

## Использование данных сканера *SEVIRI* для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря

Данные сканера *SEVIRI* использованы для восстановления температуры поверхностного слоя Черного моря. Выполнено сравнение температуры поверхности моря, полученной спутниковым сенсором и измеренной дрейфтерами. Среднеквадратическое отклонение разности этих температур составило 0,45 К. Разработана методика уменьшения ошибки восстановления поверхностной температуры моря, основанная на статистической обработке данных и применении параметризации перепада температуры в скин-слое с использованием данных о скорости приводного ветра, рассчитанных с помощью системы атмосферного моделирования *SKIRON*. Полученная линейная зависимость разности дрейфтерных и спутниковых данных от скорости ветра позволила снизить общую ошибку восстановления температуры поверхностного слоя моря до 0,29 К для ночных измерений.

**Ключевые слова:** температура поверхности моря, дистанционные методы исследования, *SEVIRI*.

**Введение.** Температура поверхности моря (ТПМ) является одним из основных факторов и индикаторов, характеризующих состояние биотических и абиотических процессов в морской экосистеме. Она также широко используется в прикладных и исследовательских задачах современной геофизики и океанологии.

Несмотря на то, что ТПМ является одним из наиболее хорошо определяемых дистанционными методами параметров, точность ее восстановления не достаточна для целей большинства потребителей. Действительно, для того чтобы улучшить результаты расчетов по климатическим моделям, ошибка определения ТПМ не должна превышать 0,4 К. Однако в настоящий момент она составляет не менее 0,5 – 1 К [1]. Поэтому разработка методик увеличения точности восстановления полей ТПМ по данным дистанционных методов является приоритетной задачей для современной климатологии и океанологии, в том числе и для решения региональных проблем.

Сенсор *SEVIRI* (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), установленный на геостационарном спутнике *MSG-2* (*Meteosat Second Generation*), имеет высокую дискретность измерений (0,25 ч) и относительно высокое пространственное разрешение (от 4 до 6 км) для Черного моря. Это позволяет не только более эффективно проводить сравнение спутниковых данных с измерениями *in situ* с целью их верификации и исследования природы ошибок спутниковых измерений, но и более эффективно использовать данные сенсора *SEVIRI* для изучения циклического процесса дневного прогрева поверхностного слоя моря [2 – 5].

Работы по уточнению полей ТПМ, полученных по измерениям сенсором *SEVIRI*, заключались преимущественно в совершенствовании существующих алгоритмов восстановления ТПМ по величине интенсивности излучения, т. е. по яркостной температуре [6 – 8]. Попыток улучшения качества данных пу-

тем статистической обработки восстановленных полей предпринято не было. Кроме того, поскольку температура, измеряемая в ИК-диапазоне, формируется в тонком слое (~0,1 мм), она по своей природе является температурой скин-слоя [9]. Поэтому для приведения спутниковых температур к ТПМ необходимо учитывать скачок температуры в скин-слое. В настоящее время это осуществляется путем добавления константы, по сути, являющейся средним значением перепада температуры в скин-слое. Однако средние характеристики этого перепада температуры варьируют от одного района Мирового океана к другому и зависят преимущественно от гидрометеорологических условий. Поэтому учет зависимости перепада температуры в скин-слое от метеорологических параметров также может быть применен для увеличения точности спутниковых полей ТПМ.

Основной целью данной работы является разработка методики уменьшения средней ошибки восстановления полей ТПМ на основе данных спутникового сенсора *SEVIRI* для Черноморского региона. В частности, мы проведем сравнение данных, полученных сенсором *SEVIRI*, и измерений *in situ* свободными дрейфующими буями (далее – дрейфтеры). Будет оценена возможность уменьшения «шума» спутниковых снимков путем применения специальных алгоритмов обработки изображений. Эффективность этой методики основывается на высокой дискретности спутниковых измерений и большом объеме данных дрейфтерных измерений. С целью коррекции перепада температуры в скин-слое используются результаты атмосферного моделирования в рамках модели *SKIRON* [10].

**Вертикальная термическая структура верхнего слоя океана.** Вертикальную термическую структуру верхнего слоя океана (~10 м) принято разделять на скин-слой, верхний квазиоднородный слой (ВКС) и дневной термоклин. Существование или отсутствие той или иной составляющей верхнего слоя океана зависит в основном от условий на поверхности.

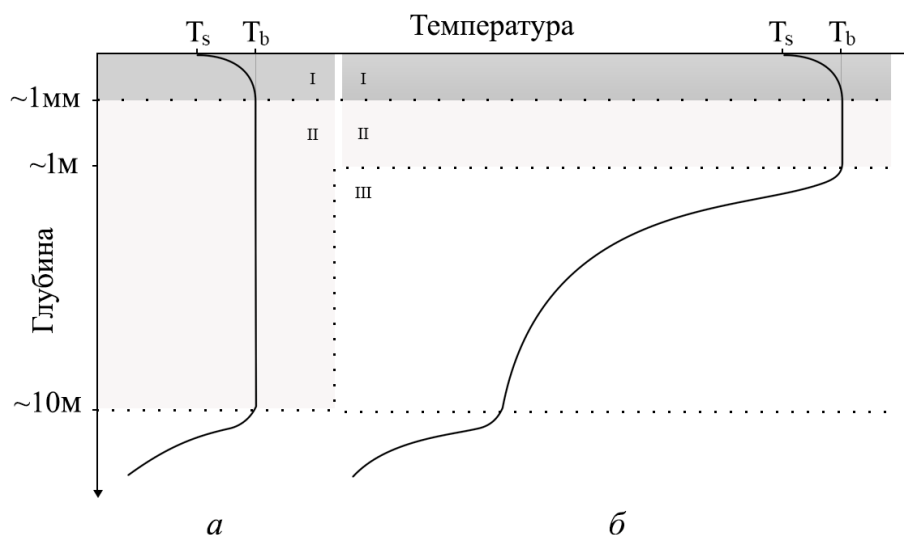
В верхних нескольких миллиметрах, как правило, располагается скин-слой. Толщина этого пограничного слоя и разница температур между его границами главным образом зависят от локальных условий, определяющих поток тепла через границу океан – атмосфера и характеристики турбулентности в верхнем слое океана. Традиционно эту разницу температур параметризуют с использованием скорости ветра и контактного потока тепла через границу океан – атмосфера [9].

Следуя результатам работы группы *GHRSSST-PP (GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) High-Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project)* [1], отметим основные значимые горизонты и соответствующие им температуры в пределах данного слоя. Температуру на глубине 0,01 – 0,1 мкм определим как температуру скин-слоя. Данная температура может быть измерена с помощью ИК-радиометров, работающих на длинах волн 3,7 – 12 мкм, и является, по сути, температурой слоя молекулярной теплопроводности.

Температура нижней границы скин-слоя, как правило, совпадает с температурой ВКС, в котором и проводятся основные измерения контактными датчиками. В ВКС все основные геофизические характеристики, такие как

температура и соленость, постоянны по глубине. Однородность данного слоя поддерживается интенсивной мелкомасштабной турбулентностью, продуцируемой энергией ветра, потоками тепла на его границах и другими факторами. Толщина данного слоя в основном зависит от скорости ветра и потоков тепла на поверхности. В условиях, когда суммарный поток тепла, направленный из атмосферы в океан, положителен, а ветер слабый или отсутствует, толщина ВКС относительно мала (1 – 5 м). Такая ситуация часто наблюдается летом в дневное время суток. Ночью или зимой, когда суммарный поток тепла отрицателен, нисходящие конвективные потоки приводят к увеличению слоя. В таких условиях глубина слоя, как правило, относительно велика (>10 м). Это также справедливо для дневного времени суток летом, когда скорость ветра относительно велика (>5 – 10 м/с).

Днем, когда скорость ветра мала (<5 м/с), а суммарный поток тепла, направленный из атмосферы в океан, положителен, ниже ВКС, если он существует, развивается дневной термоклин. Обычно дневной термоклин имеет характерные размеры порядка 1 – 5 м и разницу температур между его границами порядка 1 – 4 К. Ночью, при отрицательном потоке тепла, за счет конвекции дневной термоклин постепенно разрушается. Схематическое распределение температуры в верхнем слое моря показано на рис. 1.



**Р и с. 1.** Идеализированный профиль температуры для ночного времени, зимы и сильных ветров (а) и для дневного времени летом при слабых ветрах (б) (I – скин-слой, II – ВКС, III – слой дневного термоклина;  $T_s$  – температура скин-слоя,  $T_b$  – температура верхней границы ВКС)

**Ошибки спутниковых измерений.** В этом разделе кратко описаны основные факторы, влияющие на точность измерения ТПМ дистанционными методами, а также факторы, влияющие на разность спутниковых и дрейферных данных, наблюдаемую при их сравнении.

Дистанционные методы измерения температуры моря с помощью спутниковых радиометров являются на данный момент одними из самых информативных методов получения данных о пространственном распределении

температуры верхнего слоя. Спутниковые радиометры измеряют излучение, сформированное в верхних 10 – 20 мкм морской поверхности, площадь которой определяется пространственным разрешением сенсора. Интенсивность этого излучения зависит от средней по пространству температуры на данном горизонте. Однако излучение, зафиксированное сенсором, отличается от того, что было излучено морем. Основные факторы, влияющие на искажение ИК-радиации, излученной морской поверхностью следующие: поглощение и собственное ИК-излучение атмосферными газами; отличие от единицы излучательной способности поверхности, т. е. отражение атмосферой радиации.

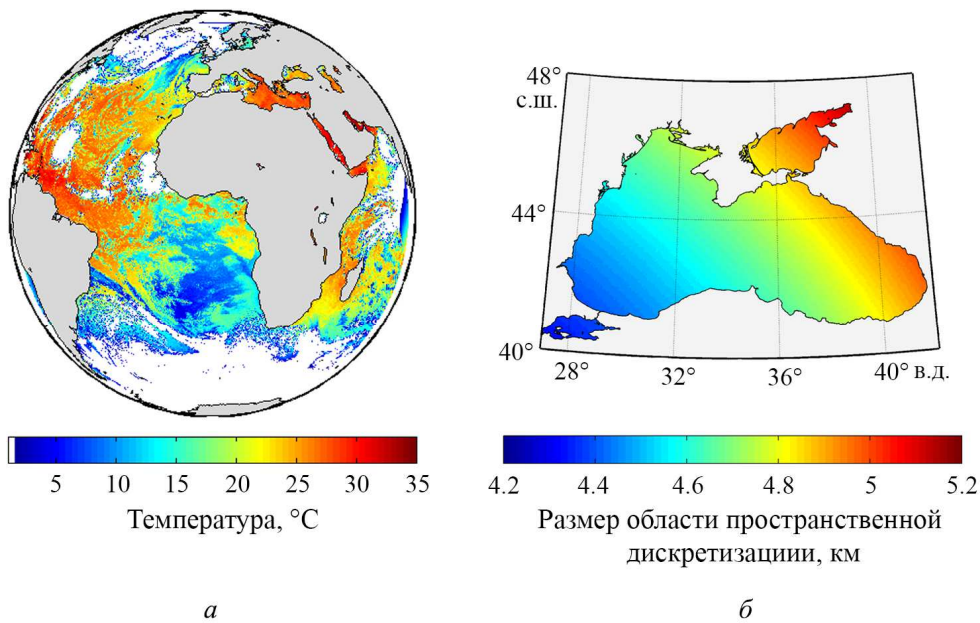
Величина интенсивности излучения (яркостная температура), зафиксированная детектором, искажается флуктуацией параметров приемно-усилительной системы сенсора, вызванной несовершенством последней. Это приводит к дополнительной случайной ошибке измерений.

Для восстановления ТПМ по яркостной температуре, полученной сенсором, используются двух- или трехканальные методики. Несовершенство данных методик восстановления также приводит к погрешностям конечных полей температуры.

Как было отмечено выше, сенсор принимает ИК-излучение, интенсивность которого связана со средней температурой некоторой области, размер которой определяется пространственным разрешением сенсора, в то время как дрефтер измеряет температуру в точке на определенной глубине. Поэтому при сравнении данных сопоставляются фактически разные температуры. Тем не менее в условиях развитого ВКС эти температуры принято считать близкими по значению. Именно поэтому нормировку сенсоров зачастую проводят по дрефтерным измерениям, проведенным в ночное время, когда нижняя граница ВКС находится на глубине, предположительно большей, чем глубина датчика дрефтера. В таких условиях, помимо перечисленных выше факторов, искажающих величину излучения морской поверхности, на разность дрефтерных и спутниковых данных влияют скачок температуры в скин-слое и пространственные неоднородности поля температуры в области разрешения прибора.

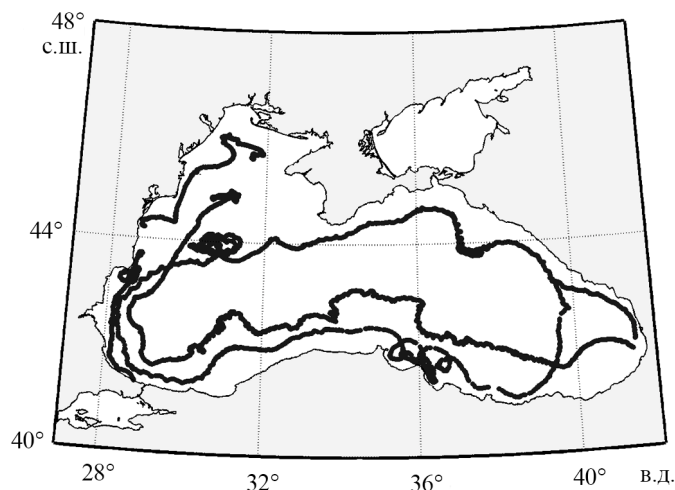
**Использованные данные.** Данные по температуре поверхностного слоя Черного моря, восстановленной по измерениям яркостных температур сенсором *SEVIRI*, были выбраны из массива *OSDPD-L2P-MSG02*, предоставляемого группой *GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature)* [11]. Использовались данные второго уровня обработки [12]. Из этого же набора данных была получена информация о приповерхностном ветре и вероятности чистого неба (*probability of clear sky*) [13].

Спутник *MSG-2* расположен в плоскости экватора над нулевой широтой. Инструмент *SEVIRI*, установленный на спутнике, принимает изображения Атлантического региона (включая Черное море и Балтику) в 12 спектральных каналах. Одиннадцать из них получают изображения полного диска с дискретностью 0,25 ч. Пространственное разрешение сенсора изменяется от 3 км в надире до  $\approx 6$  км в крайних точках [14]. Пример визуализированного поля ТПМ и карта пространственного разрешения сенсора для Черного моря представлены на рис. 2.



**Р и с. 2.** Пример карты температуры (а) и карта пространственного разрешения сканера SEVIRI для Черного моря (б)

В качестве подспутниковых данных в работе использовались дрейферные измерения температуры поверхностного слоя Черного моря, накопленные с 22 ноября 2009 г. до 2012 г. За этот период доступно 8311 измерений. Погрешность измерения температуры и координат дрейфера составляет 0,1 К и 50 м соответственно [15]. Глубина измерения температуры при штилевых условиях составляет 0,2 м, однако при волнении датчик фактически измеряет среднюю температуру некоторого слоя, толщина которого зависит от силы волнения. Треки дрейферов, данные с которых использовались для сравнения, представлены на рис. 3.



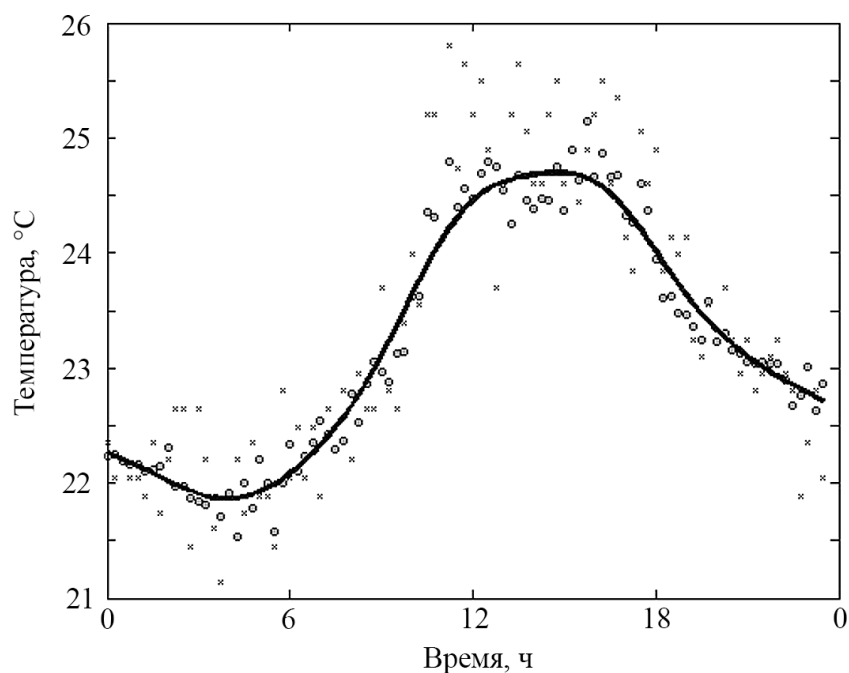
**Р и с. 3.** Траектории движения дрейферов, данные которых используются в настоящей работе  
 ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 6 41

Данные о потоках тепла, полученные по модели *SKIRON*, имеют пространственное разрешение  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  и частоту 2 ч.

**Методика уменьшения ошибки восстановления ТПМ.** Как уже было отмечено, сенсор *SEVIRI* имеет высокую частоту измерений, что дает новые возможности для использования статистических методик с целью улучшения качества спутниковых полей ТПМ. В данной работе мы применяли технику пространственной фильтрации для уменьшения «шума» спутниковых полей ТПМ. Алгоритм сглаживания заключался в следующем.

На первом этапе проводилась фильтрация – удаление из дальнейшего рассмотрения точек, в которых параметр *probability of clear sky* меньше заданного значения (значение, использованное в работе, равно 0,9994). Далее к каждому снимку применялась процедура пространственной медианной фильтрации с размером локального окна, полученным методом минимизации среднеквадратической ошибки, т. е. выбирался такой размер окна, при котором среднеквадратическое отклонение (СКО) разности температур, измеренных контактным и дистанционным методами, достигало минимума.

На рис. 4 приведен пример суточного хода ТПМ, полученной: по данным сенсора; в результате фильтрации методом пространственного осреднения; путем последующего временного сглаживания. Рисунок наглядно демонстрирует типичную величину случайного разброса данных первичных измерений по сравнению со сглаженной амплитудой суточного хода ТПМ.



**Р и с. 4.** Суточный ход ТПМ в Черном море 12 июня 2010 г. ( $42,7^\circ$  с. ш.,  $30,5^\circ$  в. д.; точки – исходная ТПМ по данным сенсора *SEVIRI*; круглые маркеры – ТПМ после фильтрации, интерполяции и медианного сглаживания; сплошная линия – результат сглаживания по времени предыдущих данных, предварительно осредненных по пространству)

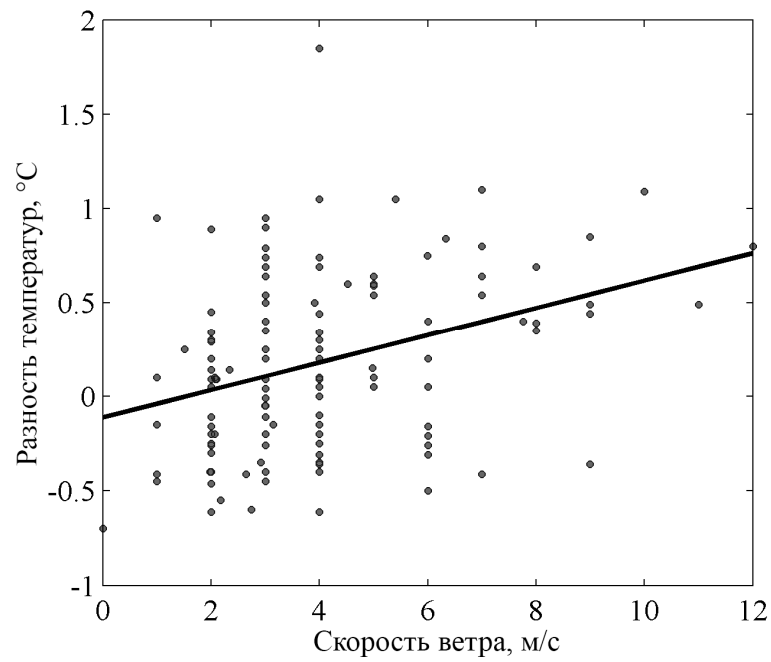
**Результаты и их анализ.** СКО разности температур, измеренных дрейфтером и полученных из набора спутниковых данных после процедуры фильтрации, составило 0,8 К для всех измерений и 0,45 К для ночных. После сглаживания с использованием описанной выше методики СКО разности этих температур составило 0,43 К для всех измерений и 0,36 К для ночных измерений.

В дневное время суток СКО выше, чем в ночное, ввиду того, что днем дрейфтер может располагаться в области дневного термоклина, т. е. измерять температуру, существенно отличающуюся от ТПМ, тогда как ночью дрейфтер с большой степенью вероятности попадает в область ВКС. Другой возможный источник погрешностей в дневное время связан с прогревом дрейфтера и наличием пространственных неоднородностей в ТПМ при слабых ветрах. На рис. 4 хорошо видно, что в дневное время флуктуации регистрируемой температуры выше, чем в ночное.

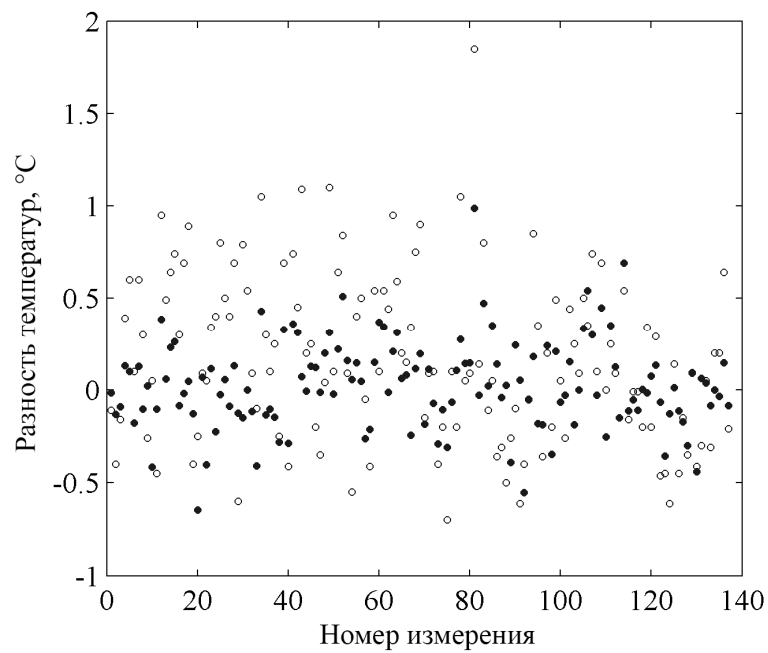
Как было отмечено выше, спутниковые радиометры измеряют излучение, непосредственно связанное с температурой скин-слоя, в то время как верификация методик восстановления ТПМ проводится по дрейфтерным измерениям в области ВКС, при этом не учитывается зависимость скачка температуры в скин-слое от метеорологических параметров, таких как скорость ветра и поток тепла. Поэтому, помимо сглаживания, была проведена параметризация разности спутниковых и дрейфтерных измерений ТПМ от факторов, влияющих на значение скачка температуры в скин-слое и дальнейшее применение параметризации для коррекции сглаженных полей температуры. Всего было выбрано 137 ночных синхронных измерений дрейфтерами и сканером *SEVIRI*.

Рассмотрим зависимость отклонения разности дрейфтерных и спутниковых температур от скорости ветра (рис. 5). Скорость ветра влияет на характеристики турбулентности в верхнем слое океана, поэтому ветер является одним из факторов, влияющих на величину скачка температуры в скин-слое. Эта зависимость качественно совпадает с известными результатами, полученными при изучении характеристик скин-слоя [16]. В цитируемой работе величина наклона линейного тренда равна 0,065 К/(м/с), а рассчитанная по нашим данным составляет 0,068 К/(м/с). Это может служить свидетельством влияния перепада температуры в скин-слое на общую случайную ошибку измерений температуры сенсором *SEVIRI*.

Предполагая, что наблюдаемая зависимость обусловлена перепадом температуры в скин-слое, мы параметризуем зависимость ошибки спутниковых измерений от скорости ветра и потоков тепла, рассчитанных по модели *SKIRON*. Применение данной параметризации для корректировки сглаженных полей температур снизило СКО разности температур скорректированных полей и дрейфтерных измерений в точках их совпадения для ночного времени до 0,29 К (рис. 6).



**Р и с. 5.** Зависимость разности температур, полученных сенсором *SEVIRI* и измеренных дрейф-термом, от скорости ветра (сплошная прямая – линейный тренд)



**Р и с. 6.** Разность спутниковых и дрейферных данных по ТПМ (кружки – исходные данные, зачерненные кружки – результат сглаживания и параметризации перепада температур в скин-слое)



**Выводы.** Данные сканера *SEVIRI*, характеризующиеся высокой дискретностью измерений и достаточным пространственным разрешением, могут быть использованы для более точного восстановления изменчивости температуры поверхностного слоя Черного моря.

Статистическая обработка данных спутника и введение параметризации зависимости ошибки спутниковых измерений от скорости ветра и потока тепла позволили увеличить точность восстановления ТПМ до 0,29 К.

Представляется перспективным использование данных сканера *SEVIRI* для изучения изменчивости температуры в цикле дневного прогрева и восстановления глубины ВКС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Donlon C., Rayner N., Robinson I. et al. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2007. – 88, № 8. – P. 1197 – 1213.
2. Gentemann C.L., Minnett P.J., Le Borgne P. et al. Multi-satellite measurements of large diurnal warming events // Geophys. Res. Lett. – 2008. – 35, № 22. – P. L22602.
3. Marullo S., Santoleri R., Banzon V. et al. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic // J. Geophys. Res.: Oceans (1978 – 2012). – 2010. – 115, № C5. – P. C05011.
4. Merchant C.J., Filipiak M.J., Le Borgne P. et al. Diurnal warm-layer events in the western Mediterranean and European shelf seas // Geophys. Res. Lett. – 2008. – 35, № 4. – P. 04601.
5. Filipiak M.J., Merchant C.J., Kettle H. et al. An empirical model for the statistics of sea surface diurnal warming // Ocean Sci. – 2012. – 8, № 2. – P. 197 – 209.
6. Walton C.C., Pichel W.G., Sapper J.F. et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites // J. Geophys. Res.: Oceans (1978 – 2012). – 1998. – 103, № C12. – P. 27999 – 28012.
7. Merchant C.J., Le Borgne P., Roquet H. et al. Sea surface temperature from a geostationary satellite by optimal estimation // Rem. Sens. Env. – 2009. – 113, № 2. – P. 445 – 457.
8. Le Borgne P., Roquet H., Merchant C.J. Estimation of sea surface temperature from the spinning enhanced visible and infrared imager, improved using numerical weather prediction // Ibid. – 2011. – 115, № 1. – P. 55 – 65.
9. Saunders P.M. The temperature at the ocean-air interface // J. Atmosph. Sci. – 1967. – 24, № 3. – P. 269 – 273.
10. Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A. et al. The regional weather forecasting system *SKIRON*: An overview // Proceedings of the symposium on regional weather prediction on parallel computer environments. – 1997. – 15. – P. 17.
11. <http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSDPD-L2P-MSG02>.
12. Parkinson C.L., Ward A., King M.D. Earth science reference handbook. A guide to NASA's Earth science program and earth observing satellite missions // Nat. Aeronaut. Space Admin., 2006. – 277 p.
13. Merchant C.J., Harris A.R., Maturi E. et al. Probabilistic physically based cloud screening of satellite infrared imagery for operational sea surface temperature retrieval // Quar. J. Roy. Meteorol. Soc. – 2005. – 131, № 611. – P. 2735 – 2755.
14. Schmetz J., Pili P., Tjemkes S. et al. An introduction to Meteosat second generation (MSG) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 2002. – 83, № 7. – P. 977 – 992.

15. Ратнер Ю.Б., Толстошеев А.П., Холод А.Л. и др. Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 3. – С. 50 – 68.
16. Лебедев Н.Е., Савоськин В.М., Станичный С.В. Определение поверхностной температуры и перепада температуры в скин-слое с борта движущегося судна по данным ИК-измерений // Там же. – 1994. – № 2. – С. 83 – 88.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: e.a.akimov88@gmail.com

Материал поступил  
в редакцию 05.02.14  
После доработки 11.03.14

**АНОТАЦІЯ** Дані сканера *SEVIRI* використані для відновлення температури поверхневого шару Чорного моря. Виконано порівняння температури поверхні моря, отриманої супутниковим сенсором і виміряної дрейферами. Середньоквадратичне відхилення різниці цих температур склало 0,45 К. Розроблено методику зменшення помилки відновлення поверхневої температури моря, засновану на статистичній обробці даних і застосуванні параметризації перепаду температури в скин-шарі з використанням даних про швидкість приводного вітру, розрахованих за допомогою системи атмосферного моделювання *SKIRON*. Отримана лінійна залежність різниці дрейферних і супутникових даних від швидкості вітру дозволила знизити загальну помилку відновлення температури поверхні моря до 0,29 К для нічних вимірювань.

**Ключові слова:** температура поверхні моря, дистанційні методи дослідження, *SEVIRI*.

**ABSTRACT** *SEVIRI* scanner derived data are used to retrieve sea surface temperature of the Black Sea. Sea surface temperatures resulted from satellite sensor and drifters' measurements are compared. Standard deviation value of the differences between these temperatures constitutes 0.45 K. A technique for decreasing the error of the sea surface temperature retrieval is developed based on data statistical processing and temperature drop parameterization in the skin layer using the surface wind velocity data simulated due to the *SKIRON* atmospheric modeling system. The obtained linear dependence of difference between the drifters' and satellite data upon the wind velocity permits to decrease general error of the sea surface temperature retrieval up to 0.29 K for night time measurements.

**Keywords:** sea surface temperature, methods of remote sensing, *SEVIRI*.