

**НАБЛЮДЕНИЕ
ОКЕАНИЧЕСКИХ ФРОНТАЛЬНЫХ
РАЗДЕЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПУТНИКОВЫХ
РЛС БО**

**В.В.Малиновский^{*},
В.В.Пустовойтенко^{**}**

^{*}ООО "ДВС-Лтд"

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: dvs@alpha.mhi.iuf.net

^{**}Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: odmi@alpha.mhi.iuf.net

Рассматриваются вопросы использования радиолокационной (РЛ-) информации, получаемой с помощью космических аппаратов (КА) космической наблюдательной системы "Січ", при исследованиях мезомасштабной изменчивости морской поверхности, в частности - при мониторинге морских температурных фронтальных зон и при определении параметров поля ветра. Проведено сопоставление с данными, получаемыми с помощью ИСЗ NOAA, ERS.

РЛС БО, устанавливаемый на КА серии "Січ" является комплексом, с помощью которого в области морских наук и технологий можно решать широкий круг как фундаментальных, так и прикладных задач. В качестве примеров успешного использования получаемой с помощью этой РЛС БО информации можно привести результаты использования данных для исследования полей ветра над морскими акваториями [1-4], контроле ледовой обстановки в Азовском море [2], идентификации океанических (морских) температурных фронтов [5].

РЛ-методы получения информации обладают очевидным преимуществом – всепогодностью, т.е. возможностью наблюдения поверхности морских акваторий независимо от местных погодных условий и наличия облачности. КА типа "Січ" обеспечивают, с одной стороны, возможность наблюдения практически любой точки Мирового океана при достаточной доступности получаемых данных для широкого круга пользователей. Это существенно расширяет "океанографические" возможности РЛС БО.

Подчеркнем, что в настоящее время достигнуто понимание физики формирования морской поверхностью радиолокационного (РЛ) сигнала; созданы модели рассеивающей морской поверхности (следовательно и модель УЭПР моря), проведены экспериментальные исследования [6], позволившие правильно интерпретировать результаты многочисленных натурных РЛ – измерений, в том числе, и ранее необъяснявшиеся. Все это создает фундамент, необходимых для усвоения и широкого использования РЛ-информации, которая будет поступать с последующих КА типа "Січ", например, "Січ-1М".

Среди множества задач, имеющих как научное, так и прикладное значение, решение которых возможно на основе использования данных спутниковых РЛС БО (типа РЛС БО КА "Січ-1"), одной из важнейших является идентификация океанических фронтальных разделов.

Информация о реальном положении морских температурных фронтов необходима для решения задач организации и управления рыбным промыслом.

Известно, что перспективные промысловые районы располагаются в зонах морских температурных фронтов, вблизи границ течений, в зонах подъема и опускания вод (зоны дивергенции и конвергенции). Конвергенции течений вызывают "механическое" скопление кормовых организмов, а также, мелких рыб. Гипотетический механизм образования таких скоплений описан Левасту [7]. В зонах дивергенции и апвеллинга наблюдается высокая концентрация биогенных элементов [8]. Известно так же, что миграция фронтальных зон в ряде случаев приводит к ощутимым потерям промыслового времени и топлива. Для исключения (или, по крайней мере, снижения) этих потерь представляется целесообразным вести мониторинг фронтальных зон, особенно в предпромысловый период. Основным общедоступным источником дистанционных данных о температурной неоднородности морской поверхности могла бы стать информация, получаемая ИСЗ оперативной метеорологической спутниковой системы NOAA. На данный момент накоплен значительный опыт

использования ИК-изображений морской поверхности, получаемых с помощью ИСЗ NOAA, в оперативной рыбопоисковой деятельности. Основное достоинство этих данных — возможность “мгновенного” просмотра прилегающей океанской акватории и определения положения фронтов в поле температуры поверхности океана (ТПО).

Однако, использование ИК-данных возможно лишь в условиях прозрачной (безоблачной) атмосферы, что наблюдается над морскими (океанскими) акваториями далеко не всегда. Для многих рыбопромысловых районов, в частности, Северной Атлантики, Северо-Западной и Северо-Восточной Атлантики количество облачных дней в году может достигать 200 и более и даже на среднемесячных картах районов процент покрытия этих районов облачностью значителен.

В качестве примера на рис.1 показана среднемесячная (август 1996 г.) карта температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике — одном из районов традиционного рыбного промысла (море Ирмингера). В этом районе регулярно проводились съемки с помощью РЛСБО “Січ-1”. Нетрудно видеть, что существенная часть района в течение всего месяца была покрыта облаками (белые области, в которых нет ни одного измерения ТПО). Заметим, что южнее Гренландии облачность выстроена вдоль фронтального раздела и повторяет его форму. Аналогичная картина наблюдается и в других районах Мирового океана.

Кроме этого, данные NOAA могут быть получены отечественными пользователями только в режиме непосредственной передачи, что требует оснащения части рыболовных судов (как минимум — флагманских) станциями приема спутниковой информации и исключает возможность оперативного использования данных ИСЗ NOAA для контроля обстановки в промысловых районах при отсутствии в них рыбопоисковых или рыбопромысловых судов.

Использование КА космической наблюдательной системы “Січ” принципиальной позволяет решить эти проблемы.

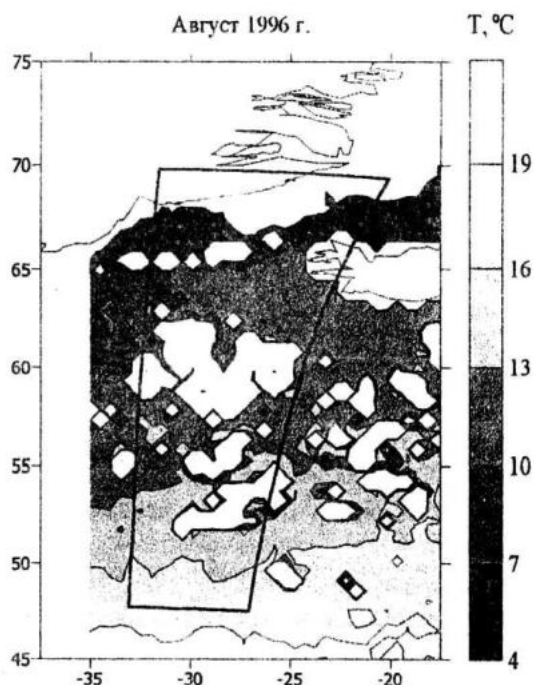


Рис.1. Среднемесячная карта ТПО Северной Атлантики по данным ИСЗ NOAA за август 1996 г. Черный четырехугольник — полоса обзора РЛС БО КА “Січ-1”, виток 5013, 06.08.96. Белые области — районы океана, полностью покрытые облаками в течение всего месяца.

Возможность идентификации фронтальных разделов по спутниковым РЛ изображениям достаточно подробно рассмотрена в работе [5], в которой приведены примеры проявлений мезомасштабных температурных неоднородностей на морской поверхности в радиолокационных данных и выполнен их качественный и количественный анализ. Основой интерпретации РЛ данных в [5] явилась теоретическая модель трансформации атмосферного пограничного слоя над температурными неоднородностями океана [9].

Суть явления заключается в том, что при пересечении воздушным потоком температурного фронта изменяются параметры стратификации атмосферы, коэффициент сопротивления, и, следовательно, динамическая скорость u_* у поверхности воды. Применительно к задачам радиолокации это означает следующее.

В рамках брэгговского механизма рассея-

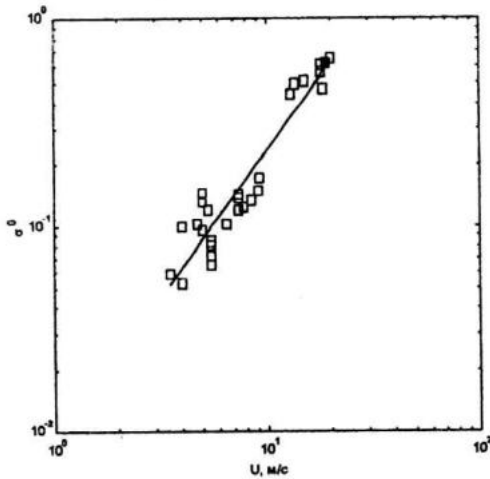


Рис.2. Зависимость УЭПР морской поверхности от скорости ветра, полученная по данным РЛСБО ИСЗ "Сич-1" (режим запись/ воспроизведение информации)

ния, уровень РЛ сигнала пропорционален УЭПР морской поверхности σ^0 :

$$\sigma^0 = 16 \cdot \pi \cdot k_r^4 \cdot |q|^2 \cdot S(k_{br}, \theta) \quad (1)$$

где k_r, k_{br} – волновые числа радиоизлучения и рассеивающей ветровой ряби соответственно; q – известная функция от угла падения радиоволн; $S(k_{br}, \theta)$ – двумерный спектр ветровой ряби; θ – угол между направлением ветра и азимутальным направлением антенны РЛС БО. Если принять, что $S(k_{br}, \theta) \sim u_*^n$ [6], то над температурным фронтом должна изменяться и УЭПР морской поверхности

$$\sigma^0 \sim u_*^n. \quad (2)$$

Величину n можно определить экспериментально. На рис.2 представлена зависимость σ^0 от скорости ветра U , полученная по данным РЛСБО для района северной Атлантики. Величина U определялась по данным метеорологических наблюдений. Совокупность точек хорошо описывается степенной функцией $\sigma^0 = 0,0085 \cdot U^{1,44}$. Поскольку $u_* \sim U$,

показатель степени в (2) примем равным $n = 1,44$.

При анализе РЛ изображений важна информация о скорости приводного ветра U . С одной стороны, эта величина является входным параметром модели [9] (по которой, в частности, рассчитывается значение u_*) и необходима для количественного анализа дистанционных данных. С другой стороны, неоднородности ветрового поля могут "маскировать" в РЛ сигнале проявления неоднородностей температуры поверхности.

Получение фактических (контактных) данных о поле U над открытыми морскими акваториями и удаленными районами Мирового океана затруднено. Основная часть существующих в мире метеорологических станций расположена на суше. Данные же о состоянии атмосферы над поверхностью открытых морских акваторий (океана) поступают с судов и автоматических буйковых станций, число которых не велико, и расположены они преимущественно в прибрежных областях.

Спутниковые данные дополняют эту информацию и позволяют следить за мезомасштабной изменчивостью ветровой обстановкой. Специализированными спутниковыми комплексами, предназначенными для определения скорости приводного ветра являются скаттерометры, установленные на ERS, QUIKSAT и других ИСЗ. Их пространственное разрешение составляет $\sim 10-50$ км. Эти данные являются, как правило, общедоступными, однако время между съемкой и получением конечного продукта составляет, в лучшем случае, несколько дней, что не позволяет использовать скаттерометрическую информацию зарубежных ИСЗ для оперативной обработки и анализа РЛ изображений, получаемых с ИСЗ серии "Океан" и "Сич".

Можно считать, что РЛС БО КА "Сич-1", по своей сути, так же является скаттерометром, обладающим высоким пространственным разрешением $1,5 \times 2$ км², что дает возможность более детально анализировать ветровую обстановку в открытом море.

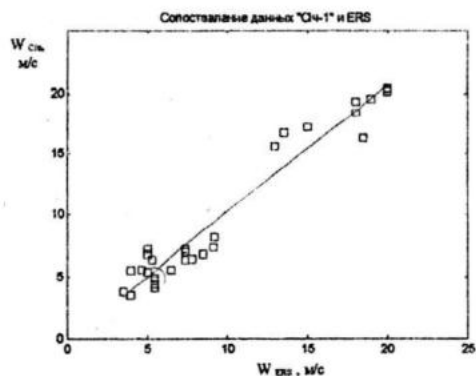


Рис. 3. Сопоставление данных о скорости ветра, полученных по информации КА "Січ-1" (режим "запись/воспроизведение информации") и скаттерометра ERS.

В связи с этим представляет интерес оценить возможности РЛС БО КА "Січ-1" как измерителя скорости ветра над морскими акваториями.

Прежде отметим одну принципиальную особенность обработки информации РЛС БО КА "Січ-1". Величины УЭПР морской поверхности, рассчитанные по РЛ-изображениям океанских акваторий при использовании режима "запись/воспроизведение информации", отличались от оценок σ^0 , полученных для акватории Азово-Черноморского бассейна (когда использовался режим "непосредственная передача информации"), в $\sim 2,5 - 3$ раза.

По-видимому, это связано с особенностями работы бортового тракта формирования сигнала, проявившимися как в различии уровня "электрического нуля" сигнала, так и в различии в параметрах внутреннего "калибровочного клина" РЛС БО в этих режимах [1].

В связи с этим, сопоставление скорости ветра, восстановленного по данным РЛС БО, с данными зарубежных скаттерометров проведем для обоих режимов передачи информации.

На рис.3 сопоставлены данные о скорости ветра над океанскими акваториями, полученные в результате обработки информации РЛС КА "Січ-1" и скаттерометра ИСЗ ERS (данные РЛС БО получены с использованием режима записи и воспроизведения информации).

Для анализа использованы снимки, относящиеся к районам Центральной и Северной Атлантики. При этом расхождение во времени

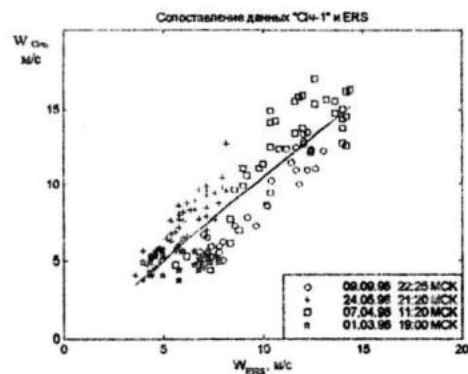


Рис. 4. Сопоставление данных о скорости ветра, полученных по информации КА "Січ-1" (режим "непосредственная передача") и скаттерометра ERS [4]

выполнения съемок с помощью "Січ-1" и ERS не превышало 3-4 часов, что для устойчивых океанских условий является вполне удовлетворительным в смысле синхронности измерений. "Калибровка" РЛС БО по скорости ветра осуществлялась на метеорологическим данным, полученным по судовым измерениям скорости ветра и по измерениям скорости на океанских автоматических буйковых станциях [1]. Нетрудно видеть, что наблюдается хорошее соответствие между значениями модулей скорости ветра, рассчитанным по информации обоих КА. Связь между данными линейна а среднеквадратичное отклонение от сглаживающей кривой составляет $\delta = \pm 1,45$ м/с.

На рис.4, сопоставлены между собой данные о скорости ветра, полученные по информации РЛС БО (режим непосредственной передачи) и по информации ИСЗ ERS для региона Азово-Черноморского бассейна. "Калибровка" РЛС БО по скорости ветра осуществлялась по метеорологическим данным, передаваемым наземными станциями по региону Черного, Эгейского и Средиземного морей. Для сравнения данных обоих спутников были выбраны "квазисинхронные" съемки Черного моря.

Как следует из рис.4, связь между данными о скорости ветра, полученными обоими источниками, так же линейна. Среднеквадратичное отклонение от сглаживающей кривой составляет $\delta = \pm 1,7$ м/с.

Таким образом, по информации РЛС БО, устанавливаемых на КА серии "Січ", можно с

приемлемой точностью восстанавливать величины модуля скорости ветра и использовать "фоновые" значения U при анализе РЛ проявлений температурных неоднородностей на поверхности океана.

В качестве примера наблюдения морских температурных фронтов с помощью спутниковой РЛС БО на рис.5 и рис.6 показаны радиолокационные изображения фронтальной зоны Гольфстрима, заимствованные из [5]. Анализ РЛ данных, проведенный в этой работе, при отсутствии фактических данных основывался лишь на оценках градиентов поверхностной температуры. На рис.5,6 совместно с РЛ изображениями приведены синхронные измерения сканера AVHRR (ИК – диапазон) ИСЗ NOAA. Температурный фронт на ИК – снимках имеет вид синусоиды, разделяющей области изображения разной яркости; темная область относится к холодной части фронта, а более светлая – к теплой. Как следует из обоих рисунков, пространственная структура РЛ сигнала полностью повторяет особенности данных AVHRR.

Структура РЛ данных полностью описывается моделью трансформации атмосферного погранслоя над неоднородностями ТПО. Как следует из работы [5], под влиянием холодной подстилающей поверхности в нижней части погранслоя развивается устойчиво стратифицированный внутренний погранслой. При этом при горизонтально однородных параметрах вышележащей атмосферы ветер (напомним, что в радиолокации морской поверхности оперируют скоростью ветра на одном из стандартных метеорологических горизонтов, например — 10 или 19,5 м) непосредственно у морской поверхности и поверхностные ветровые напряжения u_* над холодной стороной фронта падают. Следствием этого становится снижение уровня спектральной плотности "резонансной" ряби, что и создает на РЛ-изображении область с относительно низким уровнем РЛ-сигнала.

Синхронные с РЛ данными изображения ТПО позволяют провести количественный ана-

лиз изменения σ^0 над температурным фронтом. На рис.7 приведены увеличенные фрагменты ИК (слева) и РЛ (справа) изображений меандра Гольфстрима, представленных на рис.6. Как видно из рис.7, радиолокационный сигнал повторяет и более "тонкую" структуру ТПО. В частности, на РЛ изображении отчетливо проявляется полоса усиления сигнала, окаймляющая фронтальный раздел. Повышение температуры поверхности в этой зоне наблюдается и в ИК данных.

Рассмотрим пространственное распределение радиолокационного сигнала в районе температурного фронта Гольфстрима. На рис.8 показаны сечения ТПО и σ^0 вдоль разреза А-Б, обозначенного на рис.7 сплошной светлой линией. Как следует из рис.8а, перепад температуры поверхности составляет $\Delta T_w \sim 2,7^\circ \text{C}$. Если принять в качестве "фонового" участка поверхности район, ограниченный координатами 48,5...47,5 з.д., то среднее значение ТПО здесь составит $T_{w0} = 24,3^\circ \text{C}$. Нижним индексом "0" будем обозначать параметры, относящиеся к данному району. Метеорологическая обстановка на моменты съемок характеризовалась юго-западным ветром со скоростью $U = 8 \text{ м/с}$, температура воздуха составляла $T_a = 24^\circ \text{C}$. Таким образом, выбранный "фоновый" участок характеризовался устойчивой стратификацией атмосферного погранслоя.

На рис.8б жирной линией представлено пространственное изменение УЭПР вдоль разреза, нормированное на среднее "фоновое" значение σ_0^0 . Из рисунка видно, что РЛ сигнал в целом повторяет изменения температуры поверхности. При этом его уровень при переходе с теплого сектора фронта на холодный падает в ~1,8 раза. Для сопоставления экспериментальных данных с модельными расчетами контраст РЛ сигнала K_* , вызванный вариациями u_* над фронтом с учетом (2) можно записать как

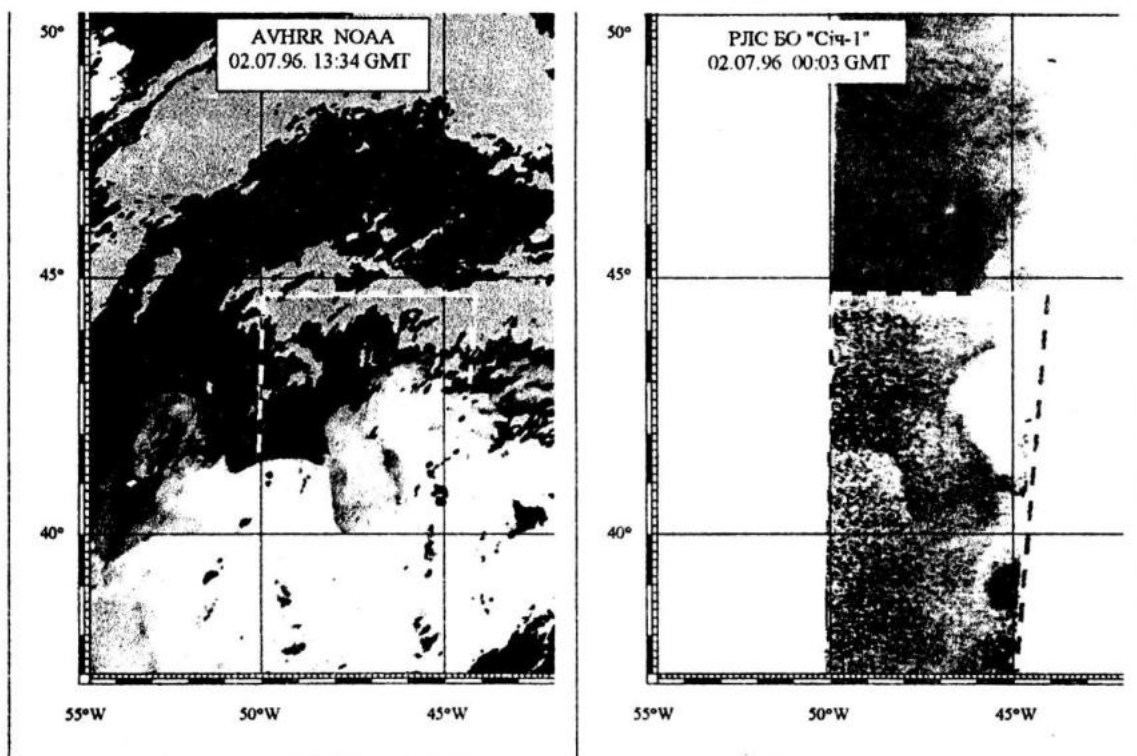


Рис. 5 Квазисинхронные изображения акватории Северной Атлантики, полученные с помощью сканера AVHRR ИЗС NOAA (слева) и РЛС БО КА "Січ-1" (справа) 02.07.96. соответственно в 13:34 GMT и в 00:03 GMT. Пунктиром отмечены области меандра течения Гольфстрим

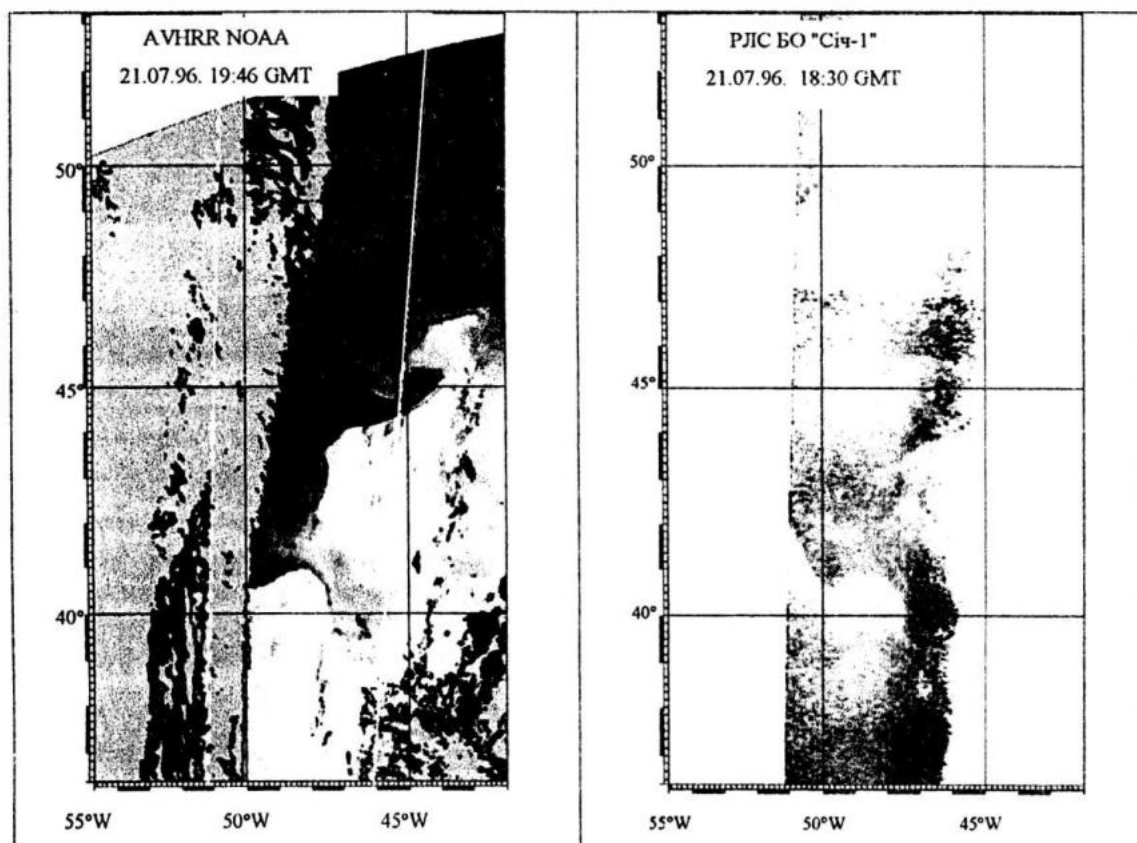


Рис. 6 Квазисинхронные изображения акватории Северной Атлантики, полученные с помощью сканера AVHRR ИЗС NOAA (слева) и РЛС БО КА "Січ-1" (справа) 21.07.96. соответственно в 19:46 GMT и в 18:30 GMT. Пунктиром отмечена полоса обзора РЛС БО.

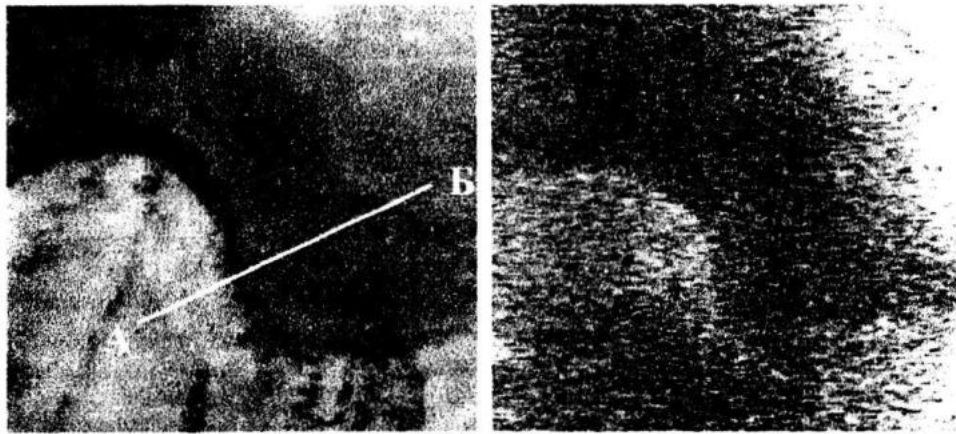


Рис. 7. Увеличенные фрагменты ИК (слева) и РЛ (справа) изображений меандра Гольфстрима, представленных на рис.6. Съемка 22.07.96 г.

$$K_* = \frac{\sigma^0}{\sigma_0^0} = \left(\frac{u_*}{u_{*0}} \right)^{1.44}$$

Тонкой линией на рис.8б показано ожидаемое изменение K_* , рассчитанное по моде-

ли [9] для реальных изменений температуры поверхности T_w и известных значений $U = 8$ м/с, T_a и T_{w0} .

Как следует из рисунка, модельные расчеты согласуются с наблюдениями не только качественно, но и количественно.

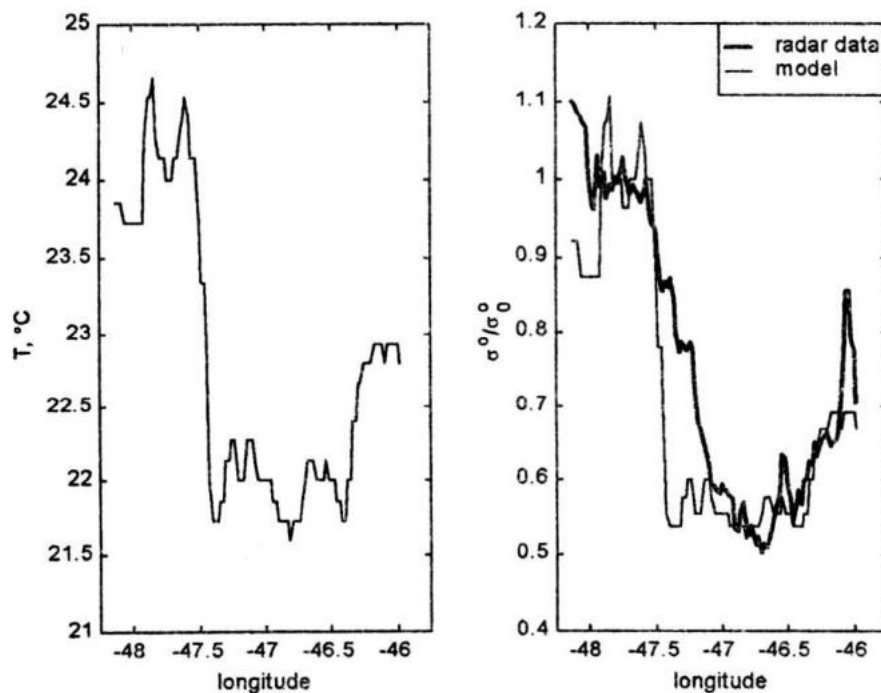


Рис. 8. Пространственные распределения а) – температуры морской поверхности и б) – РЛ сигнала вдоль разреза А – Б, обозначенного на рис. 7.

Заключение.

Проведенное в данной работе сопоставление данных РЛСБО КА "Січ-1" с информацией ИСЗ NOAA показало, что РЛ сигнал полностью отображает структуру неоднородностей поля поверхностной температуры океана. Модельные расчеты УЭПР морской поверхности, базирующиеся на модели трансформации атмосферного погранслоя в районе термических фронтов и выполненные с учетом фактических значений ТПО и параметров атмосферы, полностью согласуются с данными РЛ наблюдений.

По данным РЛСБО, устанавливаемой на ИСЗ серии "Січ" можно с приемлемой точностью оценивать модуль скорости ветра над морскими акваториями и использовать эту информацию для расчета динамической скорости у поверхности воды.

Все это дает возможность проведения оперативного контроля районов фронтальных разделов, анализа пространственного распределения градиентов поверхностной температуры и получения их количественных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Европейского сообщества: грант INTAS INFO 00-598.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустовойтенко В.В., Малиновский В.В. Некоторые особенности обработки информации спутниковой радиолокационной станции бокового обзора ИСЗ "Січ-1". // Морской гидрофизический журнал. 1998, №3, С.70-77.

2. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В., Кудрявцев В.Н. Использование информации РЛСБО ИСЗ "Січ-1" для наблюдения Черного и Азовского морей. // В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1998, С.162-173.

3. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В. Радиолокационные наблюдения мезомасштабных особенностей приводного ветра. // В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999, С.142-146.

4. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В. Спутниковые РЛСБО как элемент системы контроля морской поверхности. // В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000, С.91-97.

5. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Родин А.В. Проявление температурных фронтов в радиолокационных изображениях океана. // Исследование Земли из космоса, 1999, №6, С.16-26.

6. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Большаков А.Н., Смоллов В.Е. Экспериментальные исследования механизмов модуляции радиолокационного сигнала на масштабах морских поверхностных волн. // Исследование Земли из космоса, 2001, №4, С.13-30.

7. Левасту, И.Хела. Промысловая океанография. - Л., ГМИ, 1974, 295 с.

8. Dadimead A.J., Pickard G.L. Annual changes in the oceanic-coastal waters of the Eastern Subarctic Pacific. // J. Fish. Res. Bd. Canada, 1967, v.24, N11.

9. Кудрявцев В.Н. Упрощенная модель трансформации атмосферного погранслоя над температурным фронтом моря. // Морской гидрофизический журнал. 1995, №2, С.24-51.