Комплексный радиофизический эксперимент по дистанционному зондированию морской поверхности CAPMOS'05

М.Н. Поспелов¹, Ю.А. Горячкин², Н.Ю. Комарова¹, А.В. Кузьмин¹, И.А. Репина^{3,1}, Б.Д. Ситнянский⁴, М.Т. Смирнов⁵

¹Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Профсоюзная 84/32 E-mail: Michael.Pospelov@iki.rssi.ru; ²Морской гидрофизический институт НАНУ, Украина, 99011 Севастополь, Капитанская 2, E-mail: yngor@alpha.mhi.iuf.net;

³Институт физики атмосферы РАН, 109017 Москва, Пыжевский пер. 3 E-mail: repina@ifaran.ru;

⁴Владимирский государственный университет, 600000 Владимир, Горького 87 E-mail: snv05@vpti.vladimir.ru;

⁵Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал, 141190 Московская обл., Фрязино, пл. Введенского 1, E-mail: smirnov@sunclass.ire.rssi.ru

Международный комплексный эксперимент CAPMOS'05 с участием исследователей из России, Украины и Италии проводился на океанографической платформе Экспериментального отделения МГИ НАНУ в п. Кацивели вблизи южного побережья Крыма. Основной задачей исследований была отработка новых методов дистанционного зондирования морской поверхности в микроволновом диапазоне. В ходе эксперимента в июне 2005 г. проводились круглосуточные измерения характеристик собственного излучения морской поверхности в микроволновом и ИК-диапазоне при различных метеорологических условиях. Характеристики рассеяния электромагнитных волн взволнованной поверхностью измерялись с помощью скаттерометра 2-см диапазона длин волн. Компоненты скорости ветра, температура и влажность воздуха измерялись на нескольких уровнях относительно морской поверхности. Также производились синхронные измерения параметров волнения и турбулентности в поверхностном слое моря, восстанавливался профиль течений, осуществлялось периодическая регистрация профиля температуры и солености воды. Сопоставление экспериментальных данных дистанционных и контактных измерений позволяет уточнить параметры решения обратной задачи восстановления характеристик поверхностного слоя моря из измерений в микроволновом и ИК-диапазоне.

Введение

Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время находят все более широкое применение в задачах мониторинга взаимодействия океана и атмосферы. Результаты дистанционных измерений таких параметров взаимодействия, как температура поверхностности океана, скорость приповерхностного ветра, интегральное по высоте влагосодержание атмосферы и водозапас облачности, производимых с помощью космических радиометров микроволнового и инфракрасного (ИК) диапазона, используются и в фундаментальных океанологических и климатологических исследованиях, и в оперативных метеорологических наблюдениях и прогнозах.

Одним из ключевых параметров системы океан-атмосфера, в значительной степени определяющим циркуляцию океанических вод и, следовательно, энерго- и массоперенос в пограничных слоях океана и атмосферы, является соленость поверхностного слоя океана. Необходимость мониторинга ее в глобальных масштабах вытекает из наблюдаемых в последние годы тенденций сокращения ледового покрова в полярных широтах, связываемых с потеплением климата [1]. Вызываемое усиленным таянием льдов распреснение поверхностного слоя океана может дать толчок перестройке существующей системы океанических течений и послужить причиной значительных изменений климата не только в приполярных областях, но и в планетарных масштабах. В планах космических агентств Европы и США на ближайшие годы намечены запуски специализированных спутников, предназначенных для построения глобальных карт солености океана на основе дистанционных радиотепловых измерений в L-диапазоне (длина волны 21 см) [2, 3]. Однако до настоящего времени проблема дистанционного измерения солености с необходимой точностью далека от практического решения. Это связано, главным образом, со сложностью выделения относительно небольших изменений теплового радиоизлучения, вызываемых вариациями солености, на фоне значительно превосходящих их по величине сигналов, вызываемых поверхностным волнением.

Исследование влияния температуры, солености и волнения на характеристики излучаемых и рассеиваемых морской поверхностью электромагнитных волн, а также дальнейшее развитие средств и методов ДЗЗ явились приоритетными целями международного научного проекта CAPMOS (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring) [http://ultrax.ire.rssi.ru/capmos/main.php]. Проект, финансируемый Международной ассоциацией по развитию сотрудничества с учеными бывшего СССР (INTAS), объединяет 8 научных групп из 4 стран: России, Украины, Италии и Дании. В его рамках в период с 1 по 21 июня 2005 г. на стационарной океанографической платформе ЭО МГИ НАНУ, расположенной у южного берега Крыма вблизи п. Кацивели, проводились комплексные измерения характеристик взаимодействия океана и атмосферы.

Общая характеристика эксперимента

Платформа (рис. 1) установлена в 1980 г. для проведения регулярных гидрологических и метеорологических измерений. Географические координаты платформы: $44^{\circ}23'35''$ с.ш., $33^{\circ}59'04''$ в.д.; удаление от берега около 600 м; глубина моря около 30 м. При господствующих ветрах восточного и западного направления, тем более при южном ветре со стороны открытого моря, обеспечивается достаточный разгон ветровых волн, что позволяет в этих условиях относить волновые измерения к условиям глубокой воды и развитого волнения. Энергоснабжение платформы осуществляется с берега по кабелю, доставка оборудования и персонала производится с помощью катера; на основной палубе размером 25×25 м на высоте 12 м расположены лаборатории и жилые помещения. По своим возможностям проведения комплексных долговременных измерений платформа не имеет аналогов на территории бывшего СССР, да и во всем мире число таких научно-исследовательских сооружений невелико.



Рис. 1. Океанографическая платформа МГИ НАНУ

Платформа имеет несколько рабочих уровней, расположение на них аппаратуры в ходе эксперимента CAPMOS²⁰⁵ можно схематически обобщить следующим образом:

- глубина 3, 5, 10, 15 и 20 метров измерители течений МГИ-1308;
- от поверхности до дна периодические зондирования с помощью СТД-зонда МГИ-4102;
- глубина 1 м термисторный температурный датчик ИКИ;
- глубина 0,3 м СТД-микрозонд МГИ;
- высота 1,5 м метеокомплекс МК-15 (ИКИ);
- рабочая палуба на высоте 4 м 2 антенны струнных волнографов МГИ и ИКИ, акустический анемометр-термометр USA-1 (ИФА), газовый анализатор LI-COR 7500 (ИФА), цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ периодическая фотосъемка (ФИ-РЭ), радиоинтерферометр для измерения возвышений поверхности (CNR-ISAC), комплекс из 5 радиометров на автоматическом поворотном устройстве (ИКИ и ФИРЭ);
- основная палуба на высоте 12 м микроволновый скаттерометр Ки-диапазона (CNR-ISAC), радиометр L-диапазона (ФИРЭ и ВлГУ), компьютеры управления приборным комплексом и регистрации данных;
- крыша лаборатории на высоте 15 м цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ (периодическая фотосъемка);
- метеомачта на высоте 21 м метеокомплекс МК-15 (ИКИ).

Измерения производились непрерывно 24 часа в сутки, за исключением технологических перерывов на ремонт и обслуживание аппаратуры. Экспериментальные данные регистрировались в цифровой форме на персональных компьютерах. Обработка данных продолжается, приведенные ниже результаты носят предварительный характер и предназначены, главным образом, для демонстрации возможностей аппаратурного комплекса, интегрированного усилиями интернациональной команды участников эксперимента.

Контактные океанографические и метеорологические измерения

Эксперимент проводился в период гидрологической весны, к которому в Черном море относят апрель – июнь. Этот сезон характерен общим прогревом поверхностного слоя моря и формированием сезонного слоя скачка температуры. Термический режим вод в районе океанографической платформы определяется климатическими факторами, режимом течений и ветра. Поскольку район находится в прибрежной зоне, здесь наблюдается ускоренный ход термических процессов и существенно более интенсивный процесс перемешивания вод, чем в открытой части моря. Кроме этого, большой вклад во временную изменчивость вносят сгонно-нагонные явления. Все отмеченные факторы предопределяют особенности вертикальной структуры вод и её временной изменчивости.

На рис. 2 приведено семейство профилей температуры воды, полученных за все время измерений (всего 217 зондирований). Из всего многообразия профилей температуры можно выделить три основных типа:

- трехслойная структура, с выраженным верхним квазиоднородным слоем, чрезвычайно резким слоем скачка температуры, до 8–9 °С/м, и слоем медленного понижения температуры;
- ступенчатая структура, когда термоклин разделяется на отдельные, чередующиеся слои с высокими градиентами и изотермическими прослойками, при этом зачастую термоклин начинается прямо с поверхности;
- гомотермическая от поверхности до дна структура с низкой температурой (ситуация сгона).



Рис. 2. Семейство профилей температуры (слева); средний профиль, максимальные и минимальные значения, стандартные отклонения по 5-метровым слоям за 1–20 июня 2005 года (справа)

Приведенные типы вертикальной структуры, конечно, не отражают все возможные ситуации, однако дают общее представление об их характере.

Характер вертикального распределения солености в целом был близок к соответствующим типам распределения температуры (рис. 3). Наибольшие пределы изменчивости отмечались в слое 0–15 м. В поверхностном слое соленость менялась в пределах 1,75 епс (16,5–18,25 епс). Слой максимальных градиентов температуры в подавляющем числе случаев совпадал со слоем максимальных градиентов солености. При анализе временного хода поверхностной температуры и солености хорошо заметно, что практически во все моменты они находятся в противофазе, что отражает динамику сгонно-нагонного процесса (рис. 4).



Рис. 3. Семейство профилей солености (слева); средний профиль, максимальные и минимальные значения, стандартные отклонения по 5-метровым слоям за 1–20 июня 2005 года (справа)



Рис. 4. Временной ход поверхностной температуры (сплошная линия) и солености (пунктир) 01–21 июня 2005 г.

Сгонно-нагонные процессы в значительной степени определяли и динамику атмосферы на протяжении эксперимента. Характеристики атмосферы измерялись тремя метеокомплексами, имеющими в своем составе трехкомпонентные акустические анемометры, датчики температуры, давления и влажности. Отечественные метеокомплексы МК-15 с частотой оцифровки 3 Гц были установлены на высоте 1,5 м над морской поверхностью с мористой стороны платформы и на высоте 21 м на метеомачте, где влияние конструкций платформы на характеристики ветрового потока было минимальным. Акустический анемометр USA-1 фирмы МЕТЕК с частотой оцифровки 20 Гц был установлен на высоте 4 м с мористой стороны платформы совместно с газовым анализатором LI-COR 7500, измерявшим также с частотой 20 Гц турбулентные пульсации концентраций углекислого газа и водяного пара.

Для вычисления турбулентных потоков тепла, импульса, влаги и углекислого газа применялся прямой метод, который требует небольшого количества теоретических допущений и работает над различными типами подстилающей поверхности. Потоки вычисляются по ковариациям между пульсациями измеряемых параметров [4]. Поток считается положительным, если он направлен из океана в атмосферу.

На рис. 5 представлена изменчивость температур воды и воздуха 11–12 июня 2005 г. В районе 17 часов 11 июня начался апвелинг, то есть сгон теплой поверхностной воды с последующим уменьшением температуры поверхности до 8 °С. Глубина расположения датчика температуры воды 0,5 м, температура воздуха измерялась на высоте 4 м. С началом увеличения разницы температур вода-воздух происходит перестройка атмосферы, что приводит к интенсификации обменных процессов. Стратификация меняется от нейтральной к устойчивой. Знак турбулентного потока тепла (рис. 6) меняется на отрицательный. В течение нескольких часов после начала апвелинга система море-атмосфера находится в колебательном режиме — атмосфера «приспосаблива-ется» к изменившимся условиям.







Рис. 6. Турбулентный поток явного тепла 11–12 июня, полученный из прямых измерений пульсаций температуры и вертикальной скорости ветра на высоте 4 м



Рис. 7. Температура воды и воздуха (а) и поток тепла (б) за все время наблюдений

На рис. 7 представлены температура воды и воздуха, а также рассчитанный прямым методом турбулентный поток тепла за все время измерений. Резкое уменьшение потока 2–3 июня связано, прежде всего, с локальным апвелингом. Большое абсолютное значение потока связано со значительной (до 25 м/с) скоростью ветра. В период 17–18 июня при отрицательной разнице температур вода-воздух наблюдался положительный поток тепла. Вероятно, это связано с образованием в результате дневного прогрева теплой поверхностной пленки, что подтверждается данными дистанционного зондирования в ИК-диапазоне.

Дистанционные измерения

Аппаратура дистанционного зондирования морской поверхности включала в себя микроволновый скаттерометр Ки-диапазона (длина волны 2 см) и многоканальный радиометрический комплекс.

Импульсный когерентный скаттерометр, принадлежащий итальянскому Институту атмосферных наук и климата (ISAC), измерял сечение обратного рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью на различных поляризациях и углах зондирования. Обсуждение полученных с его помощью экспериментальных данных выходит за рамки настоящей публикации, можно лишь упомянуть, что спектральный анализ рассеянного сигнала позволил выделить особенности, связанные как с энергонесущими компонентами волнения с частотой порядка 0,2 Гц, так и с длиннопериодными вариациями поля ветра с характерными частотами 0,001–0,007 Гц.

Радиометрический комплекс состоял из радиометра теплового инфракрасного диапазона Р-ИК и набора микроволновых радиометров с рабочими частотами от 3,7 до 94 ГГц (что соответствует длинам волн от 8 см до 3 мм). Основные характеристики радиометров приведены в таблице.

Прибор	Диапазон длин волн	Поляризация	Ширина луча, град.	Чувствительность, К
Р-ИК	8-12 мкм	-	9	0,1
P- 03	3 мм	Β, Γ	7	0,15
P- 08	8 мм	B, Γ, ±45°	9	0,15
P-15	1,5 см	B, Γ, ±45°	9	0,15
P-8 0	8 см	В	15	0,1

Характеристики радиометров

Все радиометры были закреплены на автоматическом поворотном устройстве (рис. 8), обеспечивающем вращение по азимуту в диапазоне углов около 300° и по углу места от надира до зенита. Поворотное устройство было установлено на нижней палубе с мористой (южной) стороны на конце 4-метрового выноса, служащего для уменьшения влияния переотраженного от конструкций теплового радиоизлучения. Данные регистрировались с частотой 3 Гц на персональном компьютере, с помощью которого также осуществлялось управление поворотным устройством. 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 азимутальных направлениях измерялась радиояркостная температура морской поверхности на углах от близких к надиру до горизонта, и затем – радиояркостная температура атмосферы от горизонта почти до зенита. Обратный азимутальный скан дает возможность оценить величину азимутальной анизотропии радиотеплового

излучения морской поверхности. Кроме того, при сканировании на первом и последнем азимутальном угле в поле зрения антенн радиометров миллиметрового диапазона попадал поглотитель микроволнового излучения, закрепленный на выносе у основания поворотного устройства. Температура поглотителя, изготовленного из синтетических волокон, измерялась с помощью двух термисторов. Это позволяет осуществлять внешнюю калибровку радиометров миллиметрового диапазона по двум точкам – температуре поглотителя и температуре атмосферы, поглощение в которой рассчитывается из углового профиля радиояркостной температуры.



Рис. 8. Поворотное устройство с радиометрами

Пример записи радиояркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризации в диапазоне 8 мм приведен на рис. 9. Максимальные температуры соответствуют поглотителю, минимальные – атмосфере вблизи зенита. В дальнейшем данные радиотепловых измерений в различных диапазонах и на различных поляризациях и углах зондирования использовались для анализа зависимости радиояркостной температуры от скорости приповерхностного ветра, а также для восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе оригинальной методики, разработанной в ИКИ РАН [5, 6]. Пример результатов восстановления спектра кривизны и эволюции отдельных спектральных компонент в зависимости от изменяющейся скорости ветра представлен на рис. 10.



Рис. 9. Фрагмент записи радиояркостных температур на длине волны 8 мм от 13.06.2005 г.



Рис. 10. Спектр кривизны, восстановленный из угловых радиометрических измерений (a), и эволюция отдельных спектральных компонент (б). Сплошная линия — скорость ветра; символы 1–5 соответствуют различным спектральным компонентам, положение которых в спектре отмечено стрелками

Для получения независимой информации о спектре поверхностных волн и сопоставления с результатами дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне [7] проводилась периодическая съемка поверхности в видимом диапазоне. Идея использования фотографий морской поверхности для исследования спектра морского волнения развивается давно. Наиболее развита теория формирования изображений в предположении внешнего диффузного освещения [8]. На практике это условие трудноосуществимо. Кроме того, имеется множество мешающих факторов, влияющих на результаты съемок, поэтому ставилась цель не определения самого спектра волнения, а выделения набора характеристик спектра волнения, которые могут быть идентифицированы или оценены по оптическим снимкам. Специфической особенностью задачи при этом является необходимость исследования спектра волнения в области коротких длин волн (до 1 см и короче).

Видимое излучение, регистрируемое над взволнованной водной поверхностью в отсутствии солнечных бликов, состоит из двух основных компонент:

 части солнечного излучения, диффузно рассеянного атмосферой в направлении поверхности и зеркально отраженного ей;

 части солнечного излучения, вошедшего в водную толщу, обратно рассеянного в ней и вышедшего на поверхность в сторону наблюдения.

В зависимости от условий наблюдения и характеристик волнения относительные вклады этих компонент в регистрируемый сигнал могут существенно меняться. Излучение разных цветовых диапазонов проникает в водную толщу и рассеивается по-разному, что приводит к основной разнице в пространственных характеристиках изображений в различных цветовых каналах. Это обстоятельство и было взято за основу при интерпретации данных съемок, поскольку фотографические измерения не калиброваны. Предполагалось, что не столько абсолютные значения, сколько именно различия в наблюдаемых пространственных характеристиках изображений в различных цветовых каналах могут служить характеристикой волнения. Кроме того, ставилась задача оценки интегральных характеристик спектра, которые менее подвержены случайным вариациям из-за мешающих факторов.

Из результатов работы [8] следует, что при диффузном внешнем освещении пространственный спектр волнения $G(\lambda, K)$ в высокочастотной области можно аппроксимировать функцией $G(\lambda, K) \sim A_{\lambda} K^{\gamma(\lambda)}$, где A_{λ} и $\gamma(\lambda)$ — параметры аппроксимации. При неоднородном освещении такое описание в принципе неприменимо, но нами предполагалось, что формальная оценка параметра $\gamma(\lambda)$ может быть использована в качестве параметра в пространстве признаков при классификации типов волнения.

Съемка взволнованной морской поверхности проводилась с помощью цифровой фотокамеры Olympus 8080 WZ. Фотографирование проводилось в каждой сессии съемки (с интервалом в 1–2 часа) последовательно с двух высот: порядка 4 и 15 м. Оценки пространственного разрешения снимков, сделанные по тестовым объектам, составили при этом примерно 1 и 4 мм соответственно. Для обработки выделенных фрагментов фотографий (1024×1024) разработаны специальные программы корреляционного и спектрального анализа данных независимо по каждому из цветовых каналов R, G и B.

На рис. 11 представлены оценки спектров яркости фрагментов изображений в трех цветовых каналах и результаты их аппроксимации степенной функцией. На рис. 12 приведены графики изменчивости соответствующих оценок $\gamma(\lambda)$. Из приведенных рисунков видно, что наблюдаются вариации оцениваемых параметров, причем в различных условиях значения их в различных цветовых каналах могут быть близкими, а могут и существенно отличаться. Проводились также сравнения результатов фотографирования с высоты 4 и 15 м. Предварительные результаты анализа показывают, что, не смотря на более высокое пространственное разрешение, снимки с нижнего яруса в большинстве случаев труднее поддаются интерпретации.



Рис. 11. Пример расчета спектров фрагмента изображения (верхний ярус) в трех цветовых каналах и результаты аппроксимации степенной функцией



Рис. 12. Изменчивость параметра γ(λ) (верхний ярус), серия фотографий приблизительно за 5 дней

Заключение

В целом, предварительные результаты эксперимента CAPMOS'05 позволяют сделать следующие выводы:

- сочетание дистанционных и контактных измерителей позволяет осуществлять эффективный мониторинг взаимодействия океана и атмосферы и представляет значительный интерес как для долговременных локальных измерений в широком диапазоне метеорологических и гидрологических условий, так и для калибровки/валидации данных ДЗЗ из космоса;
- совместный анализ вариаций температуры, солености и течений в шельфовой зоне вблизи южного берега Крыма позволил проследить динамику сгонно-нагонных явлений, а также переноса азовских вод в северно-восточной части Черного моря;

- были выполнены прямые измерения потока тепла в пограничном слое атмосферы над морской поверхностью в условиях различной атмосферной стратификации, а также в условиях быстрой перестройки пограничных слоев атмосферы и океана;
- было проведено пассивное и активное микроволновое зондирование морской поверхности в широком диапазоне частот и углов зондирования;
- из угловых радиометрических измерений были восстановлены параметры спектра гравитационно-капиллярных волн и прослежена их динамика в условиях переменной скорости ветра;
- предварительный анализ результатов оптической съемки морской поверхности показал перспективность использования цифровых фотографий для классификации типов волнения и определения их характеристик.

Исследования выполнены при поддержке INTAS (проект № 03-51-4789) и РФФИ (проекты № 05-05-64451, 05-05-64235).

Авторы считают своим долгом выразить признательность всем участникам комплексного эксперимента и особенно А.С. Кузнецову, А.Н. Большакову, В.Е. Смолову, И.Н. Садовскому, Д.М. Ермакову, С.В. Маречеку, Н.В. Садовскому, И.А. Бучневу, А.С. Смирнову, С. Зеккетто (Stefano Zeccetto), Ф. Де-Бьязио (Francesco De Biasio).

Литература

- 1. Lagerloef G.S.E., Swift C., LeVine D. Sea surface salinity: The next remote sensing challenge // Oceanography. 1995. V. 8. P. 44–50.
- Berger M., Camps A., Font J., Kerr Y., Miller J., Johannesen J., Boutin J., Drinkwater M.R., Skou N., Floury N., Rast M., Rebhan H., Attema E. Measuring Ocean Salinity with ESA's SMOS Mission // ESA Bulletin. August 2002. N. 111. P. 113–121.
- Yueh S.H., Wilson W.J., Edelstein W., Farra D., Johnson M., Pellerano F., LeVine D., Hilderbrand P. Aquarius Instrument Design for Sea Surface Salinity Measurements // IGARSS'2003: Proc. 21–25 July 2003. Toulouse, France. V. 4. P. 2795–2797.
- 4. *Edson J.B.*, *Hinton A.A.*, *Prada K.E.*, *Hare J.E.*, *Fairall C.W.* Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at Sea // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 1998. V. 15. P. 547–562.
- Trokhimovski Y.G. Gravity-capillary wave curvature spectrum and mean-square slope retrieved from microwave radiometric measurements (Coastal Ocean Probing Experiment) // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2000. V. 17. N. 9. P. 1259–1270.
- Kuzmin A.V., Pospelov M.N. Retrieval of Gravity-Capillary Spectrum Parameters by Means of Microwave Radiometric Techniques // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. № 5, P. 983–989.
- 7. *Ермаков Д.М.*, *Смирнов М.Т.* Натурные исследования взволнованной морской поверхности совместными оптическими и СВЧ радиометрическими методами // Радиотехника и электроника. 2004. № 4. С. 431–438.
- 8. Лучинин А.Г. Об интерпретации спектров аэрофотографий морской поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 3. С. 331–334.