

УДК 551.501.86, 551.521.12

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ПРИХОДЯЩИХ КОРОТКОВОЛНОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2018 г. А. В. Синицын¹, *, С. К. Гулев¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: sinitsyn@sail.msk.ru

Поступила в редакцию 03.07.2017 г.

После доработки 18.12.2017 г.

В работе используются спутниковые данные предоставленные EUMETSAT's Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). Данные представлены с 1982 по 2015 гг. в зависимости от типа спутника и региона покрытия. В результате работы было получено, что для региональных баз данных, в области их перекрытия, среднемесячные и среднесуточные величины завышаются для западной части и занижаются в восточной части области перекрытия на величину порядка 25 Вт/м². Наибольшие величины несогласования потоков отмечаются в точках близких к центрам областей баз данных, где среднеквадратическое отклонение достигает величины примерно 25 Вт/м². В сравнительном анализе глобальных и региональных данных выделяется область, соответствующая центру видимости геостационарных спутников, в которой данные этих спутников сопоставимы с глобальными данными, разница между потоками менее 10 Вт/м². А на периферии области видимости спутника происходит наоборот: данные глобального покрытия выше, чем региональные данные геостационарных спутников более чем на 10 Вт/м² и среднеквадратическое отклонение составляет величину порядка 30 Вт/м² для среднесуточных величин и порядка 45 Вт/м² для среднечасовых.

DOI: 10.1134/S0030157418050167

ВВЕДЕНИЕ

Приходящая коротковолновая радиация (длины волн от 0.2 до 4 мкм) является основным источником тепла для океана, формируя в совокупности с длинноволновой радиацией и турбулентными потоками явного и скрытого тепла тепловой баланс океана. Недавние работы [10] обратили внимание на существенные неопределенности в оценке теплового баланса океана. Были обнаружены [7] нарушения согласованных изменений в межгодовой динамике тепловых потоков между океаном и атмосферой с изменениями температуры поверхности и теплосодержания океана, ранее найденные при анализе турбулентных потоков тепла [4]. В этом смысле точность оценивания коротковолновой радиации по различным данным становится принципиальной для современной динамики климата.

На сегодня наиболее точные оценки коротковолновой радиации доступны по данным спутниковых измерений, которые по длительности временных рядов и пространственному разрешению успешно конкурируют с реанализами и расчетами по данным попутных наблюдений. При этом они лишены многих неопределенностей, свойственных двум упомянутым источникам. Точ-

ность расчетов радиационных потоков по попутным наблюдениям и потоки, получаемые из реанализов, существенно зависят от точности визуального определения облачности (в данных попутных наблюдений) и адекватности представления облачности в реанализах. И в том, и в другом случае характеристики облачности характеризуются существенными погрешностями [2], что в значительной степени определяет недостоверность радиационных потоков по этим данным.

Хотя спутниковая эра измерений приходящей коротковолновой радиации насчитывает несколько десятков лет, развитие технологий в этой области гарантирует, что в ближайшее десятилетие спутниковые данные станут основным источником информации о коротковолновой радиации в глобальном масштабе. Уже сегодня они позволяют получать данные о коротковолновых потоках с высоким пространственным разрешением до $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ и временным разрешением, например, для Атлантического и Индийского океанов в 15 мин. В этом смысле важной задачей является взаимное сравнение и валидация различных спутниковых данных о коротковолновой радиации, различающихся по типам сканирующей аппаратуры и принципам измерений.

Спутниковые данные предоставленные EUMETSAT's Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)

База данных	Период	Покрытие	Разрешение по времени	Разрешение по сетке	Тип инструмента
SARAH SIS – Surface incoming shortwave radiation	1983-01-01– 2013-12-31	70° ю.ш.–70° с.ш., 70° з.д.–70° в.д.	Среднечасовые Среднесуточные Среднемесячные	0.05° × 0.05°	MVIRI/SEVIRI на спутниках METEOSAT
SARAH-E SIS – Surface incoming shortwave radiation	1999-01-01– 2015-12-31, пропуск 2006	70° ю.ш.–70° с.ш., 10° з.д.–130° в.д.	Мгновенные Среднесуточные Среднемесячные	0.05° × 0.05°	MVIRI на спутниках METEOSAT первого поколения
CLARA-A1 SIS – Surface incoming shortwave radiation	1982-01-01– 2009-12-01	Глобальная	Среднесуточные Среднемесячные	0.25° × 0.25°	Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) на полярно орбитальных спутниках

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ЗАДАЧИ ВЗАИМНОЙ КАЛИБРАЦИИ

В данной работе мы впервые проводим детальное сравнение спутниковых массивов данных, предоставляемых Европейским Агентством Метеорологических спутников (EUMETSAT), в рамках миссии Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). Данные покрывают период с 1982 по 2015 гг. в зависимости от типа спутника и региона покрытия. Массив данных суммарного проходящего коротковолнового солнечного потока CLARA-A1 [6] полученный с помощью Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) на полярно-орбитальных спутниках, имеет глобальное покрытие. Региональные массивы суммарного проходящего коротковолнового солнечного потока SARAH [9] для Атлантического океана и SARAH-E [5] для Индийского океана получены с помощью инструментов MVIRI/SEVIRI на борту геостационарных спутников. В таблице приводятся сведения об используемых массивах данных.

Целью работы является сопоставление упомянутых выше спутниковых массивов данных проходящих коротковолновых потоков с целью количественной оценки их различий для пересекающихся областей наблюдений в совпадающие моменты времени. Для сравнительного анализа нами будут рассчитаны поля средних разностей и среднеквадратических отклонений между пересекающимися по пространству массивами данных проходящих коротковолновых потоков, что позволит сделать выводы о возможности их совместного использования, а также различий (в том числе и региональных) между массивами. Кроме того, проводимое сопоставление позволит определить пригодность различных спутниковых данных для проверки интегральных параметризаций для расчетов коротковолновой радиации, разработанных

и протестированных на региональном масштабе, например, для Атлантического океана [1].

СРАВНЕНИЕ МАССИВОВ ДАНЫХ SARAH И SARAH-E

Появившиеся недавно базы данных SARAH и SARAH-E обладают высоким пространственным и временным разрешением для Атлантического и Индийского океанов. Эти базы данных имеют область перекрытия (примерно 70° ю.ш.–70° с.ш., 10° з.д.–70° в.д.), в которой интересно рассмотреть сопоставимость данных о проходящих коротковолновых потоках для масштабов времени от суток до месяцев за период времени с 01.01.1999 по 31.12.2013 гг.

Рисунок 1а, 1б показывает величину систематической разницы между данными среднесуточных значений проходящих потоков SARAH и SARAH-E, а также величины среднеквадратических отклонений между данными среднесуточных значений проходящих потоков SARAH и SARAH-E. Как видно из рис. 1, среднесуточные значения проходящих коротковолновых потоков массива SARAH выше, чем SARAH-E в западной части области перекрытия (тропическая и среднеширотная Южная Атлантика) на 20–30 Вт/м², при этом в восточной части области перекрытия (тропическая и субтропическая области западной части Индийского океана) наблюдается обратная картина: потоки в SARAH-E выше, чем в SARAH, примерно на такую же величину. Наибольшие величины рассогласований потоков коротковолновой радиации отмечаются в точках, близких к “виртуальным центрам” массивов данных и достигают величин 30–35 Вт/м².

Подобная картина наблюдается также и при расчетах по среднемесячным величинам, с той

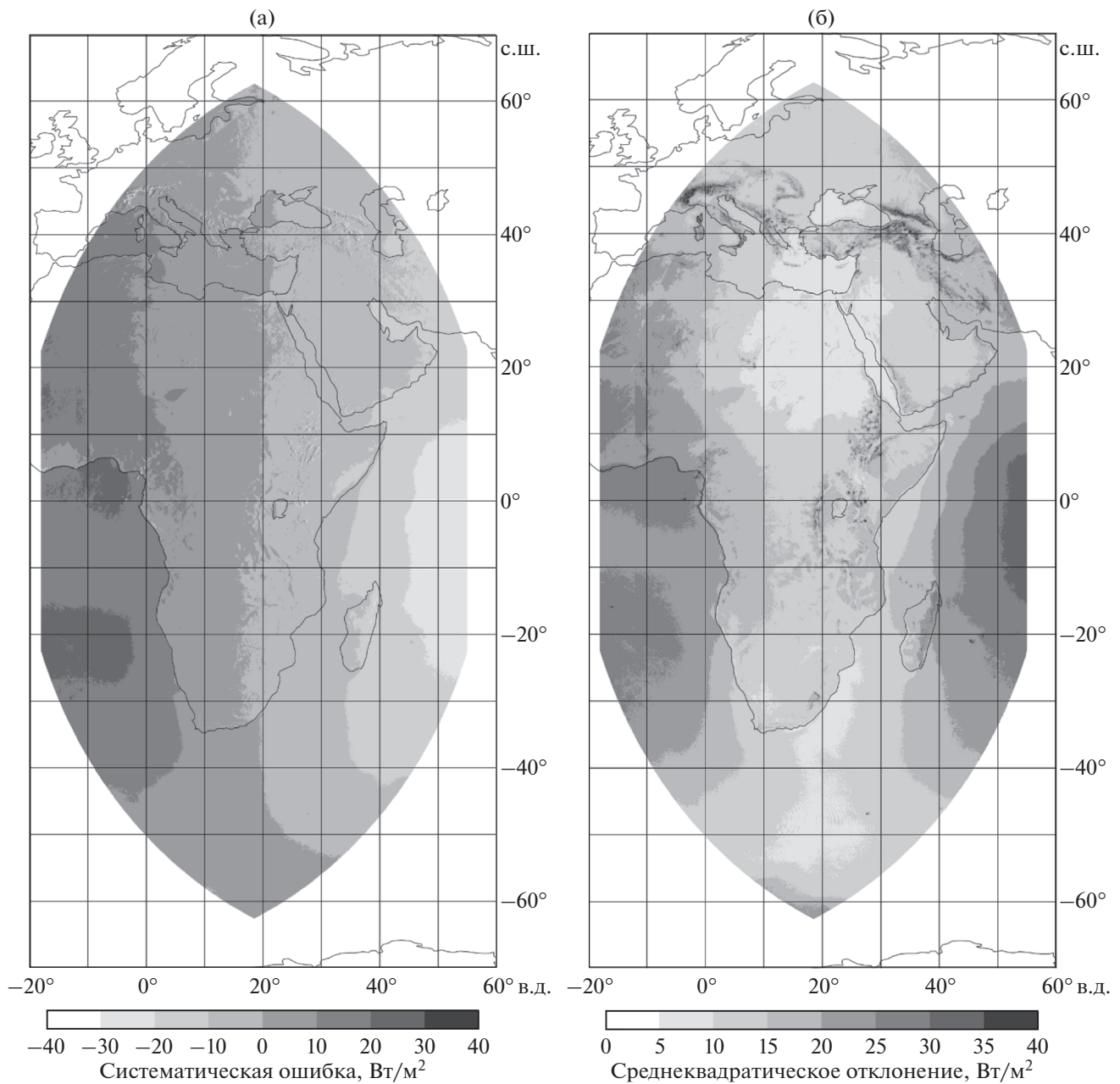


Рис. 1. Систематическая ошибка (а) и (б) среднее квадратическое отклонение между данными среднесуточных значений приходящих потоков SARAH и SARAH-E.

лишь разницей, что области максимальных различий менее выражены, хотя разность между величинами потоков остается практически без изменения. Причиной этого в первую очередь является количество случаев, попадающих в ансамбль осреднения: по среднемесячным и среднесуточным данным — 168 и 5114 соответственно. Проявлением этого является то, что поля среднесуточных величин приходящих коротковолновых потоков являются существенно менее сглаженными по сравнению со среднемесячными полями.

Таким образом, при смещении к краю области, видимой спутником, точность данных о потоках коротковолновой радиации снижается. Это хорошо видно на рис. 1б, показывающем существенное увеличение среднее квадратических отклонений между среднесуточными значениями приходящих коротковолновых потоков SARAH и SARAH-E при удалении от виртуальных полюсов спутниковых массивов. Аналогичный вывод был получен нами ранее при сравнении данных прямых инструментальных измерений коротковол-

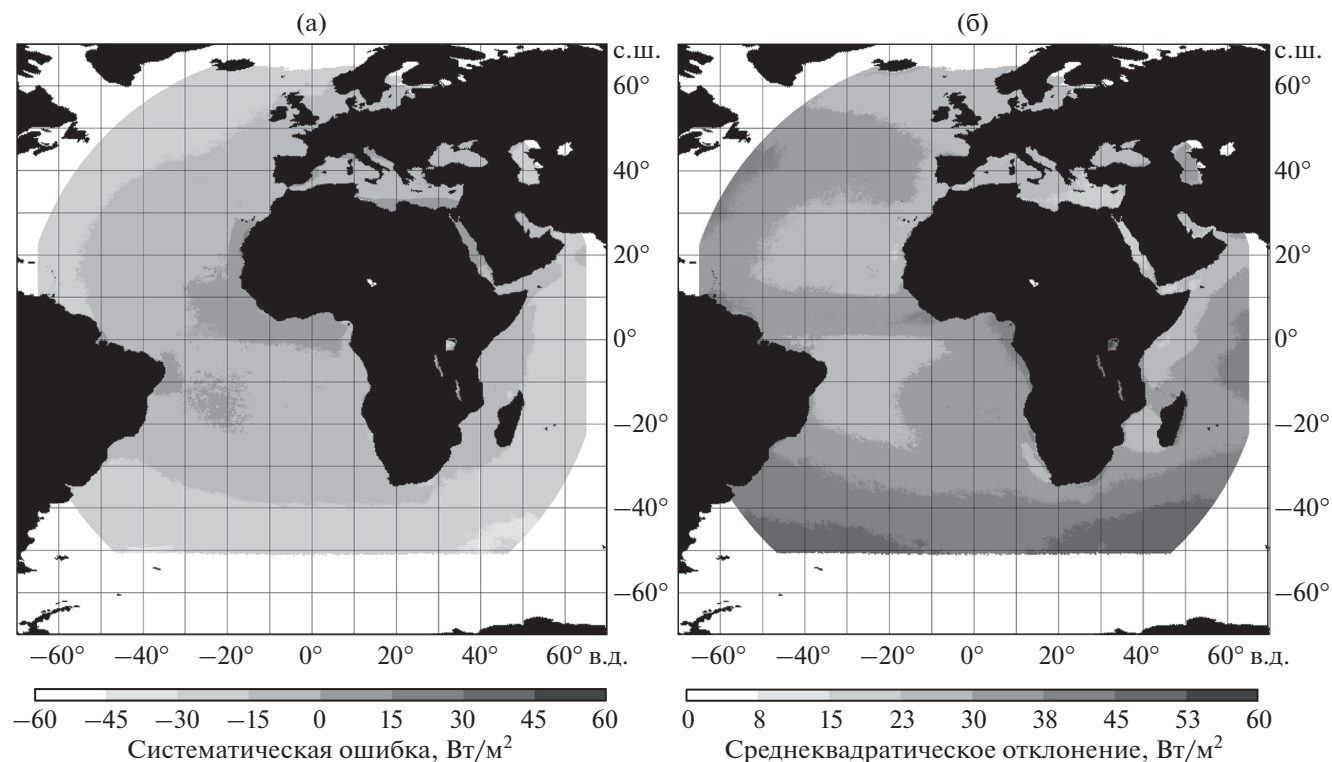


Рис. 2. Систематическая ошибка (а) и (б) среднее квадратическое отклонение между данными среднесуточных значений приходящих потоков SARAH и CLARA-A1.

новой радиации и спутниковых данных [1]. Проведенное сопоставление, таким образом, свидетельствует, что при использовании региональных спутниковых данных о приходящих потоках коротковолновой солнечной радиации даже родственных спутниковых миссий (SARAH и SARAH-E) предпочтение надо отдавать данным, которые локализованы наиболее близко к виртуальному полюсу спутникового массива, так как разница между данными о потоках в краевых областях различных баз данных может достигать нескольких десятков $Вт/м^2$. Это надо учитывать при использовании данных прямых наблюдений для валидации или использовании спутниковых данных для выполнения региональных оценок.

СРАВНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ДАННЫХ CLARA-A1 С РЕГИОНАЛЬНЫМИ SARAH И SARAH-E

Для проведения сравнительного анализа данных SARAH и SARAH-E и массива CLARA-A1 последний был проинтерполирован с исходной сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на сетку $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Использовался алгоритм двумерной линейной интерполяции, что вполне обосновано для радиационных потоков, относительно гладко меняющихся в пространстве по сравнению, например, с атмосферными осадками или ветром, интерполяция

которых требует более точных алгоритмов [11]. Это дало возможность прямого сопоставления различных массивов в узлах сетки, на которую была проведена интерполяция. Далее для каждого регионального массива данных был выбран максимальный по продолжительности временной отрезок, который перекрывается во времени с массивом глобальных данных о приходящих коротковолновых потоках на поверхности Земли. Для SARAH этот период времени составляет с 1 января 1983 г. по 1 января 2009 г., а для SARAH-E — с 1 января 1999 г. по 1 января 2009 г.

На рис. 2 и 3 приведены результаты сравнения данных о потоках коротковолновой радиации между массивами SARAH и CLARA-A1 и между SARAH-E и CLARA-A1 соответственно.

В первую очередь при сравнительном анализе выделяется область, соответствующая центру видимости геостационарных спутников, в которой региональные данные достаточно хорошо сопоставимы с глобальными данными: разница между потоками коротковолновой радиации не превышает 15 Вт/м^2 . При этом на периферии области видимости спутника соотношение между радиационными потоками двух массивов качественно меняется: здесь коротковолновые потоки по глобальным спутниковым данным CLARA-A1 показывают более высокие значения по сравнению с

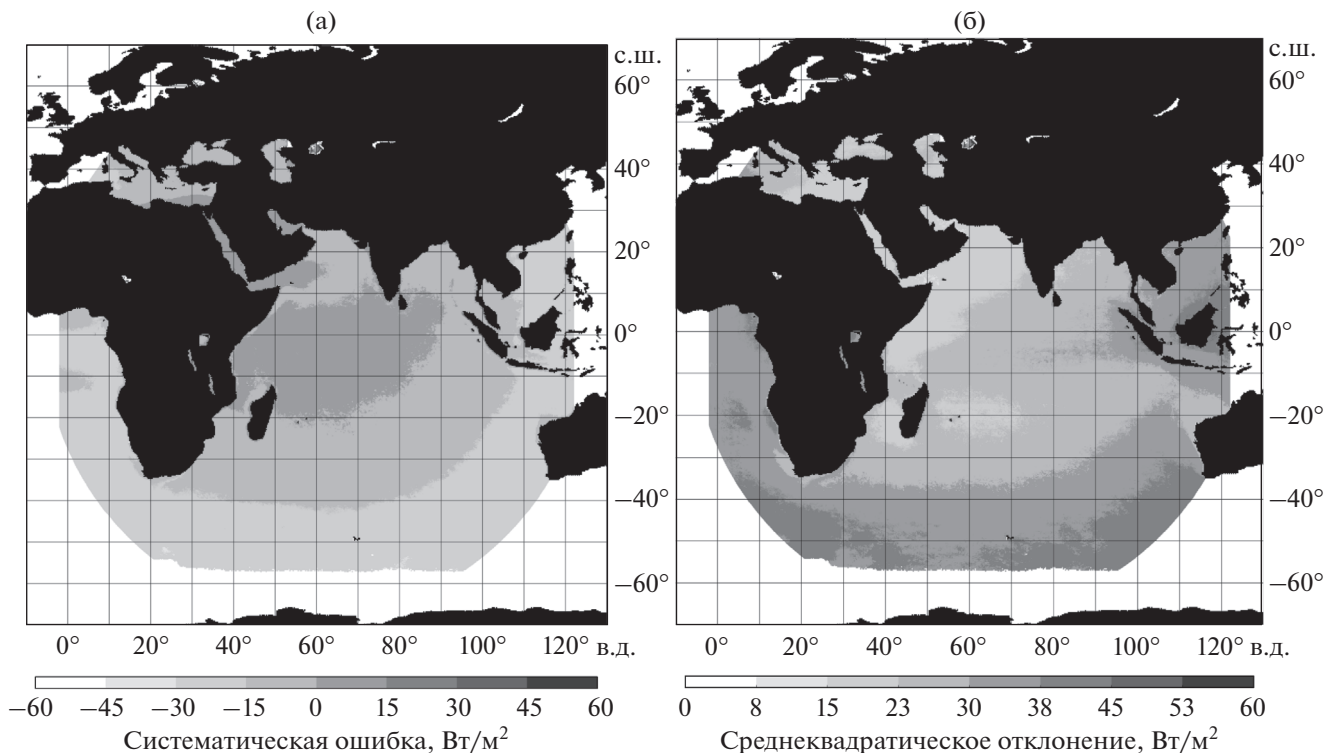


Рис. 3. Систематическая ошибка (а) и (б) среднеквадратическое отклонение между данными среднесуточных значений приходящих потоков SARAH-E и CLARA-A1.

данными геостационарных спутников, причем среднесуточные различия могут достигать примерно 30 Вт/м^2 .

Для понимания причин такого характера наблюдаемых различий необходимо представлять особенности спутниковых измерений, на основе которых формируются соответствующие массивы данных. Массивы данных SARAH и SARAH-E получены с помощью радиометров MVIRI/SEVIRI и MVIRI установленных на геостационарных спутниках METEOSAT первого и второго поколений. Данные спутники располагаются над точками 0° и 57° в.д. в плоскости экватора. На них находятся схожие по принципу работы радиометры MVIRI и SEVIRI, имеющие соответственно 3 и 12 принимающих каналов в видимом и инфракрасном диапазонах спектра излучения, которые создают изображения путем сканирования Земли каждые 15 и 25 мин соответственно. Дополнительно измеряя характеристики поглощения озона, водяного пара и диоксида углерода радиометрами спутников METEOSAT позволяют анализировать характеристики воздушных масс атмосферы, что делает возможным в дальнейшем восстановление трехмерной картины состояния пропускания атмосферы. Также у инструмента SEVIRI имеется дополнительный высокоразрешающий канал в видимом диапазоне спектра (HRV), который в направлении в нади́р сканирует про-

странство с разрешением в 1 км, в отличие от других сканирующих каналов видимого спектра, пространственное разрешение которых составляет 3 км [8].

Массив CLARA-A1 формируется с помощью полярно-орбитальных спутников NOAA-7 – NOAA-19 и Metop-A, на борту которых были установлены радиометры AVHRR различных версий, имеющие от 4 до 6 спектральных принимающих каналов и сканирующее с разрешение в нади́ре порядка 1 км. Вращаясь на солнечно-синхронной орбите и сканируя поверхность Земли от горизонта к горизонту в полосе размером примерно 800 м на 2900 км, спутник дает возможность получить полную картину земной поверхности дважды в сутки [6].

Эта информация позволяет объяснить возникновение различных по знаку разностей в величинах коротковолновых потоков в центре и на краях областей, видимых геостационарными спутниками. Дело в том, что точность в массивах SARAH и SARAH-E убывает от центра видимой области к ее краям (этот же эффект отмечался ранее и при сравнении массивов SARAH и SARAH-E), при этом точность в массиве данных с полярно-орбитальных спутников в относительно узкой полосе сканирования, остается однородной.

Отметим, что характеристики среднеквадратических отклонений между глобальными и региональными спутниковыми данными о коротковолновых потоках хорошо согласуются с распределением облачности [3]. Минимальные отклонения для среднесуточных величин приходящих коротковолновых потоков соответствуют областям с наименьшим облачным покрытием и составляют величины порядка 20 Вт/м^2 . С ростом среднего балла облачности, соответственно, возрастает и среднеквадратическое отклонение, достигающее величин 50 Вт/м^2 в областях со сплошной облачностью.

Аналогичная картина наблюдается и при сравнении среднемесячных величин приходящих коротковолновых потоков для различных массивов данных. Отличие лишь в том, что с уменьшением размера ансамбля осреднения в 365 раз (число дней в году) мы получаем более сглаженную картину приходящих потоков, что приводит к уменьшению величин среднеквадратического отклонения при сравнении массивов коротковолновых потоков от практически близких друг к другу величин (разности около 0 Вт/м^2) в центре области до 30 Вт/м^2 в средних широтах южной Атлантики и Индийского океана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате сравнительного анализа региональных спутниковых массивов данных SARAH и SARAH-E приходящих коротковолновых потоков, полученных измерениями геостационарными искусственными спутниками, было показано, что погрешности существенно увеличиваются от центра к периферии области покрытия, при этом расхождения в величинах потоков для одной и той же области могут достигать 30 Вт/м^2 . Анализ данных сканирующих радиометров AVHRR глобального массива CLARA-A1 показывает более однородную картину для систематических и случайных погрешностей потоков коротковолновой радиации. При этом величина рассогласования между массивами данных остается на прежнем уровне и недооценка потоков коротковолновой радиации для периферийных областей сканирования составляют примерно 30 Вт/м^2 .

В массивах данных SARAH и SARAH-E в силу их лучшего пространственного и временного разрешения лучше учитывается влияние облачности на величины потоков коротковолновой радиации. Для областей с большой облачностью среднеквадратическое отклонение величин потоков коротковолновой радиации может достигать 50 Вт/м^2 , что говорит о довольно низкой точности, поскольку при высокой облачности сами значения коротковолновой радиации уменьшаются. При использовании для сопоставления сред-

немесячных значений поля среднеквадратических отклонений имеют выраженную концентрическую структуру с увеличением значений среднеквадратических отклонений от центра к периферии области от близких к нулю значений до величин более 30 Вт/м^2 .

В заключение отметим следующее. В период с марта 2016 г. по май 2017 г. нами были проведены прямые инструментальные наблюдения прибором Kipp and Zonen суммарных приходящих коротковолновых солнечных потоков для точки с координатами 55.71° с.ш. и 37.53° в.д. (метеосерватория МГУ) и выполнено сравнение с оперативными данными суммарных приходящих коротковолновых солнечных потоков по спутниковым измерениям для геостационарных и полярно-орбитальных спутников. При сравнении было получено, что среднемесячные величины потоков коротковолновой радиации по спутниковым данным и инструментальным измерениям практически не различаются: спутниковые данные дают 145 Вт/м^2 , а инструментальные измерения – 139 Вт/м^2 . При этом среднеквадратические отклонения среднемесячных величин потоков коротковолновой радиации между различными спутниковыми массивами данных составили примерно 4.5 Вт/м^2 , а между спутниковыми и инструментальными данными – примерно 7.5 Вт/м^2 . При сравнении среднесуточных потоков коротковолновой радиации были получены следующие характеристики средних величин: для геостационарных спутников – примерно 120 Вт/м^2 , для полярно-орбитальных – 140 Вт/м^2 , для инструментальных измерений – 114 Вт/м^2 . Соответствующие величины среднеквадратических отклонений между различными массивами спутниковых данных составили 14 Вт/м^2 , а между инструментальными измерениями и спутниковыми данными $22\text{--}25 \text{ Вт/м}^2$, при этом меньшие величины среднеквадратических отклонений были получены для геостационарных спутников. Выполненное сравнение достаточно показательно и подтверждает правильность полученных выводов. В дальнейшем аналогичное сравнение с данными инструментальных измерений будет проведено по наблюдениям в Атлантическом и Индийском океанах.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.616.21.0075, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61617X0075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнение натуральных и спутниковых данных о приходящих коротковолновых потоках солнечной радиации для Атланти-

- ческого Океана в период 2004–2014 гг. // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 2. С. 268–274.
2. *Bedacht E., Gulev S.K., Macke A.* Intercomparison of global cloud cover fields over oceans from the VOS observations and NCEP/NCAR reanalysis // *International Journal of Climatology*. 2007. V. 27. № 13. P. 1707–1719. doi 10.1002/joc.1490
 3. *Finkensieper S., Hanschmann T., Stengel M. et al.* CM SAF Validation Report SEVIRI cloud products CLAAS Edition 2 // EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF), 2016. 88 p.
 4. *Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N. et al.* North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature*. 2013. V. 499. P. 464–467. <https://doi.org/10.1038/nature12268>.
 5. *Huld T., Müller R., Gracia Amillo A. et al.* Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat, Meteosat-East (SARAH-E) – Edition 1 // Satellite Application Facility on Climate Monitoring. 2016. doi 10.5676/DWD/JECD/SARAH_E/V001
 6. *Karlsson K.-G., Riihelä A., Müller R. et al.* CLARA-A1: a cloud, albedo, and radiation dataset from 28 yr of global AVHRR data // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. V. 13. P. 5351–5367. doi 10.5194/acp-13-5351-2013
 7. *Liang X., Yu L.* Variations of the Global Net Air–Sea Heat Flux during the “Hiatus” Period (2001–10) // *J. of Climate*. 2016. V. 29. P. 3647–3660, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0626.1>.
 8. *Meteosat second generation: the satellite development* / Ed. Battrick B. Noordwijk: ESA BR / Europe space agency, 1999. 55 p. ISBN 92-9092-634-1.
 9. *Müller R., Pfeifroth U.; Träger-Chatterjee C. et al.* Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 1 // Satellite Application Facility on Climate Monitoring. 2015. doi 10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V001
 10. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Balmaseda M.A.* Earth’s Energy Imbalance // *Journal of Climate*. 2014. V. 27. P. 3129–3144, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00294.1>.
 11. *Stoffelen A.* Toward the true near-surface wind speed: error modeling and calibration using triple collocation // *J. of Geoph. Res.* 1998. Res. 103 (C4). P. 7755–7766. <http://dx.doi.org/10.1029/97JC03180>.

Comparative Analysis Satellite Data of Incoming Shortwave on the Ocean Surface

A. V. Sinitssyn, S. K. Gulev

The satellite data provided by EUMETSAT’s Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) is used in this work. Data are presented from 1982 to 2015, depending on the type of satellite and coverage region. It was found that for regional databases in the area of overlapping, the daily and monthly mean values are overestimated for the western part and are underestimated in the eastern part of the region by an amount of the order of 25 W/m^2 . The largest values of the inconsistency of the fluxes are close to the centers of the database regions, where the RMS is approximately 25 W/m^2 . In a comparative analysis of global and regional data two areas of the field of view for geostationary satellites can be noted – central and peripheral. Difference between the fluxes is less than 10 W/m^2 , in the central area. In the peripheral part – the global data more than 10 W/m^2 higher and the standard deviation is about 30 W/m^2 for the daily mean and about 45 W/m^2 for the hourly mean.