

**АППАРАТНО-
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

*Т.М.Баянкина, С.В.Бородин
В.М.Бурдюгов, Е.И.Калинин,
Д.М.Соловьев, В.В.Пустовойтенко*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: odmi@alpha.mhi.iuf.net

Рассмотрен аппаратно-программный комплекс обработки спутниковой информации, используемый при мониторинге акватории Черного и Азовского морей. Комплекс предназначен для обработки снимков морской поверхности, получаемых в тепловом ИК-диапазоне с помощью сканеров AVHRR КА NOAA. Конечным информационным продуктом комплекса является карта температуры поверхности Черного и Азовского морей. Обсуждаются подходы к его аттестации.

Введение. На современном этапе развития общества человечество пришло к пониманию необходимости регулярного контроля (мониторинга) параметров окружающей среды, с тем, чтобы адекватно реагировать на возможные неблагоприятные последствия антропогенного воздействия на природу. Конечной целью любого мониторинга является обеспечение устойчивого развития регионов и созданием благоприятных условий для существования населения.

В настоящее время при мониторинге прибрежных морских зон и внутренних водоемов для контроля параметров окружающей среды используют традиционные методы наблюдений. Новые же, основанные на использовании возможностей космических технологий, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) пока еще не находят своего широкого применения.

Среди основных причин такого положения можно назвать следующие:

— недостаточная оперативность получения спутниковой информации, предоставляемой отечественными космическими системами (КС) получения и распространения информации;

— слабая осведомленность потенциальных потребителей о возможностях спутни-

ковых средств и методов дистанционного зондирования;

— отсутствие у потенциального потребителя данных о метрологических свойствах получаемой информации.

Статья знакомит исследователя-океанолога с возможностями спутниковых технологий в приложении к задачам, связанным с мониторингом акватории Азово-Черноморского бассейна и, в частности — в приложении к задаче мониторинга поля температуры морской поверхности (ТМП).

Спутниковые средства мониторинга. В настоящее время существует широкая гамма средств ДЗЗ, обеспечивающих возможность получения информации о состоянии морских акваторий. К их числу относятся:

— радиометры, сканирующие и трассовые, работающие в видимом, инфракрасном (ИК-) и сверхвысокочастотном (СВЧ-) диапазонах;

— радиолокационные системы (скаттерометры, альтиметры, радиолокационные станции бокового обзора с реальной и синтезируемой апертурой приемной антенны, работающие в сантиметровом диапазоне радиоволн.

Первые из них регистрируют интенсивность собственного излучения подстилающей поверхности или переотраженного ею солнечного излучения. Вторые — регистрируют интенсивность переотраженного поверхностью посылаемого ими зондирующего сигнала.

В зависимости от целевого назначения названные средства и системы ДЗЗ различаются между собой по величине пространственной разрешающей способности, по ширине полосы обзора подстилающей поверхности, по возможной периодичности съемки одного и того же района, по возможности регулярного оперативного получения информации и другим параметрам.

Различаются они и по принципам организации работ. Так, одни системы ДЗЗ работают непрерывно, обеспечивая возможность приема информации любым потребителем, имеющим в своем распоряжении приемную станцию. По такой схеме, как правило, работают метеорологические системы ДЗЗ. Другие — осуществляют выборочную съемку поверхности по заявкам потребителей с передачей (сбросом) информации на сеть приемных пунктов, обслужи-

вающих КС. При этом информация доводится до потребителя через структуры КС. По такой схеме работают, например, КС "Океан-01", "Січ" и другие. К сожалению, как показывает имеющийся у нас практический опыт, оперативность получения информации при организации работы по такой схеме оставляет желать лучшего.

Часть КС (коммерческих) требует приобретения у оператора системы лицензии. По такой схеме, например, осуществлялась работа с информацией, получаемой с помощью сканера *SeaWiFS*.

Наиболее доступной, с точки зрения оперативного мониторинга акватории Азовского и Черного морей в настоящее время является информация, передаваемая с борта метеорологических космических аппаратов (КА) КС *NOAA*. Они снабжены мультиспектральным сканирующим радиометром высокого разрешения *AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)*, работающим в видимом и ИК-диапазонах. КА запускаются на солнечно-синхронные полярные орбиты высотой порядка 850 км над поверхностью Земли с наклоном около 98° (период обращения — около 101 мин). Съемки проводятся с пространственным разрешением 1,1 км (в надире) в полосе обзора шириной около 2700 км.

Для передачи получаемых изображений используются два радиоканала. Радиоканал, работающий в частотном диапазоне 137 МГц, обеспечивает передачу информации двух каналов сканера в аналоговом виде с пониженным пространственным разрешением (~ 4 км) в формате *APT (Automatic Picture Transmission)*. Радиоканал, работающий в частотном диапазоне 1,7 ГГц, обеспечивает возможность передачи полного потока информации в цифровом виде в формате *HRPT (High Resolution Picture Transmission)*. Изображения передаются с радиометрическим разрешением 10 бит, что обеспечивает передачу 1024 градаций яркости в каждом диапазоне. Возможность свободного приема спутниковой информации потребителями, имеющими в своем распоряжении приемные станции, работающие в указанных диапазонах радиоволн, наземными станциями обеспечивается Всемирной Метеорологической Организацией согласно концепции "Открытого неба".

Станция приема спутниковой информации МГИ НАН Украины. С целью

обеспечения возможности оперативного приема спутниковой и сопутствующей гидрометеорологической информации в МГИ НАН Украины был создан комплекс технических средств (КТС) приема и обработки данных [1, 2], первоначально обеспечивавший прием спутниковой информации, передаваемой в частотном канале 137 МГц.

В последующем КТС был дополнен каналом приема информации, передаваемой с борта метеорологического КА *METEOSAT* (частотный диапазон 137 МГц), каналом приема информации, передаваемой с борта орбитальных спутников в *HRPT*-формате (частотный диапазон 1,7 ГГц) и каналы приема метеорологической информации, передаваемой в коротковолновом диапазоне радиоволн [3]. В последние годы комплекс дополнен средствами приема данных через сеть *Internet*.

Наиболее сложной и наиболее совершенной является станция приема спутниковой информации, передаваемой с борта орбитальных спутников *HRPT*-формате. Она создана при поддержке Национальной Академии наук Украины и Национального космического агентства Украины. Технические параметры станции обеспечивают возможность наблюдения района земной поверхности от северного побережья Африки на юге до Новой Земли на севере и от Уральских гор на востоке до средиземноморского побережья Испании на западе.

Основными функциональными узлами станции являются: следающая антенная система, приемное устройство, ПЭВМ управления, приема и обработки данных, ПЭВМ управления антенной системой, декодер-интерфейс, система точного времени, построенная на основе приемников-компараторов, система электропитания.

В станции реализован программный принцип управления антенной системой при сопровождении КА во время сеанса приема данных. Соответствующие файлы с данными о положении оси диаграммы направленности антенны рассчитываются с помощью прикладного пакета *TRAKSAT* и передаются в ПЭВМ управления антенной системой в соответствии с циклограммой работы станции.

Приемное устройство станции имеет три фиксированных частотных канала, настроенных на частоты передатчиков, используемых на КА *NOAA*.

Декодер-интерфейс станции обеспечивает выборку из полного потока данных информации каналов сканера *AVHRR* и выполняет некоторые функции управления системами станции.

Синхронизация работы систем станции осуществляется ПЭВМ управления, приема и обработки данных. Привязка работы к шкале единого времени обеспечивается приемниками-компараторами.

Работа станции автоматизирована, при этом на оператора возлагаются подготовка программ включений станции на несколько суток вперед и периодическая передача файлов через локальную вычислительную сеть (ЛВС) из ПЭВМ приема и предварительной обработки данных на ПЭВМ тематической обработки данных.

Система обработки спутниковых и опорных данных. Система обработки спутниковых и опорных данных является промежуточным звеном между средством ДЗЗ и океанологом. Ее характеристики определяются как характером обрабатываемых данных, так и требованиями потребителей к удобству работы и наглядности представления получаемых результатов. В институте для обработки спутниковой информации наряду с использованием специализированных программных продуктов, таких как *SeaDAS*, *ERDAS Imagine*, *HRPT Reader* и других, широко применяются программные комплексы собственной разработки, в полной мере учитывающие специфику региона, специфику наблюдения морских акваторий и другие требования.

ПК предварительной обработки информации. ПК обеспечивает выполнение всех типовых операций предварительной обработки данных, таких как: распаковка данных и формирование информационных массивов; радиометрическая коррекция данных; устранение сбивных пикселей и строк; географическая (координатная) привязка снимков; формирование и наложение на изображения разнообразных масок (море, суша и т.д.); трансформация снимков в требуемую географическую проекцию и ряд других.

ПК тематической обработки информации. ПК тематической обработки информации обеспечивает непосредственно расчет параметров морской поверхности, таких как: параметры поля течений в акватории Черного моря; параметры поля температуры морской поверхности; параметры поля

цвета морской воды и оценки биологической продуктивности вод; параметры поля ветра над акваторией Азовского и Черного морей; расположение и эволюция в пространстве и времени пленок поверхностно-активных веществ ряд других.

Сосредоточение в МГИ НАН Украины средств приема и обработки спутниковой информации, объединение специалистов в области морских наук и технологий, в области радиофизики и радиолокации и ряда других специальностей позволяет обеспечить высокую оперативность тематической обработки данных (так, например, карты температуры морской поверхности выставляются на *Web*-сайте через 30–40 минут после выполнения съемки), квалифицированно интерпретировать получаемую информацию и усваивать ее в диагностических и прогностических моделях морских акваторий.

Программный комплекс "Картографирование температуры морской поверхности". Созданный ПК обеспечивает возможность автоматической обработки снимков Азовского и Черного морей, представленных в виде цифровых файлов в формате *L1B LAC* с разрядностью 16 бит, загружаемые с сайта www.class.noaa.gov, в виде файлов в формате *"*.hgr"*, принимаемые национальными техническими средствами, а также в виде цифровых файлов, принимаемых станцией приема спутниковой информации МГИ НАН Украины.

Конечным информационным продуктом ПК являются карты ТМП Азовского и Черного морей, представленные в виде карты в цилиндрической проекции с постоянным шагом по долготе и широте.

При расчете параметров поля ТМП необходимо решить три основные задачи:

— определить рабочие характеристики измерительных каналов сканера и с их помощью преобразовать выходной сигнал в радиационную температуру наблюдаемой поверхности;

— отфильтровать участки поверхности, закрытые облачностью;

— учесть влияние земной атмосферы.

Отметим, что контроль параметров сканеров *AVHRR* в период их эксплуатации осуществляется службами *NOAA* и информация об их изменениях систематически сообщается путем ее размещения на сайтах.

Примененный нами в ПК "Картографирование температуры морской поверхности"

алгоритм основан на использовании рекомендованной NOAA [4] двухканальной методики восстановления температуры подстилающей поверхности (*MCSST — Multi Channel Sea Surface Temperature*). Для расчета ТМП используются данные, получаемые в 4-ом и 5-ом каналах сканера AVHRR (длины волн 10,3 - 11,3 и 11,5 - 12,5 мкм соответственно). Для отбраковки облачных участков используются данные об альбедо подстилающей поверхности, получаемые во 2-ом канале сканера (длина волны 0,725–1,1 мкм). Для селекции облачности нами используется процедура выделения по пороговому критерию в ИК- и оптическом каналах.

Отметим, что выбор способа фильтрации (распознавания) облачности весьма важен, поскольку облачность, даже очень слабая, может существенно исказить результаты определения ТМП.

Использование процедур регрессионного попиксельного расчета ТМП приводит к существенному мультипликативному увеличению шумов в получаемых картах. В отличие от других известных методик обработки спутниковых изображений, мы применили сглаживание "атмосферной" части уравнения регрессии, что позволяет заметно улучшить качество карт ТМП. Рассмотрение сути использованного способа сглаживания выходит за рамки статьи.

Географическая (координатная) привязка получаемых карт полей ТМП осуществляется автоматически, по известным данным о движении ИСЗ, содержащимся на сайтах NOAA. С целью упрощения вычислительных алгоритмов при расчетах координат элементов изображения поверхности предполагается, что КА движется по круговой орбите, а земная поверхность является идеальным шаром. Для минимизации возникающих при этом ошибок при оперативном мониторинге необходимо регулярно обновлять файл "noaa.txt", дата создания которого не должна отличаться от даты проведения съемки более чем на 5 суток. Файл загружается с сайта NOAA <http://celestrak.com/NORAD/elements/noaa.txt>.

После координатной привязки ПК формирует карту ТМП, которая для Азово-Черноморского бассейна охватывает область от 27° в.д. до 42° в.д. и от 40° с.ш. до 48 с.ш. Элемент разрешения на карте имеет практически квадратную форму (размер стороны квадрата — 1,1 км). Размер карты

1051 × 801 элементов. Поскольку при расчете данные из изображения наблюдаемой поверхности помещаются в ближайший к каждому элементу узел сетки карты, для больших углов наблюдения неизбежно появляются пропуски информации. Заполняются они путем двумерной линейной интерполяции.

Последним этапом в работе ПК является наложение на карту масок суши и облачности, координатной сетки и бланка береговой черты (используется бланк, сформированный программным пакетом *GEBCO* и имеющий среднеквадратичное отклонение от реальной конфигурации береговой черты не более 150 м).

Проблемы аттестации методики картографирования ТМП. На современном этапе развития морских наук и технологий все шире применяются методы дистанционных (косвенных) измерений. Основным фактором, определяющим точность измерений, становятся не аппаратурные, а методические погрешности, обусловленные неточностью рабочих уравнений (моделей), связывающих измеряемые величины с параметрами морской поверхности, неточностью или непостоянством коэффициентов этих уравнений и другими причинами. В результате, при оценке суммарной погрешности измерений становится невозможно опираться на приводимые в документации метрологические характеристики используемых средств измерений. В таких условиях особую актуальность приобретает метрологическая аттестация методик выполнения измерений (МВИ).

Задача аттестации методики картографирования температуры морской поверхности существенно усложняется существующими проблемами физического и методического плана. Дело в том, что, строго говоря, дистанционные и контактные средства измерения ТМП измеряют температуру в разных слоях воды — тепловое излучение формируется тонким слоем воды (для ИК-диапазона его толщина составляет единицы микрон), а отбор проб воды при измерении температуры традиционными в океанографии способами осуществляется с больших глубин. Не решают эту проблему и буксируемые измерители температуры, поскольку их буксировка также осуществляется на большей глубине.

Известно, что температура верхнего слоя воды, ответственного за формирование

теплового излучения в ИК- и СВЧ-диапазонах может заметно, до (1-2) °С и более [5], отличаться от температуры примыкающих к нему слоев воды. Для поля ТПМ характерна и горизонтальная неоднородность — разность ТМП на пространственных масштабах около (0,1-10) км может достигать нескольких долей градуса [6], что создает проблемы при сопоставлении между собой данных точечных (контактных) и дистанционных (интегральных по большой площади) измерений ТМП.

Наконец, среди проблем, осложняющих сопоставление между собой контактных и дистанционных данных о ТМП, следует упомянуть существование дневного прогрева морской воды, что требует максимальной синхронности проведения контрольных и спутниковых измерений.

Названные и другие причины факторы не позволяют рассчитать параметры теплового излучения поверхности для произвольной точки акватории в любой момент времени. Поэтому одним из вариантов метода аттестации МВИ при картографировании температуры морской поверхности представляется метод непосредственного сличения, предусматривающий параллельное измерение ТМП с использованием аттестуемой методики и с помощью образцовых методов и средств. Скажем, использование аттестованного эталона в виде авиационного ИК-радиометра позволило бы исключить (или, по крайней мере, существенно снизить) влияние вертикальной и горизонтальной неоднородности поля ТМП и заменить измерения в отдельных точках акватории измерениями вдоль трассы спутника [7].

В связи с невозможностью проведения в настоящее время подобных измерений нами при практической отработке методики в качестве эталонных данных использованы результаты измерений ТМП морской воды на глубине около 25 см от поверхности, проводимых в акватории Черного моря с помощью SVP-дрифтеров (*Surface Velocity Program*) [8]. Прием информации и определение координат буев осуществляется с помощью аппаратуры ARGOS, устанавливаемой на борту КА NOAA

Выводы. Развита аппаратно-программный комплекс приема и обработки спутниковой информации. Созданы методика оперативного картографирования температуры морской поверхности Азовского и Черного морей и создан реализующий ее ПК.

Валидация методики показала, что среднеквадратическая погрешность измерения ТМП не превышает 0,8°С, погрешность координатной привязки — не более 10 км. ПК передан в опытную эксплуатацию в составе наземного специального комплекса КС "Січ".

Работа выполнена при поддержке НАН Украины — проект "Спутниковая океанология", и НАУ — проект "Космокарта".

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин Г.А., Иванчик М.В., Ильин Ю.П. и др. Дистанционный мониторинг Черного моря в экспериментальном режиме. — Севастополь, 1989. — 54 с. — (Препринт / АН УССР. МГИ).
2. Гришин Г.А., Калинин Е.И., Абрамсон Г.А. и др. Программно-аппаратный комплекс приема и обработки спутниковых и опорных данных и его использование для мониторинга гидрометеорологических полей // Морской гидрофизический журнал. — 1997, № 5. — С. 32 — 40.
3. Коротаев Г.К., Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н. Информационные ресурсы космического экологического мониторинга морских акваторий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика. — 2004, вып.11. — С.198 — 212.
4. Lauritson L., Nelson G.J., Porto F.W. Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers. NOAA Tech. Memo. NESS 107. Washington, D.C.: NOAA, 1979.
5. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. — Л.: Гидрометеоиздат. — 1985. — 376 с.
6. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. — Л.: Гидрометеоиздат. — 1981. — 320 с.
7. Терехин Ю.В. Опыт анализа наблюдений на черноморском контрольно-калибровочном полигоне в связи с интерпретацией данных ИСЗ "Космос-1500" // Исследование Земли из космоса. — 1985. — №4. — С. 116 — 123.
8. Мотыжев С.В., Еремеев В.Н., Лунев Е.Г. и др. Особенности дрейферного мониторинга Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь, ЭКОСИ-Гидрофизика. — 2004, вып.11. — С. 122 — 131.