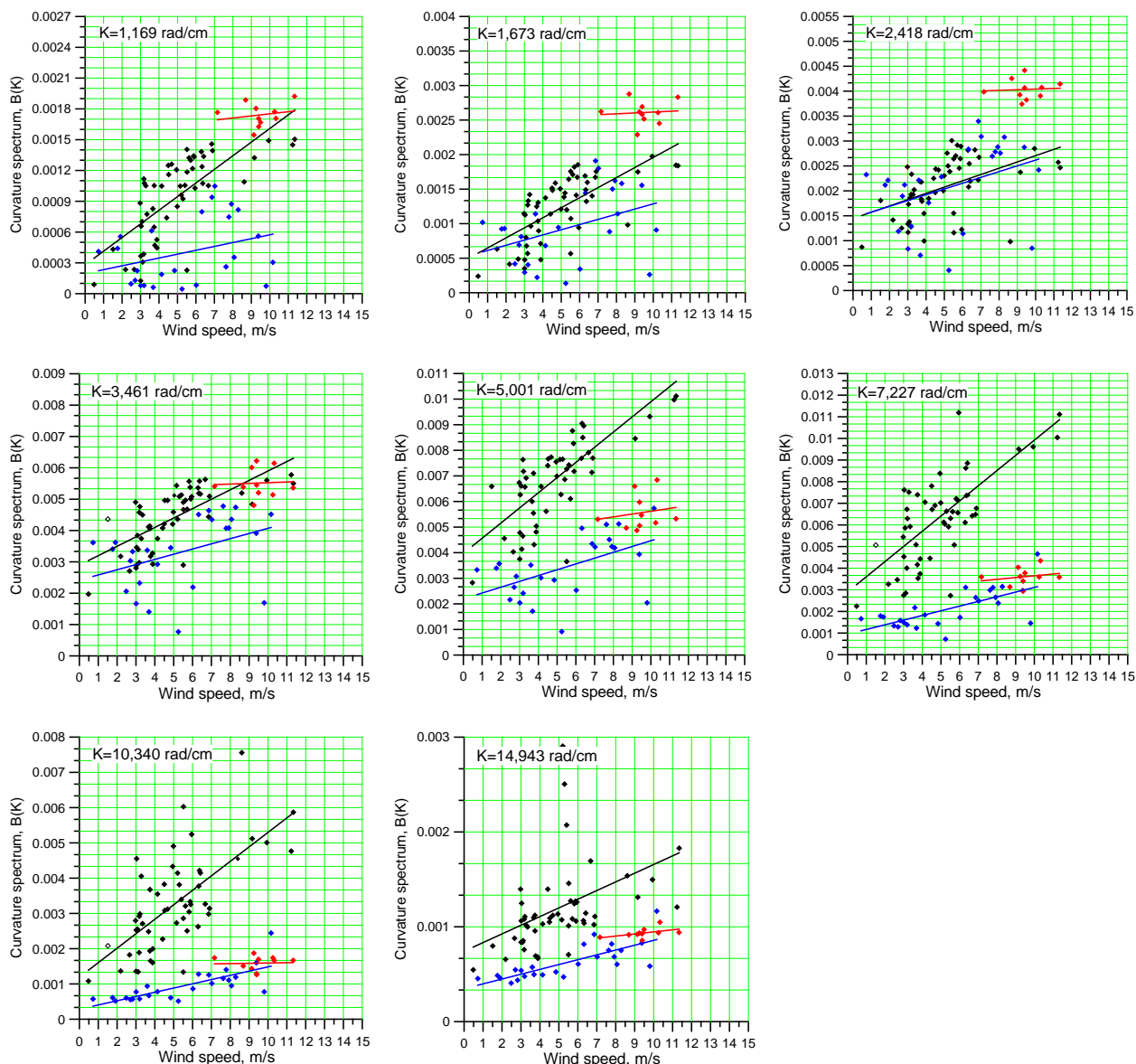
**Рис. 6.** Условные обозначения выделенных интервалов волновых чисел для рис. 5



**Рис. 7.** Зависимости значений спектра кривизны ГКВ от скорости ветра по всему массиву данных для некоторых значений волнового числа  $K$ . Черные точки — данные 2005 г.; синие — 2007 г., красные — 2009 г. Сплошными линиями показаны аппроксимации по каждому году

По всем данным были построены зависимости значений спектра кривизны ГКВ от скорости ветра. На рис. 7 приведены значения спектра кривизны ГКВ от скорости ветра для некоторых значений волнового числа  $K$ . Значительный разброс данных объясняется многообразием условий, в которых проводились эксперименты. Измерения 2005 г. были проведены в июне, когда выполняются условия устойчивой стратификации приводного слоя атмосферы: холодная вода и значительно более теплый воздух. Эти данные обозначены черным цветом. Данные 2007 г. получены в августе, когда были достаточно прогретая вода и жаркий воздух, т. е. стратификация приводного слоя близка к нейтральной (данные синего цвета). В 2009 г. эксперимент выполнялся в конце октября, когда вода значительно теплее воздуха, что позволяет отнести эти условия к неустойчивой стратификации приводного слоя (данные — красного цвета).





**Рис. 8.** Зависимости значений спектра кривизны ГКВ от скорости ветра по всему массиву отфильтрованных данных для различных значений волнового числа  $K$ . Черные точки — данные 2005 г., синие — 2007 г., красные — 2009 г. Сплошными линиями показаны аппроксимации по каждому году

Далее была проведена сортировка данных по следующим параметрам:

- по направлению ветра: были отобраны только те измерения, когда ветер дул с моря;
- по стабильности скорости ветра: выбирались данные, когда скорость ветра сохранялась более 3 ч;
- по стабильности направления ветра: направление ветра сохранялось  $\pm 10^\circ$  более 3 ч;
- по ошибкам, когда вариации радиояростной температуры атмосферы вносили суммарную ошибку, превышающую установленную величину.

На рис. 8 показаны отфильтрованные данные зависимости значений спектра кривизны ГКВ от скорости ветра для различных значений волнового числа  $K$ . Черные точки — данные 2005 г., синие — 2007 г., красные — 2009 г., сплошными линиями показаны аппроксимации по каждому году.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать следующие выводы:

1. Результаты сортировки экспериментальных данных показали, что лишь около 30 — 35 % измерений можно отнести к условиям «развитого волнения».
2. Несмотря на значительный процент отбракованных измерений, за время выполнения работ по проекту был накоплен обширный банк данных наблюдений за состоянием

- водной поверхности. Эти данные могут быть использованы для анализа состояния морской поверхности в условиях, отличных от условий «развитого волнения».
3. Отличия результатов, наблюдаемых для каждого из трех экспериментов, обусловлены, по всей видимости, неучтенными условиями волнообразования. Одной из наиболее очевидных причин расхождений является параметр стабильности границы раздела океан – атмосфера, определяющий соотношение температур приграничных слоев воды и воздуха.
  4. Полученный набор зависимостей позволяет приступить к построению модели спектра кривизны морской поверхности в области ГКВ.

В ходе выполнения теоретических исследований взаимодействия шероховатой поверхности и электромагнитного излучения получено точное решение задачи взаимодействия сферической электромагнитной волны с синусоидальной морской поверхностью. Развита электродинамическая теория применительно к микроволновой радиометрии морской поверхности, проведены численные эксперименты и выполнено сравнение с результатами лабораторных экспериментов.

Проведены работы по моделированию восстановления спектра гравитационно-капиллярного волнения методом НРРС с целью совершенствования алгоритма решения обратной задачи. Выполнена обработка данных натурального эксперимента на Черном море, проведенного в октябре 2009 г. на морской платформе в Черном море близ п. Кацевели, по исследованию параметров двумерного пространственного спектра гравитационно-капиллярных волн на поверхности моря методом НРРС.

На базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в г. Геленджике в сентябре – октябре 2010 г. проведена подготовка к экспериментальным работам и выполнен натурный эксперимент. Получены данные по микроволновым угловым радиометрическим измерениям с помощью комплекса «Траверс». Радиометрические измерения дополнены синхронной видеосъемкой с помощью веб-камеры и измерениями турбулентных характеристик ветрового потока, спектра крупных волн с помощью решетки волнографов и контактными измерениями гидрометеопараметров. Получены комплексные микроволновые радиометрические и метеорологические данные для построения спектров гравитационно-капиллярных волн методом нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии.

*Халин Ю.Б., Кузьмин А.В., Семин А.Г., Шарков Е.А.* О возможности восстановления детального профиля водяного пара по спутниковым данным в зонах крупномасштабных тропосферных возмущений Земли // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 3. С. 62–68.

*Pospelov M.N., Kuzmin A.V., Sadovsky I.N.* Estimate of short wave curvature from angular radiometric measurements // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'10). July 25–30, 2010. Honolulu, USA. P. 4181–4183.

*Семин А.Г., Кузьмин А.В., Халин Ю.Б., Шарков Е.А.* Исследования радиояркостной температуры атмосферы тропиков в линии 183,3 ГГц // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 30.

*Селунский А.Б., Кузьмин А.В.* Тепловое излучение и поглощение на синусоидальной границе водной поверхности для вертикальной поляризации в рамках модели плоской волны // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 51.

*Садовский И.Н., Кузьмин А.В.* Эмпирическая модель спектра ГКВ, полученная на основе данных дистанционных радиополяриметрических наблюдений // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 233.

*Садовский И.Н.* Исследование возможности применения метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии при обработке данных спутниковых наблюдений // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и

технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 192.

*Садовский И.Н., Сазонов Д.С.* Исследование динамики спектра ГКВ по результатам серии натуральных экспериментов CAPMOS // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 193.

*Сазонов Д.С., Садовский И.Н.* Калибровка как часть обработки экспериментальных радиополяриметрических измерений // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 199.

*Фейвесон Г., Родионов С.Н.* Замечания по поводу специального памятного выпуска журнала «Наука и всеобщая безопасность» // Наука и всеобщая безопасность. Вып. 17. 2010. № 2–3. С. 36–37.

*Садовский И.Н.* Особенности расчета собственного радиотеплового излучения морской поверхности при наличии неровностей различного масштаба // 7-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 53–54.

*Сазонов Д.С., Садовский И.Н.* Солнечное излучение в СВЧ-диапазоне как один из источников ошибок при проведении радиополяриметрических исследований // 7-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики, «Фундамент. и приклад. космич. исслед.». Москва, ИКИ РАН, 12–13 апр. 2010. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 54–55.

*Садовский И.Н.* Оценка величины радиоярких контрастов морской поверхности, обусловленных присутствием компонент ветрового волнения разного масштаба // 9-я Международ. научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2010: Тез. докл. Владимир, 2010. С. 483–486.

*Кисляков Д.В., Садовский И.Н.* Общие принципы формирования собственного излучения водной поверхности в СВЧ-диапазоне // 9-я Международ. научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2010: Тез. докл. Владимир, 2010. С. 487–490.

*Сазонов Д.С., Садовский И.Н.* Исследование влияния характеристик антенных систем на результаты радиополяриметрических измерений в СВЧ диапазоне // 9-я Международ. научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2010: Тез. докл. Владимир, 2010. С. 494–497.

*Sadovskiy I.N.* Application of Multi-Angle Microwave Measurements for Gravity-Capillary Wave Spectrum Retrieval // ESA Living Planet Symp.: Program and Abstr. June 28 – July 2, 2010. Bergen, Norway. 2010. P. 243.

*Чечин Д.Г., Репина И.А., Степаненко В.М.* Численное моделирование влияния холодной пленки на тепловой баланс и термический режим водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 538–550.

*Баханов В.В., Богатов Н.А., Волков А.С., Ермошкин А.В., Зуйкова Э.М., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Лобанов В.Н., Репина И.А., Титов В.И.* Натурные исследования масштабов изменчивости гравитационно-капиллярных поверхностных волн и приводного ветра в шельфовой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 255–262.

*Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ivanov V.V., Repina I.A. et al.* NOWCAST: Fate of early-2000's Arctic warm water pulse // Bull. of American Meteorological Soc. 2010. (Submitted.)

*Репина И.А., Дулов В.А., Малиновский В.В.* Влияние искусственных сликов на морской поверхности на динамику приводного слоя атмосферы // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. НАН Украины. Севастополь: МГИ, 2010. С. 147–152.

*Чухарев А.М., Репина И.А.* Комплексные натурные измерения турбулентных характеристик в слоях у границы раздела моря и атмосферы // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. НАН Украины. Севастополь: МГИ, 2010. С. 207–217.

**Кузьмин А.В.** канд. физ.-мат. наук, [alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru](mailto:alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru), **Поспелов М.Н.**, канд. физ.-мат. наук, [Michael.Pospelov@iki.rssi.ru](mailto:Michael.Pospelov@iki.rssi.ru), **Садовский И.Н.**, канд. физ.-мат. наук, [ilya\\_nik\\_sad@mail.ru](mailto:ilya_nik_sad@mail.ru), отд. № 55