Построение композиционных карт температуры поверхности океана, ориентированных на сохранение термических структур

С.Е. Дьяков¹, В.А. Качур^{1,2}

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН г. Владивосток, 690041, Россия E-mail: sergdkv@gmail.com ² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия

В работе рассматриваются проблемы построения всепогодных композиционных карт температуры поверхности океана (ТПО) по спутниковым данным в инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра. Предлагается подход к построению карт ТПО, ориентированных на сохранение термических фронтов. Данный подход использует робастные (медианные) оценки значений температуры по разнородным данным и применение процедур дополнительной статистической фильтрации облачности на исходных изображениях на основе карт пространственной и временной изменчивости значений ТПО. Описывается процедура построения карт пространственной и временной изменчивости. Рассматриваются особенности выбранного подхода, предлагается технология для его реализации. Проводится сравнение точности расчетов композиционных дневных и ночных карт ТПО на серии из 20 изображений за 2013 г. Показано, что очертания термических структур достаточно хорошо сохраняются на полученных однодневных и трехдневных композиционных картах, значимые систематические отклонения от данных непосредственных измерений отсутствуют, точность карт составляет 0,7°С, приводятся оценки точности однодневных композиционных карт.

Ключевые слова: температура поверхности океана, композиционные карты ТПО

Одобрена к печати: 09.03.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-84-94

Введение

Облачность является основным препятствием для ежедневного мониторинга температуры поверхности моря (ТПО) средствами спутникового зондирования в ИК-диапазоне спектра. Это осложняет наблюдение за расположением термических структур (вихрей, струй, апвеллингов) в океане с помощью данных полярно-орбитальных спутников. Поэтому для наблюдения за температурой поверхности океана используются композиционные карты ТПО – объединения нескольких спутниковых изображений, в которых данные, отсутствующие на одном снимке, восполняются данными с других снимков.

Построению композиционных карт посвящено значительно количество работ (May et al., 1998; Martin et al., 2012; Reynolds, Smith, 1994; Sakaida et al., 2009) в силу актуальности данной проблемы. В настоящее время для построения композиционных карт TПО применяется простое осреднение данных (так делается в проекте NOAA/NASA Pathfinder (Casey, Cornillo, 1999)) или метод оптимальной интерполяции, используемый, например, в проекте New Generation Sea Surface Temperature – NGSST (Sakaida et al., 2009). Последний проект с некоторыми модификациями был использован также для создания высокоточных карт TПО GHRSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) (Chao et al., 2009). Для определения значения композиционной температуры в точке с указанными координатами оба метода используют взвешенное среднее измерений, полученных в окрестности данной точки в заданном временном интервале.

Существует несколько проблем, осложняющих построение высокоточных композиционных карт ТПО:

- 1. группы пикселей соответствующих облачности, ошибочно прошедших фильтрацию, могут существенно изменить величину оцениваемого композиционного значения;
- 2. перемещение вихрей, струй, появление апвеллингов приводит к «размыванию» линий термических фронтов на композиционных картах ТПО;
- в безветренных условиях верхний слой поверхности океана может прогреваться лучами Солнца на несколько градусов. Так как прогревается верхний слой поверхности океана, то такая температура не соответствует температуре на глубине в 1 метр и должна отфильтровываться.

Если необходимо наблюдать за термическими структурами поверхности океана, предпочтительным является использование других методов построения композиционных изображений, основанных на вероятностных оценках значения температуры (Kazansky, Goncharenko, 1994). При всей важности таких карт для анализа термических структур при решении проблем экологии, акустики, рыбного промысла они не получили широкого распространения. Можно выделить две проблемы при решении этой задачи. Основная – это появление ложных фронтов при стыковке температурных полей от разных спутников. Вторая причина – использование дополнительной фильтрации облачности по карте-эталону при фиксированном пороге отфильтровывает линии фронтов со значительными температурными градиентами.

Данная работа посвящена разработке технологии построения композиционных карт ТПО с сохранением термических фронтов. Такие карты, которые будем называть структурными композициями, должны сохранять четкие очертания синоптических объектов при более жесткой обработке некорректных пикселей

Создание структурных композиций ТПО

Исходные данные

Технология построения композиционных карт по данным метеорологических спутников Земли имеет следующую общую схему, подробно изложенную в работе (Sakaida et al., 2009).

- Создание карт ТПО по одиночным мультиканальным изображениям. Применяются общепринятые методики расчета ТПО по нескольким спектральным каналам (McMillin, Crosby, 1984; Pichel et al., 2001; Walton, 1998). Данные проходят фильтрацию облачности, алгоритмы которых детально изложены в работах (May, 1998; Ackerman, 1998; Stowe, 1995).
- Построение композиционных изображений за некоторый период времени. Практикуются однодневные композиционные карты за ночь и за день. Для этого используются различные процедуры оценки температуры в точке с учетом значений, полученных в окрестности точки.
- Фильтрация облачности по эталонной карте. Прошедшие фильтрацию облачности одиночные изображения содержат пиксели, искаженные облачностью, туманом

и дневным прогревом в штиль. Эталонные изображения – это изображения, созданные по заведомо верным одиночным температурным картам. Часто они имеют более грубое пространственное разрешение и строятся в основном по дневным изображениям. Фильтрация сводится к отбраковке пикселей со значениями, отклоняющимися от эталонной карты на фиксированную величину (2°C, например, в работе (Sakaida et al., 2006)).

Наиболее востребованные карты ТПО – это карты с пространственным разрешением в 1 км. В настоящее время существует значительное количество спутников, дающих информацию для их построения. В первую очередь это спутники POES NOAA и Metop с радиометрами AVHRR, Aqua, Terra, Suomi NPP, китайские спутники FY-3a, -2b, -3c, передающие информацию на частоте 1,7 Ггц данные в формате CHRPT, и являющиеся продолжением серии спутников FY-1c, -1d. При аккуратной калибровке (Алексанин и др., 2006) они также позволяют строить карты TПО, удовлетворяющие жестким требованиям к качеству TПО проекта GODAE (Donlon et al., 2007). Можно также использовать данные радиометра MCУ-MP спутника Метеор-1М. Несмотря на ряд недостатков радиометра, данные данного спутника можно привязать автоматически с пиксельной точностью (Katamanov, 2010) и построить алгоритм расчета TПО с нужной точностью.

Однако для построения выбранного нами типа композиционных карт этого недостаточно. Допустимая точность рассогласования в $0,8^{\circ}$ С приводит к появлению ложных фронтов из-за неточности калибровок, находящихся в допустимых пределах. Необходима более высокая точность – порядка $0,1^{\circ}$ С. С этой целью строятся рассогласования значений ТПО используемых спутников при разных атмосферных условиях. Атмосферные условия моделируются программным комплексом MODTRAN (Berk et al., 1999) на основе спектральных аппаратных функций ИК-каналов. Поэтому при построении карт ТПО из полярно-орбитальных спутников использовались только спутники серии POES NOAA. И, хотя ТПО по данным спутников может иметь рассогласования с *in situ* измерениями до 2°С, рассогласования между ними невелики и лежат в пределах $0-0,3^{\circ}$ С.

Еще одной проблемой построения композиционных карт ТПО является точная географическая привязка. Эта проблема была в свое время решена в Спутниковом центре ДВО РАН, что позволяет привязывать автоматически с пиксельной точностью изображения POES NOAA при благоприятных облачных условиях (Katamanov, 2010) и прогнозировать параметры привязки на несколько витков вперед при неблагоприятных условиях.

В качестве базовых спутников, с данными которых должны согласовываться данные других спутников, были выбраны японские геостационарные спутники MTSAT-1R, MTSAT-2. Эти спутники имеют близкие с POES NOAA спектральные аппаратные функций ИК-каналов, по которым строится TПО на основе технологий MCSST, NLSST. Спутники работают непрерывно и обеспечивают 48 изображений в день, их пространственное разрешение составляет 4 км, оно и было взято за пространственное разрешение композиционных карт.

К сожалению, непосредственное использование данных MTSAT, обработанных по японским технологиям, сталкивается с некоторыми трудностями. JAXA не удалось построить алгоритм расчета ТПО с заданной точностью. Одиночные карты ТПО имеют «плавающую» систематическую ошибку, достигающую по абсолютной величине 0,5°C (вместо максимально достижимой величины в 0,1°C), и неудовлетворительную случайную ошибку (сайт JAXA). Датчики ИК-каналов со временем деградируют, JAXA перестало корректировать и передавать их новые калибровки. Кроме того, в ИК-каналах, особенно в канале 11,5 мкм, появились шумы случайного характера, которые в принципе не позволяют получить ошибку в 0,8 °C при использовании технологий NLSST, MCSST. Переход с формата передачи данных спутников MTSAT с HIRID на HRIT привел к тому, что точностью географической привязки изображений полного диска Земли упала. Если в режиме HIRID точность была подпиксельной и хорошо прогнозировалась (Katamanov, 2010), то в режиме HRIT точность привязки ИК-каналов имеет величину в несколько пикселов, а у видимых каналов она достигает 10 пикселов.

Данные проблемы были решены следующим образом. ИК-каналы были перекалиброваны по технологии NOAA/NESDIS. Была найдена «паразитная» зависимость отсчетов от долготы (Алексанин, Дьяков, 2010) и построен алгоритм расчета ТПО нужной точности.

Для контроля точности датчиков был создан программный комплекс, который на основе интеркалибровки со спутниками NOAA и сопоставления с показаниями дрейфующих буев позволяет проводить коррекцию как измерений ИК-каналов, так и алгоритма расчета ТПО.

Анализ шумов датчиков показал, что в канале IR1 с длиной волны 10,5 мкм шумы невелики, а в канале IR2 с длиной волны 11,5 мкм очень велики. Для решения проблемы шумов был применен следующий подход.

Общая схема расчета ТПО по упомянутым технологиям следующая:

$$T = a T_{\rm IR1} + b \,\varDelta T + \gamma, \tag{1}$$

где $\Delta T = T_{IR1} - T_{IR2}$, *а* и *b* – константы, *γ* – аддитивный член.

При использовании выражения (1) для расчета температур были обнаружены горизонтальные полосы, появление которых связано шумами каналов IR1, IR2 спутников MTSAT. Поскольку шум T_{IR1} мал и величина коэффициента $a \approx 1$, в то время как $b \approx 1$ то сглаживание только величины ΔT решило проблему горизонтальных шумов. Это возможно, так как поправка ΔT по своему смыслу отвечает только за искажения, вносимые атмосферой, и является однородной для свободных от облачности участков в масштабах в несколько десятков километров.

Для коррекции привязки применялась технология геометрической коррекции изображений по автоматически рассчитываемым реперным точкам. Это позволяет добиться удовлетворительной для наших целей гарантированной точности в 1–2 пикселя, Надо отметить, что большинство ИК-изображений удовлетворяет этой точности и без коррекции.

В случае сплошной облачности для восстановления температуры поверхности океана должны использоваться данные микроволновых зондировщиков. В данном случае использовались данные радиометра AMSR-E, установленного на спутнике AQUA. В связи с выходом его из строя можно использовать данные AMSR2, но, к сожалению, не в режиме реального времени.

Построение композиционных изображений ТПО

Диаграмма потоков данных схемы построения структурных композиций ТПО приведена на *рис.* 1. При этом построение композиционных изображений производится в следующей последовательности.



Рис. 1. Схема построения структурных композиционных карт ТПО

Согласно выбранному пользователем диапазону дат, карты ТПО, построенные по данным спутников POES NOAA, AUQA и MTSAT, выбираются из хранилища, проходят дополнительную фильтрацию облачности и приводятся к единому виду (изображениям в проекциях, соответствующим выбранному региону).

Иногда, в безветренных условиях, наблюдаются случаи экстремально сильного прогрева верхнего слоя морской воды, причем величина такого прогрева может достигать 10°С. Такое повышение температуры наблюдается с 11 часов утра местного времени до 17 часов и приводит к тому, что в набор измерений, по которому определяются значения композиционных температур, попадает до 40 процентов явно искаженных данных, что делает правильное определение значений композиционных температур невозможным.

Поэтому для построения качественных краткосрочных карт ТПО необходимо фильтровать случаи экстремального дневного прогрева верхнего слоя поверхности океана. При фильтрации дневного прогрева используется следующая зависимость:

$$T^{j}_{MTSAT-1R SST} < \operatorname{med}\left\{ T^{i}_{MTSAT-1R SST} : i \in 1...N, h^{i}_{sun} \in [0^{\circ}, 29^{\circ}] \right\} + 2^{\circ}C,$$

$$\tag{2}$$

здесь N – число измерений, h_{sun}^{i} – высота Солнца над горизонтом для i-го измерения.

При этом считается, что в утренние в вечерние часы фильтрация облачности работает достаточно хорошо благодаря наличию данных видимого канала, а верхний слой воды еще не прогрет или уже начал остывать и началось перемешивание слоев воды.

При обработке спутниковых снимков частичная облачность часто не отбраковывается алгоритмами фильтрации, работающими с измерениями, соответствующими отдельным пикселям. Обычно для фильтрации частичной облачности сравнивают значение ТПО изображения со значением карты-эталона – карты грубого пространственного разрешения построенной по наиболее надежным данным согласно следующему соотношению:

$$\left\|T_{SST}^{x,y} - T_{\text{эталон}}^{x,y}\right\| \ge \Delta \tilde{T}.$$
(3)

Если величина порогового значения $\Delta \tilde{T}$ фиксируется, то это приводит к тому, что либо не отбраковываются частичная облачность, либо отбраковываются присутствующие на спутниковых изображениях температурные фронты. Поэтому целесообразно использование динамических порогов при фильтрации частичной облачности. Для определения порога фильтрации используются композиционные карты временной и пространственной изменчивости ТПО. Используются следующие зависимости:

Точка отбрасывается, если

$$\left|T_{SST}^{x,y} - T_{pmanon}^{x,y}\right| > \alpha \, \tilde{T}_{npocmp}^{x,y} + \beta \, \tilde{T}_{spem.}^{x,y} + \chi, \tag{4}$$

где $T_{npocmp}^{x,y}$ – оценка пространственной изменчивости ТПО в точке с координатами $x, y, T_{spen}^{x,y}$ – оценка временной изменчивости ТПО, а α, β и χ – константы алгоритма. Проведенное исследование показало, что значения $\alpha = 0,5; \beta = 0,5; \chi = 0,5$ обеспечивает хорошее качество фильтрации. При этом значение карты-эталона равно

$$T_{\text{smanoh}}^{x,y} = \text{med}\left\{T_{\text{SST}}^{x_1, y_1, t} : \left\|x_1 - x, y_1 - y\right\| \le r, h_{\text{sun}}^{x_1, y_1, t} > 0\right\},\tag{5}$$

то есть является медианой измерений ТПО выполненных в дневное время и прошедших фильтрацию облачности в окрестности исследуемой точки радиусом r = 7 км. Временная изменчивость определяется следующим образом:

$$\tilde{T}_{gpex}^{x,y} = 2 \times \left(Q_{75} \left\{ T_{SST}^{x,y,t} \mid t \in [t_{start}:t_{end}] \right\} - Q_{50} \left\{ T_{SST}^{x,y,t} \mid t \in [t_{start}:t_{end}] \right\} \right), \tag{6}$$

(Q_{50} , Q_{75} – 50 и 75 – квантиль от выборки) и является робастной оценкой разброса значений ТПО, наблюдаемых в указанной точке в исследуемый период.

Пространственная изменчивость определяется следующим образом:

$$\widetilde{T}_{npocmp}^{x,y} = \operatorname{med}\left(\max\left(T_{SST}^{x_{1},\mathcal{Y}_{l},t} \mid \left\|x_{1}-x,y_{l}-y\right\| \leq \Delta R\right) - \min\left(T_{SST}^{x_{1},\mathcal{Y}_{l},t} \mid \left\|x_{1}-x,y_{l}-y\right\| \leq \Delta R\right) \mid t \in [t_{start}:t_{end}]\right).$$
(7)

Пример карты пространственной изменчивости приведен на рис. 2.

Карты ТПО, построенные по данным радиометров AVHRR NOAA, VISSR MTSAT и радиометра AMSR-E, прошедшие дополнительную фильтрацию облачности, объединяют-

ся, согласно процедуре аналогичной процедуре построения карты-эталона, с построением структурных композиций POES NOAA, MTSAT и AMSR-E.



Рис. 2. Пример карты пространственной изменчивости температуры поверхности океана за 15.03.2013

Рис. 3. Пример структурной композиционной карты ТПО за 15.03.2013

Значения ТПО, построенные по данным ИК и микроволновых датчиков, могут иметь систематические рассогласования, достигающие 1 °C. Поэтому, в случае пространственной стыковки пикселей ТПО от разных типов зондировщиков, выполняется сглаживание возможных фронтовых зон в радиусе 15 км от писеля, построенного по ИК-измерениям, к пикселю построенному по микроволновым данным.

У микроволновых данных имеется также существенный недостаток. Большой размер области, с которой собирается излучение при формировании величины яркости пикселя (около 50 км), приводит к сглаживанию фронтальных зон. В некоторых случаях эти приводит к искажениям ТПО, достигающим 3 °C. Метод решения данной задачи находится в стадии разработки (Алексанин, Ким, 2012).

После этого происходит построение общей структурной карты. При этом данные, отсутствующие на композиционной карте, построенной по данным спутников POES/NOAA, восполняются данными сначала MTSAT, а затем AMSR-E. Пример построенной структурной композиционной карты TПО приведен на *рис. 3*.

Верификация алгоритма построения структурных композиций ТПО

Применение микроволновых данных в композиционных картах имеет свои особенности. В настоящее время нет опубликованных технологий расчета ТПО по микроволновым данным, так как это является предметом know how. В работе использовались готовые поля ТПО, построенные по алгоритму Шибаты (Shibata, 2000; Shibata, Imaoka, Koike, 2003), JAXA. Помимо уже упомянутого сглаживания температурных перепадов на исходных микроволновых данных, автор алгоритма широко использует процедуру сглаживания из-за высокого шума в спектральных каналах радиометра AMSR-E, AMSR2, что еще больше разрушает термические фронты. Поэтому для оценки точности композиционных карт использовались только ИК-изображения.

Верификация предложенного алгоритма была проведена на примере данных за январь – декабрь 2013 г. Проводилось визуальное сравнение фронтов на композиционных картах с фронтами на одиночных изображениях AVHRR NOAA. При этом было обнаружено, что очертания океанических структур сохраняются на структурных композиционных картах достаточно хорошо, а значимых отклонений средних температур от композиционных карт построенных в рамках проекта NGSST, не обнаружено. Косвенным подтверждением хорошего качества структуры изображений композиционных карт ТПО может служить тот факт, что стоящиеся по ним карты термических структур (Алексанина, 1997) позволяют выделить автоматически существенно большее количество синоптических вихрей океана (Алексанин, Алексанина, Загуменнов, 2007), чем по одиночным изображениям, без существенных потерь качества выделения вихрей.

Проводились сравнения с данными дрейфующих буев заданного региона. Строились два вида ежедневных карт ТПО – дневные и ночные. Первые соответствовали временному интервалу с 6 до 23 часов по местному времени, вторые – временному интервалу с 21 до 8 часов. Систематические отклонения оказались равными в первом случае – 0,12°С, во втором случае – 0,08°С. Случайные компоненты имели величину 0,6°С и 0,7°С соответственно.

Таким образом, композиционные карты удовлетворяют жестким современным стандартам качества. Проводились также эксперименты по использованию более жестких параметров фильтрации по эталону (4). В частности, уменьшение параметров α , β , x до величин 0,5 не приводило к потере качества композиционных карт, при этом точность карт несколько улучшалась (стандартное отклонение уменьшалось с 0,7 до 0,6°C). Использование более жестких порогов требует более длительных интервалов контроля качества, поэтому они не были приняты при построении композиционных карт.

Кроме сравнения полученных композиционных значений ТПО с данными буйковых измерений, было проведено визуальное сравнение с произвольной композиционной картой, построение которой производилось по технологии G1SST (Chao, 2009) в рамках международного проекта GHRSST в Лаборатории реактивного движения HACA (JPL NASA). Мы сопоставляем композиционную карту TПО, построенную по данным MTSAT-1R (*puc. 3*), с картой TПО, построенной по технологии G1SST (*puc. 5*). Для оценки качества композиционных карт используется мгновенная карта TПО за 15.03.2013, построенная по данным радиометра AVHRR. Можно отметить несколько существенных отличий на изображениях. В зонах резких фронтов (например, в точках 1, 3 на *puc. 4*) наблюдается значительная ширина фронта температур, чего нет на одиночном изображении. Увеличение ширины фронтов для метода G1SST связано, по-видимому, с реализацией используемого метода оптимальной интерполяции. Этот эффект существенно скажется на трехдневных композиционных картах, являющихся базовыми при поставке их рыбакам. *Рисунок 3* в этом смысле более близок к одиночному изображению. В точке 2 наблюдаются отклонения абсолютных значений температур, достигающих недопустимых двух градусов. Это можно объяснить использованием микроволновых измерений при построении композиционной

карты. При построении карты по нашей технологии и технологии NGSST (Sakaida, 2009) такое не возникает, так как если есть ИК-данные, то микроволновые не используются. Микроволновые данные являются менее точными и имеют недостаточное пространственное разрешение. В технологии G1SST используются все данные.





Рис. 4. Композиционная карта ТПО за 15.03.2013 построенная по технологии *GISST (http://ourocean.jpl.nasa.gov/SST/)*

Рис. 5. Мгновенная карта ТПО построенная по данным AVHRR/NOAA-19 за 15.03.2013 3:55 UTC

Работы по апробации алгоритма построения структурных композиций температуры поверхности океана были выполнены при поддержке гранта РНФ 14-50-00034. Разработка алгоритма была поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН, Программой фундаментальных исследований РАН, грантами ДВО РАН.

Литература

- 1. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Загуменнов А.А. Построение уровенной поверхности моря по данным альтиметрических измерений и картам термических структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 1. № 4. С. 247–253. Алексанин А.И., Дьяков С.Е. Кросс-калибровка ИК-каналов спутника MTSAT-1R и алгоритм расчета тем-
- 2. пературы поверхности моря // Исследование Земли из космоса. 2010. № 5. С. 3–10.
- Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Катаманов С.Н., Наумкин Ю.В. Технология обработки данных полярно-ор-битальных спутников FY-1C/1D для мониторинга физических полей океана // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 82–91. 3.
- 4. Алексанин А.И., Загуменнов А.А. Автоматическое выделение вихрей океана и расчет их формы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 17-21.
- 5. Алексанин А.И., Ким В. Компенсация влияния аппаратной функции радиометра AMSR-Е на точность расчета ТПО // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 298-203.
- Алексанина М.Г. Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным 6. спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44-51.
- Ackerman S.A., Strabala K.I., Menzel W.P., Frey R.A., Moeller C.C., Gumley L.E. Discriminating clear sky from clouds with MODIS // Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012). 1998. Vol. 103. No. D24. P. 7. 32141-32157.
- Berk A., Anderson G.P., Bernstein L.S., Acharya P.K., Dothe H., Matthew M.W., Adler-Golden S.M., Chetwynd J.H., Richtsmeier S.C., Pukall B., Allred C.L., Jeong L.S., Hoke M.L. MODTRAN4 radiative transfer modeling 8. for atmospheric correction // SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1999. P. 348-353.
- *Casey K.S., Cornillo P. A* comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies // Journal of Climate. 1999. Vol. 12. No. 6. P. 1848–1862. 9
- 10. Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I. J., Beggs H., Poulter D. J. S., Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R. W., Kawamura H., Rayner N. The

global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project // Bulletin of the American Meteorological Society. 2007. Vol. 88. No. 8. P. 1197-1213.

- 11. Katamanov S.N. Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery // Proc. 1st Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. Vladivostok, Russia. 2010. P. 269-274.
- Kazansky A.V., Goncharenko I.A. Atmospheric correction of AVHRR imagery // Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment (Ch. 2.6.). Tokyo: Seibtsu Kenkyusha, 1993. P. 56–63.
 Martin M., Dash P., Ignatov A., Banzon V., Beggs H., Brasnett B., Cayula J., Cummings J., Donlon C., Gentemann
- C., Grumbine R., Ishizaki S., Maturi E., Reynolds R.W., Roberts- Jones J. Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: A GHRSST multi-product ensemble (GMPE) // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2012. Vol. 77. P. 21–30.
- 14. May D.A., Parmeter M.M., Olszewski D.S., McKenzie B.D Operational processing of satellite sea surface temperature retrievals at the Naval Oceanographic Office // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79. No. 3. P. 397–407.
- 15. McMillin L. M., Crosby D. S. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique // Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012). 1984. Vol. 89. No. 3. P. 3655-3661.
- 16. Pichel W., Maturi E., Clemente-Colón P., Sapper J. Deriving the operational nonlinear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3 // International Journal of Remote Sensing. 2001. Vol. 22. No. 4. P. 699–704. 17. Reynolds R. W., Smith T. M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation //
- Journal of climate. 1994. Vol. 7. No. 6. P. 929-948.
- 18. Sakaida F., Kawamura H., Takahashi S., Shimada T., Kawai Y., Hosoda K., Guan L. Research and development of the New Generation Sea Surface Temperature for Open Ocean (NGSST-O) product and its demonstration operation // Journal of oceanography. 2009. Vol. 65. No. 6. P. 859-870.
- 19. Chao Y., Li Z., Farrara J.D., Huang P.: Blended sea surface temperatures from multiple satellites and in-situ observations for coastal oceans // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. No. 26 (7), P. 1435–1446.
- 20. Shibata A. AMSR/AMSR-E algorithm development and data distribution // Proc. IGARSS 2000. Vol. 1. P. 59-61. 21. Shibata A., Imaoka K., Koike T. AMSR/AMSR-E level 2 and 3 algorithm developments and data validation plans of NASDA //Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 2003. Vol. 41. No. 2. P. 195-203.
- 22. Stowe L.L., Davis P., McClain E.P. Evaluating the CLAVR (clouds from AVHRR) phase I-cloud cover experimental product // Advances in Space Research. 1995. Vol. 16. No. 10. P. 21-24.
- 23. Walton C. C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite
- data // Journal of Applied Meteorology. 1988. Vol. 27. No. 2. P. 115–124. 24. Walton C.C., Pichel W.G., Sapper J.F., May D.A. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites // Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012). 1998. Vol. 103. No. C12. P. 27999–28012.

Creating composite maps of ocean surface temperature preserving thermal structures

S.E. Diakov¹, V.A. Kachur^{1,2}

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: sergdkv@gmail.com ² Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia

This article discusses problems associated with creating all-weather compositional maps of sea surface temperature (SST) using satellite data in infrared and microwave spectra. An approach to creating SST maps is proposed based on the principles of preservation of thermal fronts. This approach uses robust methods of temperature estimation from heterogeneous satellite data and additional cloud filtering methods. These filtering methods use maps of spatial and temporal variability of SST values. Procedures for creating maps of spatial and temporal variability are described. The specifics of the chosen approach are discussed, and the technology for its implementation is proposed. A comparison of the accuracy of estimating compositional day-time and night-time OST maps based on a series from 20 images in 2013 is undertaken. It is shown that the accuracy of the maps is 0.7° C, and assessments of the accuracy of one-day compositional maps are given.

Keywords: sea surface temperature, SST composite maps

Accepted: 09.03.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-84-94

References

- 1. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Zagumennov A.A., Postroyeniye urovennoy poverkhnosti morya po dannym altimetricheskikh izmereny i kartam termicheskikh struktur (Construction of the surface level of the sea According to the data altimetry maps and thermal structures), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2007, Vol. 1, No. 4, pp. 247-253.
- Aleksanin A.I., Dyakov S.E., Kross-kalibrovka IK-kanalov sputnika MTSAT-1R i algoritm rascheta temperatury 2. poverkhnosti morya (Cross-calibration of IR-channels MTSAT-1R and algorithm of calculation of sea surface temperature), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 5., pp. 3–10. Aleksanin A.I., Dyakov S.E., Katamanov S.N., Naumkin Yu.V. Tekhnologiya obrabotki dannykh polyarno-orbitalnykh
- 3. sputnikov FY-1C/1D dlya monitoringa fizicheskikh poley okeana (Data processing technology FY-1C/1D polar-orbiting satellites for monitoring physical ocean fields), Podvodnye issledovaniya i robototekhnika, 2006, No. 2, pp. 82–91.
- Aleksanin A.I., Zagumennov A.A., Avtomaticheskoye vydeleniye vikhrey okeana i raschet ikh formy (Automatic extraction of ocean eddies and eddies form calculation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya* 4. Zemli iz kosmosa, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 17-21.
- 5. Aleksanin A.I., Kim V., Kompensatsiya vliyaniya apparatnoy funktsii radiometra AMSR-E na tochnost rascheta TPO (Compensation of the effect of the AMSR-E radiometer hardware functions on the accuracy of calculation of the SST), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 298– 203
- 6. Aleksanina M.G., Avtomaticheskoye vydeleniye poverkhnostnykh struktur okeana po infrakrasnym dannym sputnikov NOAA (Automatic extraction of surface structures of the ocean on the infrared data from NOAA satel-
- lites), *Issled. Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 3, pp. 44–51. Ackerman S.A., Strabala K.I., Menzel W.P., Frey R.A., Moeller C.C., Gumley L.E., Discriminating clear sky from 7. clouds with MODIS, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1998, Vol. 103, No. D24, pp. 32141-32157.
- Berk A., Anderson G.P., Bernstein L.S., Acharya P.K., Dothe H., Matthew M.W., Adler-Golden S.M., Chetwynd J.H., Richtsmeier S.C., Pukall B., Allred C.L., Jeong L.S., Hoke M.L., MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction, *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumenta-tion. International Society for Optics and Photonics*, 1999, pp. 348–353. 8.
- Casey K.S., Cornillo P., A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies, *Journal of Climate*, 1999, Vol. 12, No. 6, pp. 1848–1862.
 Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I.J., Beggs H., Poulter D.J.S., Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wield C. Brannett P. Karner P. Mathematical Science of Mathematical Science of Mathematical Science of Mathematical Science of Climate, 1999, Vol. 12, No. 6, pp. 1848–1862. Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Llewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H., Rayner N., The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project, Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, Vol. 88, No. 8, pp. 1197–1213. 11. Katamanov S.N. Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery, *Proc. 1st*
- Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications, Vladivostok, Russia, 2010, pp. 269-274.
- 12. Kazansky A.V., Goncharenko I.A., Atmospheric correction of AVHRR imagery, Satellite Remote Sensing of the
- Natin M., Dash P., Ignatov A., Banzon V., Beggs H., Brasnett B., Cayula J., Cummings J., Donlon C., Gentemann C., Grumbine R., Ishizaki S., Maturi E., Reynolds R.W., Roberts- Jones J., Group for High Resolution Sea Surface temperature (GHRSST) analysis fields inter-comparisons. Part 1: A GHRSST multi-product ensemble (GMPE),
- Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2012, Vol. 77, pp.21–30. May D.A., Parmeter M.M., Olszewski D.S., McKenzie B.D., Operational processing of satellite sea surface temperature retrievals at the Naval Oceanographic Office, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 14 Vol. 79, No. 3, pp. 397–407.
- 15. McMillin L.M., Crosby D.S. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1984, Vol. 89. No. 3, pp. 3655–3661.
- Pichel W., Maturi E., Clemente-Colón P., Sapper J., Deriving the operational nonlinear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3, *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 16 Vol. 22, No 4, pp. 699–704.
- Yoi, 22, 1004, pp. 079-104.
 Reynolds R.W., Smith T.M., Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation, *Journal of climate*, 1994, Vol. 7, No. 6, pp. 929–948.
 Sakaida F., Kawamura H., Takahashi S., Shimada T., Kawai Y., Hosoda K., Guan L., Research and development
- of the New Generation Sea Surface Temperature for Open Ocean (NGSST-O) product and its demonstration operation, Journal of oceanography, 2009, Vol. 65, No. 6, pp. 859-870.
- 19. Chao Y., Li Z., Farrara J.D., Huang P.: Blended sea surface temperatures from multiple satellites and in-situ observations for coastal oceans // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. No. 26 (7), pp. 1435–1446 20. Shibata A. AMSR/AMSR-E algorithm development and data distribution, *Proc. IGARSS 2000*, Vol. 1, pp. 59–61.
- 21. Shibata A., Imaoka K., Koike T. AMSR/AMSR-E level 2 and 3 algorithm developments and data validation plans of NASDA, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2003, Vol. 41, No. 2, pp. 195-203.
- Stowe L.L., Davis P., McClain E.P., Evaluating the CLAVR (clouds from AVHRR) phase I-cloud cover experi-mental product, *Advances in Space Research*, 1995, Vol. 16, No. 10, pp. 21–24. 22.
- Walton C.C., Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data, *Journal of Applied Meteorology*, 1988, Vol. 27, No. 2, pp. 115–124. Walton C.C., Pichel W.G., Sapper J.F., May D.A., The development and operational application of nonlinear al-
- 24 gorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 1998, Vol. 103, No. C12, pp. 27999–28012.