

СПУТНИКОВЫЕ РЛСБО КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В.Малиновский, В.В.Пустовойтенко

ООО "ДВС ЛТД"

99011 г. Севастополь, ул. Капитанская, 4

Морской гидрофизический институт

НАН Украины

99011 г. Севастополь, ул. Капитанская, 4

Радиолокаторы бокового обзора (РЛС БО), устанавливаемые на украинских ИСЗ, являются уникальным средством для проведения контроля состояния морской поверхности. По отношению к радиолокаторам с синтезированной апертурой (SAR), используемых на зарубежных спутниках (SAR C-band на ERS; SAR L-band на RADARSAT; SAR S-band на JERS), РЛСБО обладает значительно худшим пространственным разрешением, но существенно большей полосой обзора ~450 км и ее протяженностью в несколько тысяч километров. С другой стороны, разрешение ~1,5×2,5 км, получаемое в режиме непосредственной передачи (нп-рпм5) информации, является оптимальным для контроля мезомасштабных образований на поверхности моря и практически совпадает с разрешением 1×1 км метеорологических спутников серии NOAA, работающих в оптическом и ИК диапазонах. Существенным преимуществом использования информации РЛСБО, является возможность *оперативного* приема, тематической обработки и анализа РЛ данных по Черному и Азовскому морям на существующей в

настоящее время сети пунктов приема спутниковой информации в Киеве, Севастополе, Харькове и Днепропетровске.

Среди основных задач, решаемых с помощью РЛСБО необходимо, в первую очередь, выделить следующие:

- контроль поля ветра над морскими акваториями для обеспечения безопасности мореплавания;
- контроль и прогноз ветровой ситуации в прибрежной зоне для обеспечения безопасности сооружений, установленных на шельфе Черного моря;
- контроль ледовой обстановки и динамики положения кромки льда в Азовском море для целей навигации.

Успешная работа РЛСБО, установленного на первом украинском ИСЗ "Січ-1", в период с февраля по ноябрь 1996 г. показала, что все перечисленные задачи могут быть решены в полном объеме [1-5]. Примеры определения структуры поля ветра и его скорости W для различных типов мезомасштабных атмосферных образований над Черным морем, идентифицированных по данным РЛСБО, приведены в [3-5]. К ним относятся циклоны, ветровые струи, вызванные орографическими эффектами, атмосферные волны. Особое практическое значение имеет контроль изменения поля ветра в прибрежной зоне. Это обусловлено наличием там сооружений и коммуникаций (терминалы, нефтепроводы, газовые платформы и др.), которые подвергаются ветровым нагрузкам. Особенностью ветровой обстановки в таких районах является

изменение характеристик воздушного потока, за счет трансформации атмосферного погранслоя (АПС). Стандартные метеорологические прогнозы не позволяют оценивать этот феномен, имеющий пространственные масштабы порядка десятков километров. Большая полоса обзора РЛСБО дает возможность, с одной стороны, проводить полный контроль таких эффектов и, с другой стороны, получать эмпирические зависимости, необходимые для расчета приводной скорости ветра. Примеры сильной ветровой изменчивости в прибрежной зоне Черного и Азовского морей приведены в [3].

Совместное использование информации о поле ветра над морскими акваториями, получаемой с украинских и зарубежных ИСЗ, позволяет проводить детальный анализ при широкой полосе обзора. Естественным необходимым требованием при этом является соответствие данных с различных спутников. Проведем сравнение величин W , рассчитанных по изображениям РЛСБО, со значениями скорости ветра, полученными с зарубежных ИСЗ.

Количественное сопоставление данных РЛСБО ИСЗ "СГЧ-1" со скаттерометрической информацией ИСЗ ERS-2

Специализированным комплексом, предназначенным для определения поля ветра над морской поверхностью является скаттерометр, аналогичный установленному на ERS, имеющим многолучевую антенную систему, с помощью которой определяется направление W . Однако, скат-

терометры имеют относительно плохое пространственное разрешение (лучшим разрешением в 10 км обладает NSCAT, установленный на ИСЗ "QUIKSCAT"). Это не дает возможности контролировать мезомасштабную структуру ветра, что особенно важно для прибрежных районов океана и окраинных морей. Радиофизические комплексы на украинских ИСЗ позволяют проводить его измерения с разрешением в 2-3 км.

Для пересчета уровня сигнала радиолокатора в удельную эффективную поверхность рассеяния σ^0 , позволяющую рассчитывать скорость ветра, используется процедура нормализации РЛ данных. При определении значений W с помощью РЛСБО "СГЧ-1" в работах [3-5] использовалась методика нормализации, предложенная в [6].

Проведем сравнение данных РЛСБО с информацией скаттерометров о поле значений W , осредненных на площади $50 \times 50 \text{ км}^2$. На рис. 1а приведено поле ветра в атмосферном циклоне в центральной части Черного моря (09.09.96 г., 23:00 МСК), полученное по данным скаттерометра ERS. Длина и направление стрелок соответствует скорости и направлению ветрового потока. Более детально этот циклон проявляется на изображении РЛСБО, приведенном на рис. 1б (виток 5530, 09.09.96 г., 22:25 МСК), имеющим лучшее пространственное разрешение. Значение скорости ветра рассчитывалось по методике, предложенной в [6]. Для обоих рисунков наблюдается полное соответствие по пространственной структуре атмосферного образования. Скорость ветра по

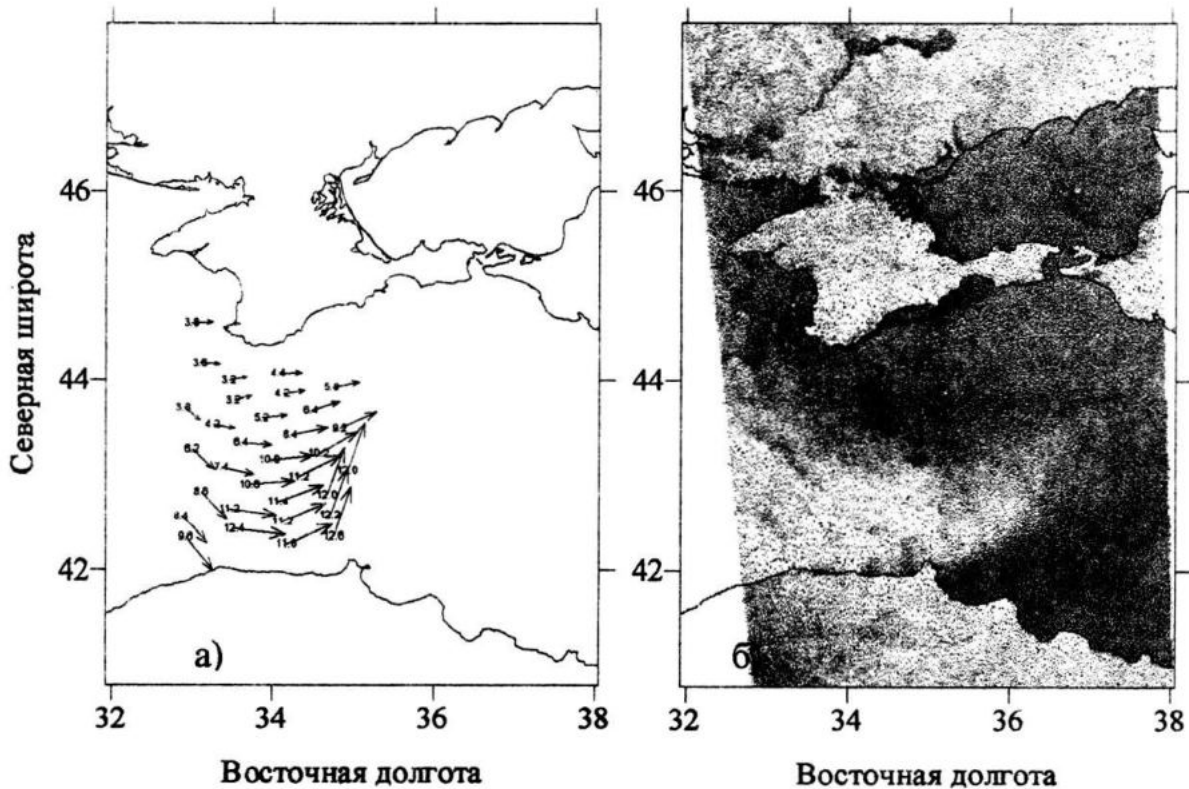


Рис. 1. а) – поле ветра в центральной части Черного моря, полученное по данным скаттерометра ERS 09.09.96 г. 23:00 МСК; б) – отображение атмосферного циклона над Черным морем в изображении РЛСБО 09.09.96 г. 22:35 МСК.

данным РЛСБО изменялась от 7-8 м/с в западной части циклона до 13-14 м/с в его восточной части, что соответствует данным ERS. Для сопоставления информации РЛСБО ИСЗ “Січ-1” и скаттерометра нами были отобраны съемки Черного моря, при которых сдвиг по времени между измерениями с обоих спутников не превышал ± 2 часа. Таких совпадений оказалось четыре за время функционирования РЛСБО ИСЗ “Січ-1”. На рис.2 показано сопоставление данных о модуле скорости ветра, полученных с обоих спутников. Видно, что связь между данными линейная, среднеквадратичное отклонение скорости ветра от сглаживающей прямой составляет $\sigma W = \pm 1,7$ м/с. Наблюдаемый разброс точек может быть, в первую очередь, обусловлен не пол-

ной синхронностью измерений. Полученная линейная зависимость в широком диапазоне скоростей ветра указывает на хорошее соответствие информации, принимаемой с украинских космических носителей с информацией зарубежных ИСЗ и, в перспективе, позволяет дополнять скаттерометрические данные измерениями РЛСБО для описания тонкой структуры ветровых полей.

Отметим, что пространственные неоднородности в РЛ изображениях морской поверхности могут вызываться не только естественной изменчивостью поля W . Увеличение или уменьшение σ^0 происходит, например, над температурными фронтами. Физический механизм, основанный на трансформации АПС над пространственны-

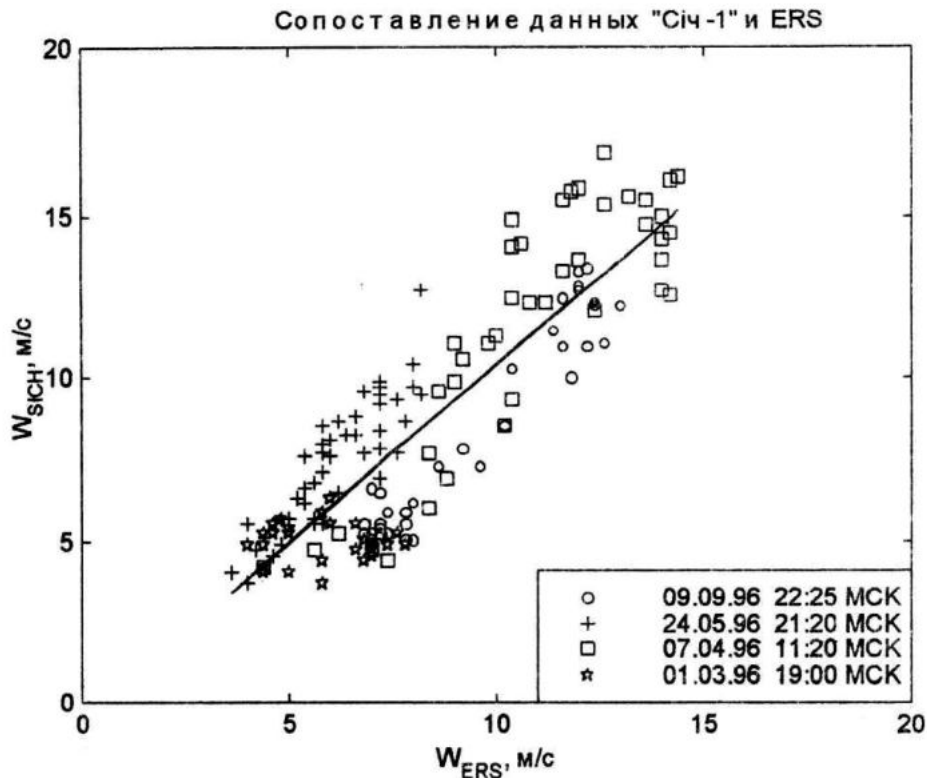


Рис.2. Сопоставление данных о скорости ветра, полученных по информации РЛСБО ИСЗ "Січ-1" и скаттерометра ERS. В легенде указаны даты и время съемок. Сплошная линия – регрессионная прямая, полученная методом минимального квадрата ошибки.

ми неоднородностями температуры океана, и примеры такого эффекта описаны в работе [2]. Практически не исследованными остается вопрос о проявлениях в РЛ сигнале зон конвергенции/дивергенции течений, которые могут влиять на обратное рассеяние радиоволн как за счет трансформации АПС, так и уменьшения (в случае дивергенции) или увеличения (в случае конвергенции) обрушений ветровых волн, вносящих вклад в σ^0 . Рассмотрим пример отображения структуры поля течений в радиолокационном изображении.

Проявление зон конвергенции течений в РЛ изображениях

Радиолокационные методы дают возможность идентифицировать мезомасштабные неоднородности на морской поверхности, связанные с зонами конвергенции течений. В таких зонах происходит скапливание поверхностно-активных веществ (ПАВ), приводящее к "выглаживанию" поверхности, и, следовательно, к изменению ее рассеивающих свойств. Это позволяет проводить контроль крупномасштабных районов загрязнений морских акваторий. Рассмотрим пример отображения конвергентных зон в Черном море в данных РЛСБО.

На рис.3 приведены РЛ изображения (ИСЗ ОКЕАН-07) и квазисинхронное ИК изображение (ИСЗ NOAA) Черного моря, выполненные 22 сентября 1995 года. Как видно из ИК изображения, на поверхности моря, свободной от облаков, очевидно прослеживается температурный фронт. Максимальный перепад температуры через этот фронт равен 3°C. На холодной стороне фронта видна структура поля контрастов поверхностной температуры, характерная для грибовидных течений. Линия фронта также нанесена на радиолокационном изображении.

Основными особенностями поля контрастов РЛ изображений являются:

- ступенчатообразные отрицательные контрасты РЛ сигнала;
- сильные положительные контрасты;
- три локализованные области отрицательных контрастов.

Видно, что положительные контрасты РЛ изображения находятся под облачным покровом и, очевидно, связаны с порывами ветра при процессах облакообразования. "Ступенчатообразные" отрицательные РЛ контрасты привязаны к линии фронта. При этом холодные воды проявляются в виде пониженного обратного рассеяния радиоволн. Отметим, что перепад температуры относительно небольшой, но, тем не менее, фронт идентифицируется в РЛ изображении. Для выяснения происхождения локализованных областей отрицательного РЛ контраста, они нанесены в виде контуров на поле поверхностной температуры.

Как следует из рис.3 две нижние области ложатся на периферию грибо-

видного течения. Одна из них точно попадает на локальную область пониженной температуры, а другая, включая в себя симметричную холодную область, тем не менее охватывает большее пространство и распространяется вдоль линии фронта. Источником отрицательных РЛ контрастов могут являться поверхностно-активные вещества. Эти ПАВ выносятся течениями из северо-западной части Черного моря (грибовидное течение является одним из элементов этой системы течений) и концентрируется в зонах конвергенции как в центрах круговоротов грибовидного течения, так и в "вытянутой" вдоль фронта конвергентной зоны. Третья (или северная) локализованная область отрицательного РЛ контраста концентрируется в центре стационарного круговорота образующегося при "обтекании" Основным Черноморским течением Крыма. Центр этого круговорота является зоной конвергенции где скапливаются загрязняющие вещества, которые попадают в ОЧТ при его прохождении вдоль южного берега Крыма.

Таким образом, совместный анализ поля поверхностной температуры и РЛ изображения с привлечением известных сведений об особенностях циркуляции моря позволяет дать интерпретацию РЛ контрастов. Окончательное заключение об идентификации текущих мезомасштабных особенностях может быть сделано лишь при условии повторения РЛ контрастов в серии последовательных изображений, выполненных во временном интервале, превышающем масштаб атмосфер-

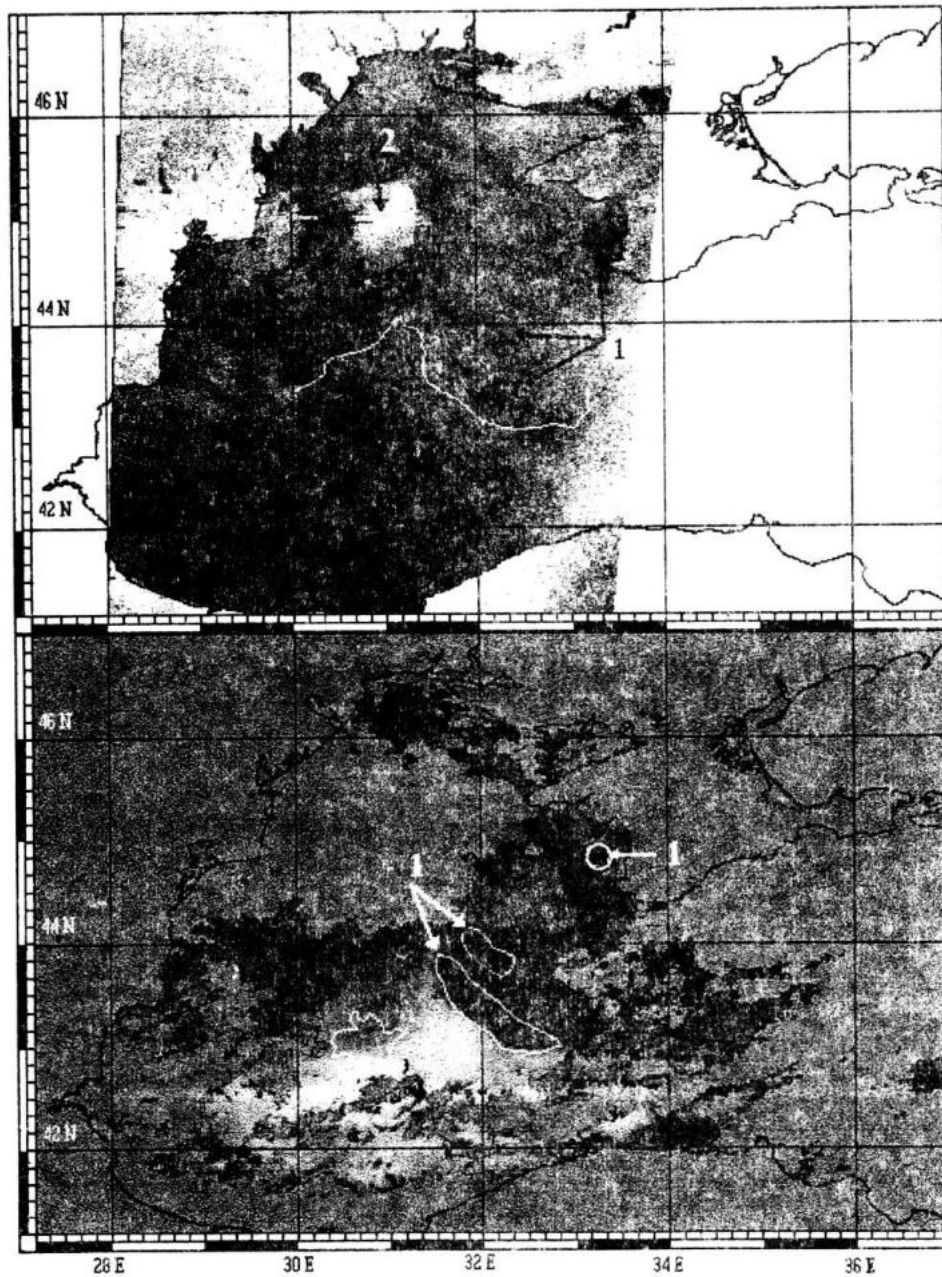


Рис.3. РЛ (сверху) и ИК (снизу) изображения Черного моря. На ИК изображении теплая вода соответствует светлому тону, холодная – темному; равномерный серый цвет – облака и суша. Белая кривая на РЛ изображении – линия температурного фронта; замкнутые кривые на ИК изображении – локальные зоны отрицательного РЛ контраста. Цифра 2- шквалы ветра.

ной изменчивости, но находящимся внутри масштаба изменчивости моря.

Заключение

Использование информации РЛСБО, установленной на ИСЗ дает возможность решать широкий круг задач в интересах Украины. По возможностям интерпретации радиолокационных данных на мезо- и синоптических масштабах, РЛСБО не уступает зарубежным радиолокаторам. При этом несомненными достоинствами РЛСБО являются большая полоса обзора и возможность приема и обработки информации практически в реальном масштабе времени.

Вследствие своей уникальности, РЛСБО необходимо рассматривать как элемент международной космической наблюдательной системы. Комплексирование результатов синхронных РЛ зондирований в рамках единой спутниковой системы позволяет совместить глобальность обзора поверхности моря и суши, присущую украинским РЛСБО и детальность просмотра отдельных участков при использовании данных зарубежных SAR.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального космического агентства Украины: контракты №2-15/00-МГИ и №2-15/00-ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

Г.А.В.Родин, В.Н.Кудрявцев, В.В.Малиновский (1997). Идентификация фронтальных разделов в океане по данным радиолокационного зондирования с ИСЗ серии "Океан". Приложение

к промысловой разведке рыб. В кн. "Дистанционные методы мониторинга промысловых районов Мирового океана", ВНИРО, с. 33-62.

2. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Родин А.В. (1999). Проявление температурных фронтов в радиолокационных изображениях океана. ИЗК, № 6, с.23-33.

3. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В., Кудрявцев В.Н. (1998) Использование информации РЛСБО ИСЗ "Січ-1" для наблюдения Черного и Азовского морей". В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, с.162-173.

4. Korotaev G.K., Grodsky S.A., Malinovsky V.V., Pustovoytenko V.V. et al. (1998). Development of Remote Sensing of Seas and Oceans in Space Research in Ukraine 1994-1997, NSAU, Kyiv. pp. 44-57

5. В.В.Малиновский, В.В.Пустовойтенко. Радиолокационные наблюдения мезомасштабных особенностей приводного ветра (1999).- В сб. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ, с.142-146.

6. В.В.Пустовойтенко, В.В.Малиновский (1998). Некоторые особенности обработки информации спутниковой радиолокационной станции бокового обзора ИСЗ "Січ-1". Морской гидрофиз. журнал, №3, с.70-77.