

УДК.528.87:551.46(262.5)

О. Р. Андрианова, А. А. Батырев, М. И. Скипа, А. В. Сриберко

Відділення гідроакустики Морського гідрофізичного інституту НАН України, Одеса

Подспутниковая заверка и интерпретация данных космической съемки морской поверхности

Надійшла до редакції 20.05.04

Отримані результати адаптації даних супутникових спостережень щодо реальних умов морського середовища на прикладі північно-західної частини Чорного моря. Статистичні оцінки зв'язку супутникових спостережень та контактних вимірів температури води дозволили встановити кореляційні залежності та отримати регресійні рівняння (коефіцієнт кореляції 0.75). Також позначено, що ці рівняння можуть використовуватися на практиці при створенні системи дистанційного контролю стану вод.

При современном уровне развития технологий в методике исследования и контроля состояния Земли на передний план выходят дистанционные методы наблюдений, которые позволяют проводить мониторинг и отслеживать динамику процессов, происходящих на земной поверхности. К числу таких методов относятся спутниковое дистанционное зондирование Земли [5, 8, 9] и акустическое прозвучивание [2, 3]. Исследование и контроль состояния морской среды являются важной частью этой задачи и также могут успешно решаться с помощью дистанционных методов. Используя спутниковое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), мы получаем оперативные спутниковые наблюдения отдельных параметров процессов на морской поверхности, покрывающие значительные пространства, а в случае акустического прозвучивания — интегральную информацию о слое воды, расположенном в диапазоне прозвучивания. Таким образом, синхронное применение различных дистанционных методов — спутниковых наблюдений и акустического прозвучивания обеспечивает получение непрерывных оперативных данных о состоянии на поверхности и в толще вод для больших морских просторов, что позволяет проводить оценку тепломассопереноса в морском регионе. Однако при использовании данных, полученных дистанционными методами, возникают задачи идентификации результатов наблюдений, их калибровки и привязки к реальным условиям контролируемых объектов [9].

Так, при создании методики дистанционного контроля состояния морской среды с применением спутниковых наблюдений и данных акустического прозвучивания возникает сразу несколько адапционных задач. Это, во-первых, идентификация спутниковых данных, то есть их калибровка и привязка к реальному состоянию поверхностного слоя морской среды, во-вторых — восстановление гидрофизической структуры моря в слое между поверхностью и прозвучиваемым горизонтом по результатам дистанционных измерений, в-третьих — прогнозирование особенностей состояния вод в сопредельных с областью прозвучивания районах. Подобные задачи возникают при организации непрерывного мониторинга в любом регионе Мирового океана, и поэтому их решение может быть положено в основу создания методики организации региональных дистанционных мониторингов с привлечением горизонтального гидроакустического зондирования. Эти задачи, в свою очередь, могут быть решены поэтапно, в зависимости от начальных условий. Кроме того, представляются целесообразными отдельные исследования по общим проблемам, результаты которых можно затем использовать для решения сформулированных задач. В частности, к таким проблемам относятся: необходимость выделения зон прозвучивания, согласованных с траекториями спутниковых измерений, изучение особенностей распределения гидрофизических характеристик по трассам прозвучивания,

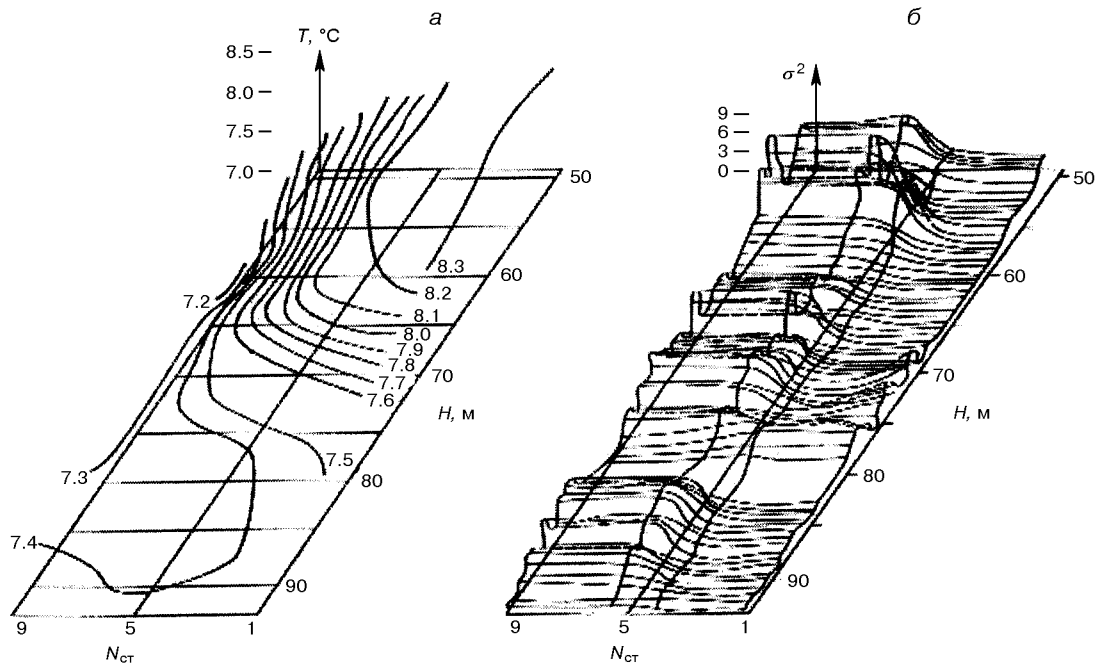


Рис. 1. Распределение температуры воды (а) и величины дисперсии амплитуд эхо-сигналов (б)

определение положения оптимальных топологических точек, по которым можно наиболее эффективно прогнозировать структуру вод и т. д. Имитационные модели, основанные на данных статистического анализа фактических результатов измерений (дистанционных и контактных), служат теоретической основой при решении этих задач.

Использование данных акустического зондирования показано на примере оконтуривания области мезомасштабных вихрей, отличающихся характерным распределением температуры воды (рис. 1, а) [3]. Дисперсия амплитуды эхо-сигналов (рис. 1, б), получаемых при акустическом зондировании, существенно зависит от расположения зондируемой области относительно центральной и периферической частей вихря (при зондировании периферической части вихря величины регистрируются существенно больше, чем при зондировании его центра). Послойный анализ этой акустической характеристики дал возможность выявить горизонты, на которых наблюдается наиболее активная генерация тонкой структуры и качественно оценить интенсивность протекающих здесь обменных процессов.

Многочисленные попытки скорректировать факторы, затрудняющие исследования при дистанционном спутниковом зондировании (прежде всего влияние атмосферы и излучающую способность подстилающей поверхности), базировались на различных решениях задачи калибровки спутниковых из-

мерений температуры поверхностного слоя Мирового океана [6, 7]. Нелинейные методы определения температуры основывались на интерпретации спутниковых данных с поверхности моря, путем учета атмосферного ослабления измеряемого со спутника излучения, вызванного поглощением водяным паром, аэрозолем и другими компонентами атмосферы, а также возможным наличием облачности в поле зрения прибора [7]. Методы калибровки спутниковых радиометрических измерений микроволнового диапазона, учитывающие разницу между температурой скин-слоя воды и температурой, измеряемой контактными датчиками на глубине 0.5—2 м [6] предлагают использовать двухканальные измерения в ИК-диапазоне. Даже этот небольшой обзор показывает, что лишь комплексный анализ данных синхронных измерений (численных значений параметров среды), как непосредственных контактных измерений параметров водной поверхности, так и спутниковых наблюдений, может привести к построению методики дистанционного контроля морской среды, обеспечивающей необходимую точность.

Как одна из частных задач, переходящих в общую, нами была рассмотрена задача адаптации данных спутниковых наблюдений к реальному состоянию поверхностного слоя моря по измерениям температуры воды на примере северо-западной части Черного моря. Целью являлось изучение воз-

возможности использования данных ДЗЗ для контроля состояния морской среды и построение методики калибровки данных спутниковых наблюдений. Решение этой задачи дает возможность дальнейшего использования таких данных в прогностических моделях и для экологического контроля.

Исходными данными для анализа послужила информация о поверхностной (радиационной) температуре воды в северо-западной части Черного моря по спутниковым измерениям, полученная по двум съемкам 14 и 21 мая 1992 г. с американского метеорологического спутника NOAA (рабочий диапазон частот 1670—1710 МГц, разрешение на местности 1,1 км), предоставленная нам Ю. П. Ильиным (МГИ НАН Украины). Использовались данные, полученные с 4-го канала ИК-радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) на волне $\lambda = 10.8$ мкм (AVHRR позволяет производить измерения в пяти спектральных диапазонах: $\lambda\lambda$ 0.58—0.68, 0.725—1.0, 3.55—3.93, 10.3—11.3, 11.4—12.4 мкм). Карта покрытия спутниковыми наблюдениями рассматриваемого района Черного моря представляет собой сетку с координатами: от 30.0° до 33.5° в. д. и от 44.5° до 46.5° с. ш. Пространственная дискретность данных спутниковых измерений составляла 0.017° по широте и 0.025° по долготе.

Данные контактных измерений температуры воды получены в это же время и в этом же регионе на стандартных горизонтах в экспедициях, выполненных научно-исследовательскими судами «Я. Гаккель» (39 рейс) и «Трепанг» (10 рейс) с помощью глубоководных опрокидывающихся термометров, точность которых от 0.01 °С до 0.001 °С. Их пространственное расположение представляет собой сетку с координатами от 30.0° до 31.5° в. д. и от 45.0° до 46.5° с. ш. Для получения сопоставимых данных была проведена работа по синхронизации выбираемых для анализа материалов по времени и пространству.

Оценка связи спутниковых наблюдений и контактных измерений температуры воды на примере северо-западной части Черного моря проводилась на основе статистических методов анализа путем установления корреляционных и регрессионных зависимостей [4]. При решении поставленной задачи из всех сопоставляемых данных была сделана выборка станций, которые составили сетку с шагом 0.25° по долготе от 30.0° до 31.0° в. д. и 0.17° по широте от 45.17° до 45.67° с. ш. В узлах этой сетки расположены соответствующие значения спутниковых и контактных измерений (рис. 2). Значения коэффициентов корреляции, рассчитанных для оценки степени соответствия данных спутниковых

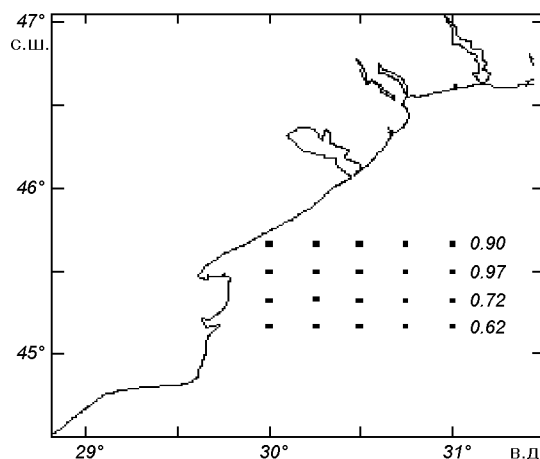


Рис. 2. Карта расположения анализируемых станций и значения коэффициентов корреляции между спутниковыми и контактными измерениями по каждому ряду

наблюдений и контактных измерений температуры воды, также приведены на рис. 2.

Величины коэффициентов корреляции позволяют утверждать, что задача калибровки данных спутниковых наблюдений по контактными измерениям имеет решения, которые могут применяться на практике. Для их определения построим регрессионное уравнение, которое связывает спутниковые наблюдения и контактные измерения. Представим нашу сетку синхронных станций в виде матрицы; данные в узлах сетки будут являться элементами этой матрицы. Поэлементно прокоррелируем матрицы данных спутниковых наблюдений и контактных измерений. В результате вычислений получаем коэффициент корреляции 0.75. Вероятная ошибка коэффициента корреляции вычисляется по формуле $E_R = \pm 0.674 (1 - R^2) / \sqrt{N}$ и составляет 0.07, где R — коэффициент корреляции, N — число членов ряда. Отношение $R/E_R = 10.7$, что позволяет утверждать о достоверности коэффициента корреляции [1]. Исходя из этих статистических расчетов, построим уравнение линейной регрессии, по которому можно восстанавливать поверхностную температуру моря на основе спутниковых наблюдений. Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$y = 0.4558x + 11.222$$

Это уравнение описывает связь между спутниковыми наблюдениями (x) и контактными измерениями поверхностной температуры моря (y). Оправдываемость уравнения составляет 76 %. Критерием для оценки оправдываемости восстановленной температуры поверхности моря является коэффициент $\pm 0.674\sigma = 0.38$, где σ — среднее квадратичное

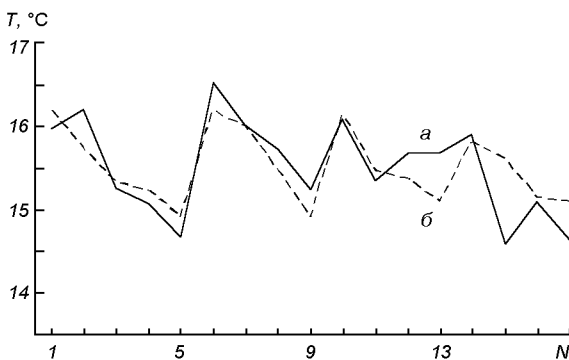


Рис. 3. График пространственного хода поверхностной температуры воды по данным контактных измерений (а) и восстановленным значениям (б)

отклонение. Представленные на рис. 3 графики пространственного хода поверхностной температуры воды по данным контактных измерений (сплошная линия) и восстановленным значениям (штриховая линия) свидетельствуют об их тесном соответствии.

Полученные результаты адаптации данных спутниковых наблюдений к реальным условиям морской среды и проведенные оценки их связи показывают, что этот подход позволяет восстанавливать фактическую температуру поверхностного слоя воды и может быть использован в качестве инструмента при построении модели дистанционного контроля состояния вод.

Дальнейшей перспективой развития методики дистанционного контроля состояния вод является выбор оптимальных топологических точек для проведения непрерывных контактных измерений и привязка к ним соответствующих данных спутниковых наблюдений для получения карты пространственного распределения поверхностной температуры. Результаты акустического прозвучивания по трассам, также связанным с топологическими точками, позволят получить представление о структуре и динамике процессов в толще вод.

1. Абузьяров З. К., Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские прогнозы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988.—319 с.
2. Акустика океана: современное состояние / Под ред. Л. М. Бреховских, И. Б. Андреевой. — М.: Наука, 1982.—246 с.
3. Андрианова О. Р., Холопцев А. В. О возможности исследования мезомасштабных вихрей с помощью акустического зондирования // Акустический журн.—1994.—4, № 1.—С. 134—136.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974.—464 с.
5. Бычкова И. А., Викторов С. В., Виноградов В. В. Дистанционное определение температуры моря. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988.—233 с.
6. Трохимовский Ю. Г., Кравцов Ю. А., Кузьмин А. В., Медведев А. П. Учет термического профиля поверхностной температуры океана при проведении спутниковых радиометрических измерений в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 5.—С. 3—9.
7. Успенский А. Б., Соловьев В. И. Современное состояние и перспективы развития дистанционных методов определения температуры поверхности океана из космоса // Исследование Земли из космоса.—1998.—№ 1.—С. 102—112.
8. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г. Имитационное моделирование космических исследований ДЗЗ: постановка задачи и пути решения // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 83—88.
9. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконеко С. А. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов с использованием Марковской модели изображений // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 80—84.

UNDERSATELLITE AUTHENTICATION AND INTERPRETATION OF THE DATA OF SPACE SURVEYS OF A SEA SURFACE

O. R. Andrianova, A. A. Batyrev, M. I. Skipa, A. V. Striberko

Results of the adaptation of the satellite data to the real conditions of the sea environment are received on the example of the northwest part of the Black sea. Statistical estimations of the correlation between the satellite data and contact measurements of the water temperature allow to establish correlation and regression dependences (correlation is 0.75). It is marked, that the designed equations can be used in practice for creation of the system for the remote control of the waters condition.