

УДК 551.506.5, 551.501.86

## СРАВНЕНИЕ НАТУРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О ПРИХОДЯЩИХ КОРТКОВОЛНОВЫХ ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА В ПЕРИОД 2004–2014 гг.

© 2017 г. А. В. Сеницын, С. К. Гулев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 16.08.2016 г.

Информация о коротковолновых (длины волн от 0.2 до 4 мкм) радиационных потоках тепла на поверхности океана доступна из немногочисленных судовых наблюдений и отдельных буюв, а также из архивов спутниковых данных. В настоящее время наиболее полный архив о коротковолновых радиационных потоках предоставляют оперативные геостационарные искусственные спутники земли (далее “спутники”) типа METEOSAT первого и второго поколений (ЕС), GOES (США), HIMAWARI (Япония), оборудованные сканерами видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра и позволяющие получать каждые 0.5 ч изображения диска Земли. Для получения данных о среднесуточных и среднемесячных величинах приходящего коротковолнового потока солнечной радиации также могут быть использованы европейские спутники EPS/MetOP и американские спутники NOAA на средневысотных приполярных солнечно-синхронных орбитах с радиометром AVHRR на борту [1]. Спутниковым данным о радиационных потоках тепла, несомненно, принадлежит ведущая роль в будущем, однако в настоящее время они доступны только за последние несколько десятилетий и остаются достаточно неточными, требуя детальной валидации.

DOI: 10.7868/S0030157417020198

### ВВЕДЕНИЕ

Радиационные потоки энергии на границе океан–атмосфера являются, наряду с турбулентным обменом, ключевым процессом при взаимодействии этих компонентов. Коротковолновая солнечная радиация является главным источником тепла для океана. Информация о коротковолновых радиационных потоках тепла на поверхности океана доступна из немногочисленных судовых наблюдений и отдельных буюв, а также из архивов спутниковых данных. В настоящее время наиболее полный архив о коротковолновых радиационных потоках предоставляют оперативные геостационарные искусственные спутники земли (далее “спутники”) типа METEOSAT первого и второго поколений (ЕС), GOES (США), HIMAWARI (Япония), оборудованные сканерами видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра и позволяющие получать каждые 0.5 часов изображения диска Земли. Для получения данных о среднесуточных и среднемесячных величинах приходящего коротковолнового потока солнечной радиации также могут быть использованы европейские спутники EPS/MetOP и американские спутники NOAA на средневысотных приполярных солнечно-синхронных орбитах с радиометром AVHRR на борту [1]. Спутниковым данным о

радиационных потоках тепла, несомненно, принадлежит ведущая роль в будущем, однако в настоящее время они доступны только за последние несколько десятилетий и остаются достаточно неточными, требуя детальной валидации.

Целью данной работы является сопоставление спутниковых измерений приходящих коротковолновых потоков солнечной радиации с высокоточными данными инструментальных наблюдений. С одной стороны, это позволит оценить точность спутниковых данных в зависимости от балла общей облачности и высоты Солнца над горизонтом – двух основных параметров, характеризующих приходящие потоки солнечной радиации на поверхности океана, а с другой – получить материал для дальнейшего развития параметризаций коротковолновой солнечной радиации на поверхности океана, используемых для массовых расчетов потоков по данным наблюдений за облачностью [4].

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе используется климатология среднечасовых величин приходящего коротковолнового потока солнечной радиации The Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat (SARAH),

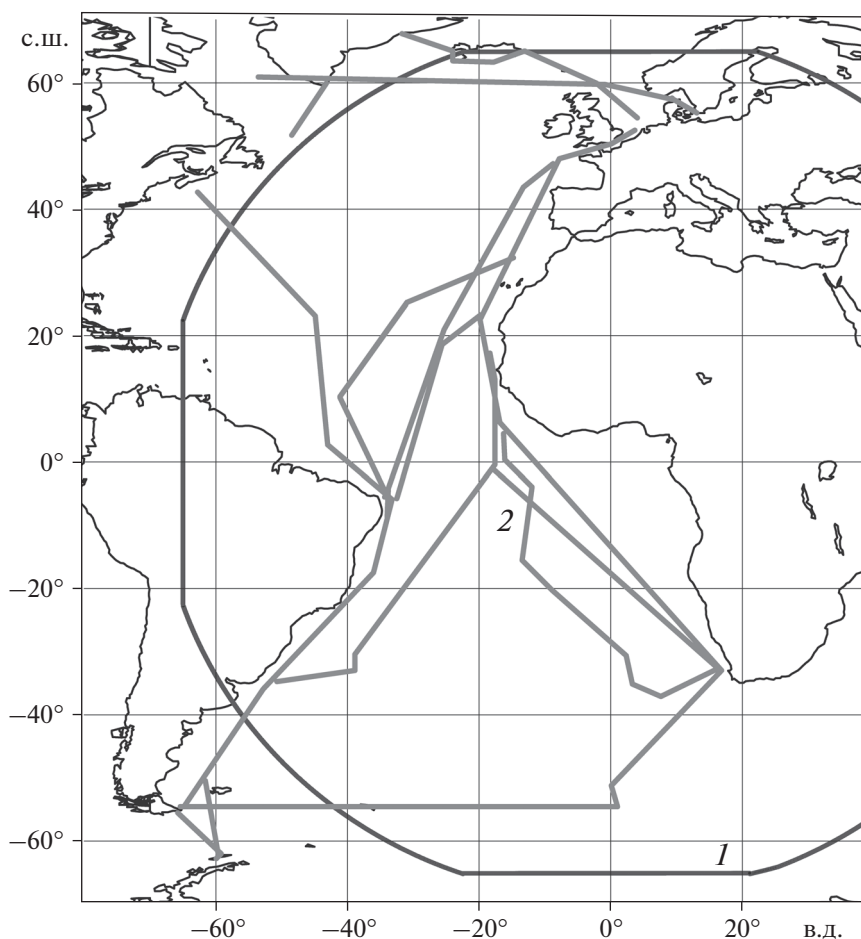


Рис. 1. Граница области видимости спутника Meteorol Second Generation для региона Атлантического океана (1). Маршруты научных рейсов 2004–2014 гг. (2).

созданная EUMETSAT's Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). Говоря о коротковолновой радиации, здесь подразумеваются данные о потоке солнечного излучения на горизонтальную поверхность Земли с длинами волн от 0.2 до 4 мкм, выраженные в Вт/м<sup>2</sup>. Область покрытия включает в себя Европу, Африку и большую часть Атлантического океана. Это квазиокружность с крайними точками 65° для северного, южного, западного и восточного полушарий (рис. 1).

Данные получены с помощью инструментов SEVIRI/GERB, установленных на геостационарных метеорологических спутниках второго поколения (Meteorol Second Generation – MSG) Европейской организации спутниковой метеорологии. Измерительный модуль SEVIRI имеет 12 принимающих каналов в видимом и ИК спектрах излучения и генерирует изображения путем сканирования Земли каждые 15 минут. Дополнительно производятся измерения характеристик поглощения озона, водяного пара и двуокси углерода. Спутники MSG позволяют анализиро-

вать характеристики воздушных масс атмосферы, что делает возможным в дальнейшем восстановить трехмерную структуру атмосферы. Также имеется высокоразрешающий канал в видимом спектре (HRV), который в направлении в надир сканирует пространство с разрешением в 1 км, в отличие от других сканирующих каналов видимого спектра, пространственное разрешение которых – 3 км. Вращаясь со скоростью 100 оборотов в минуту, спутник производит сканирование Земли “построчно”. Процесс сканирования видимого диска Земли занимает 12 минут; еще 3 минуты необходимы для калибровки и установки сканирующих зеркал в начальное положение.

Другой прибор, находящийся на спутниках MSG, это сканирующий радиометр для мониторинга погоды и радиационного баланса Земли (GERB). Он имеет два широкополосных канала: один покрывает солнечный спектр, а другой охватывает оставшийся диапазон электромагнитных волн. Эти каналы полностью перекрывают спектральный диапазон двенадцати более узких

каналов у SEVIRI. Таким образом, GERB заполняет все пробелы в спектре излучения [7].

Для валидации спутниковых радиационных измерений нами использовались наблюдения, полученные в рейсах НИС “Академик Сергей Вавилов”, “Академик Иоффе”, “Polarstern” с 2004 по 2014 гг. (табл. 1, рис. 1). В ходе этих экспедиций для измерений приходящей коротковолновой радиации использовался измерительный комплекс Kipp&Zonen CNR-1 [6]. Таким образом, выполненные наблюдения составили уникальную базу данных из примерно 4000 прямых наблюдений солнечной радиации при различных условиях облачности и высотах Солнца, которые хорошо подходят для проведения подспутникового эксперимента для сравнения натуральных и спутниковых данных.

### СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ И НАТУРНЫХ ДАННЫХ НАУЧНЫХ РЕЙСОВ В ПЕРИОД 2004–2014 гг.

Одним из важных вопросов при работе со спутниковыми данными является выбор пространственного масштаба осреднения при сравнении с натурными данными. Для решения этой проблемы необходимо исходить из двух важных моментов. Во-первых, пространственное разрешение спутникового снимка составляет  $0.05 \times 0.05^\circ$ , что соответствует примерно ячейке  $5 \times 5$  км для широты экватора, а по мере удаления от экватора долготная составляющая этого квадрата будет уменьшаться. Во-вторых, область, видимая с палубы, где установлен радиометр, до горизонта представляет окружность радиусом около 13–14 км (высота установки прибора над уровнем моря порядка 12–13 м). Исходя из этих условий, был разработан алгоритм расчета среднечасового потока, приходящего на поверхность Атлантического океана, в соответствии с положением судна в данный момент времени. Согласно алгоритму, пространственное осреднение осуществляется по нескольким ячейкам. Центральная – в которой в текущий момент расположено судно. В северном и южном направлениях берется по две соседних ячейки, что дает протяженность области  $0.25^\circ$  широты, или около 25 км. Аналогично – с запада на восток, где, в соответствии с текущей широтой места, учитывается сходимость меридианов при расчете длины в километрах. Далее получившаяся сумма величин приходящей коротковолновой радиации в каждом квадрате, измеренных со спутника, делится на количество ячеек пространственного осреднения, и получается среднечасовая величина приходящего коротковолнового потока. Алгоритм учитывает также расположение судна у границ области покрытия спутником и пропущенные

или некорректные данные в спутниковых измерениях.

В итоге был сформирован массив потоков коротковолновой радиации, которые были одновременно измерены судовым комплексом и спутником. Этот массив составил около 3000 среднечасовых значений.

Средние величины коротковолновых потоков, полученных путем натуральных и спутниковых наблюдений по всему массиву данных, получились очень близкими  $425$  и  $428 \text{ Вт/м}^2$  со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $69 \text{ Вт/м}^2$ . В табл. 1 приведены статистические характеристики измерений коротковолновых потоков и общего балла облачности для каждого из рейсов (% – относительная погрешность – отношение СКО к средней величине потока в рейсе). Рейсы, проведенные вдоль  $60^\circ$  с.ш. и  $55^\circ$  ю.ш., характеризуются более высоким общим баллом облачности, что является следствием высокой штормовой активности в этих районах [2] и частой повторяемостью режимов сплошной облачности (Sc, Ns, St). Рейсы, пересекающие Атлантику с севера на юг, проходили преимущественно в тропических и экваториальных зонах Атлантического океана, которые характеризуются менее оптически плотной облачностью (Си хорошей погоды, Ас, Сi). Как следствие, здесь отмечается меньшая величина среднего балла общей облачности.

В первую очередь, отмечается тенденция занижения величин радиации по спутниковым данным для широтных рейсов и обратная тенденция для меридиональных рейсов (рис. 2а). По всей видимости, это связано с тем, что широтные рейсы проходят в более сухих районах Атлантического океана (вторая половина 1-го, 2, 9, 11, 12), чем меридиональные. Учитывая, что модель пересчета результатов сканирования в величины радиации по спутниковым данным была откалибрована по континентальным станциям BSRN [9] для более влажных районов, где в действительности поглощение приходящих коротковолновых потоков будет проявляться сильнее, мы получаем завышение величин радиации по спутниковым данным. Косвенно это подтверждается величиной коэффициента прозрачности атмосферы при числе оптических масс, равной 2 ( $P_2$  из табл. 1), который имеет тесную корреляционную связь с парциальным давлением водяного пара. Очевидно четкое разделение массива наблюдений на широтные рейсы ( $P_2 = 0.76–0.77$ ) и меридиональные ( $P_2 = 0.72–0.74$ ). При этом для спутниковых расчетов была принята средняя величина  $P_2 = 0.75$  [2].

Зависимость среднеквадратического отклонения потоков коротковолновой радиации от среднего балла облачности за период рейса (рис. 2б) не обнаруживает устойчивой зависимости. В этом смысле величину СКО наиболее правильно рас-

Таблица 1. Маршруты научных рейсов и объем данных полученных в рейсах. Статистические характеристики измерений коротковолновых потоков и общего балла облачности Окта для каждого из рейсов

Количество наблюдений	НИС	Дата рейса	Район измерений	Разница (CNRI – спутник)	СКО	%	Средний балл облачности ОКТА	P2
606	НИС “Академик Сергей Вавилов”	октябрь–декабрь 2004 г.	Меридиан с севера на юг. 55° ю.ш.	-2.5	79.0	21	6.6	0.75
236		октябрь–ноябрь 2004 г.	Меридиан с севера на юг	-22.4	81.9	19	6.1	0.73
370		ноябрь–декабрь 2004 г.	55° ю.ш.	11.4	76.9	22	6.9	0.77
190	НИС “Академик Иоффе”	июнь–июль 2005 г.	60° с.ш.	13.5	55.8	27	7.5	0.76
719	НИС “Академик Иоффе”	сентябрь–ноябрь 2005 г.	Меридиан с севера на юг	-12.9	86.7	20	5.4	0.73
318	НИС “Академик Иоффе”	март–апрель 2006 г.	Меридиан с юга на север	0.8	57.9	14	5.9	0.73
382	НИС “Академик Иоффе”	октябрь–ноябрь 2006 г.	Меридиан с севера на юг	-5.7	65.6	14	4.7	0.72
239	R/V “Polarstern”	апрель–май 2007 г.	Меридиан с юга на север	-15.9	51.1	10	4.5	0.73
199	НИС “Академик Иоффе”	октябрь 2007 г.	Меридиан с севера на юг	-15.2	67.3	14	6.3	0.72
254	НИС “Академик Иоффе”	октябрь–ноябрь 2009 г.	Меридиан с севера на юг	-6.2	52.5	11	6.1	0.74
186	НИС “Академик Иоффе”	сентябрь 2010 г.	60° с.ш.	22.8	60.9	28	5.8	0.76
524	НИС “Академик Иоффе”	сентябрь–ноябрь 2011 г.	Меридиан с севера на юг	9.3	66.9	14	4.6	0.72
284	НИС “Академик Иоффе”	июль 2014 г.	60° с.ш.	4.3	63.2	21	6.1	0.75
112	НИС “Академик Иоффе”	сентябрь 2014 г.	60° с.ш.	0.9	47.8	30	6.8	0.76

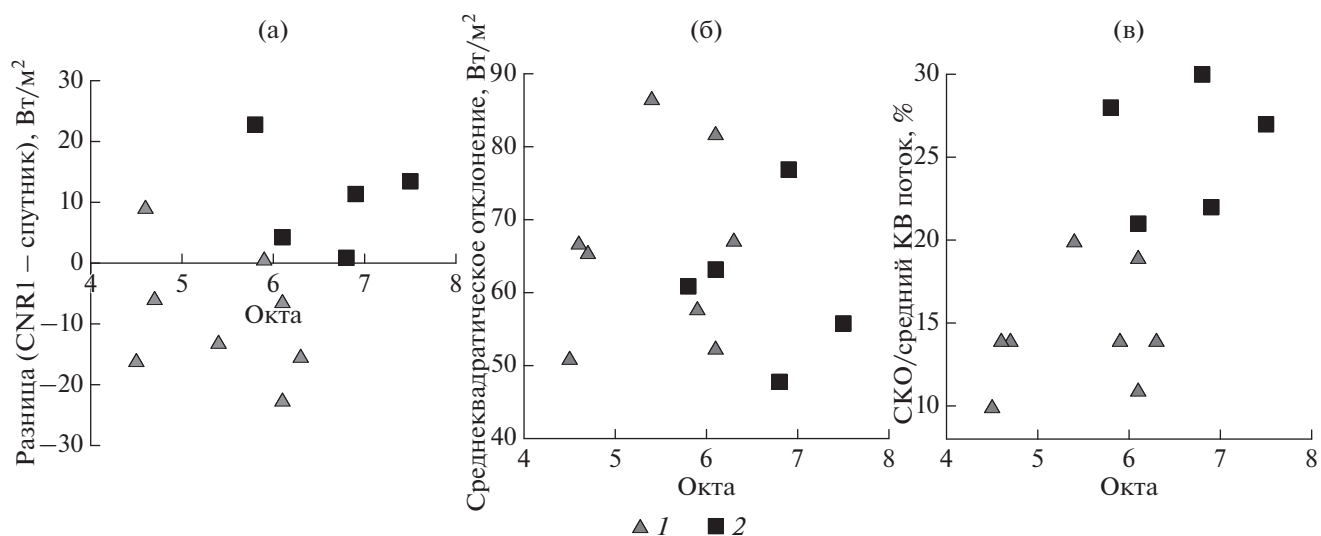


Рис. 2. Зависимость от среднего балла облачности (Окта) в рейсе, для меридиональных (1) и широтных (2) рейсов: (а) – разности между натурными и спутниковыми данными, (б) – СКО, (в) – относительной ошибки.

смагивать в привязке к средней величине потока радиации в течение рейса (рис. 2в). В этом случае картина становится более очевидной. Меридиональные рейсы, которые характеризуются относительно безоблачным небом и располагающиеся в центре области видимости спутника, характеризуются наименьшими относительными ошибками. Широтные рейсы, наоборот, характеризуются более высокими относительными погрешностями: величина СКО у них выше, а средний поток при этом меньше.

В подтверждение вышесказанного рассмотрим зависимость получаемых среднечасовых потоков осредненных по всем рейсам от балла общей облачности, определяемого в Октах (методика определения общего балла облачности, при которой видимый небосклон делится на 8 равных частей. Принята в наблюдениях ВМО) (табл. 2). Отдельно для каждого рейса такие сравнения не проводи-

лись, ввиду низкой повторяемости некоторых облачных режимов в различных экспедициях.

Полученные результаты показывают, что спутниковые и судовые наблюдения хорошо согласуются для всего диапазона величин общего балла облачности. С увеличением общей облачности происходит увеличение СКО, это происходит более плавно, чем в случае сравнения натуральных измерений с интегральными параметризациями потоков коротковолновой радиации [4]. Здесь же можно выделить 3 характерных “режима” поведения ошибок: при “безоблачном небе” (менее 2 Окт), при средней облачности (от 3 до 5 Окт) и при близкой к сплошной облачности (более 6 Окт).

Причины такого поведения СКО, скорее, связаны с алгоритмами расчета потоков в спутниковых данных, где на первом шаге получают возможную приходящую коротковолновую радиа-

Таблица 2. Сравнение спутниковых и натуральных величин среднечасовых коротковолновых потоков для Атлантики

Окта	Натурные измерения, Вт/м <sup>2</sup>	Спутник, Вт/м <sup>2</sup>	СКО, Вт/м <sup>2</sup>	Повторяемость, %
0	571	570	41	3.1
1	576	575	49	3.9
2	552	557	50	7.4
3	505	508	64	8.4
4	548	547	63	8.0
5	540	541	65	7.1
6	481	482	71	12.6
7	419	424	70	12.7
8	254	259	71	36.8

**Таблица 3.** Сравнение спутниковых и натуральных величин среднечасовых коротковолновых потоков для Атлантики

Высота Солнца	Натурные измерения, Вт/м <sup>2</sup>	Спутник, Вт/м <sup>2</sup>	СКО, Вт/м <sup>2</sup>
90°–60°	799	813	81
60°–30°	517	516	74
30°–0°	155	158	55
10°–0°	43	36	34

цию в условиях “безоблачного неба”, на втором шаге выделяют несколько режимов облачности, которые определяются по эффективному облачному альбедо (чистое небо, частично заполненное облачностью, сплошная облачность) и далее на основе этого рассчитывают приходящий поток коротковолновой радиации для каждого из режимов [8].

Связь получаемых среднечасовых потоков в зависимости от высоты Солнца приведена в табл. 3. В первую очередь обращает на себя внимание режим, когда Солнце близко к горизонту: в этом случае, величина СКО сопоставима с величиной среднего коротковолнового потока, это в основном объясняется тем, что вне зависимости от расположения радиометров на борту судна, при низких высотах Солнца неизбежно их затенение конструкциями корабля. Поскольку в этих условиях величина потока радиации небольшая, предлагается в дальнейших работах не использовать данные, полученные при высоте Солнца менее 10 градусов над горизонтом.

Далее рассмотрим изменение СКО относительно средних значений приходящих коротковолновых потоков в зависимости от высоты Солнца над горизонтом. При больших углах величина СКО составляет примерно 10% от среднего потока. Это объясняется тем, что такая высота Солнца характерна для экваториальной и тропической зон Атлантического океана, где высока повторяемость безоблачной погоды. Для “полуденных” измерений, когда Солнце имеет максимальную высоту, отклонения также невелики, поскольку взаимная конфигурация расположения Солнца и геостационарного спутника соответствует наименьшему оптическому пути.

С уменьшением угла наклона Солнца над горизонтом этот оптический путь увеличивается, что приводит к увеличению ошибки приблизительно до 30% в алгоритме расчета спутниковых данных коротковолновых потоков. Небольшая высота Солнца над горизонтом соответствует также умеренным широтам Атлантического океана, где более вероятны режимы средней и сплошной облачности, что характеризуется уменьшением точности спутниковых данных по сравнению с натурными.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) Выбранная стратегия осреднения спутниковых потоков по пространственной сетке оказалась достоверной и дала возможность провести эффективное сопоставление судовых и спутниковых данных, которое показало хорошее согласование спутниковых данных с натурными данными.

2) Точность спутниковых данных в зависимости от балла общей облачности в Октах, высоты Солнца над горизонтом и района подспутниковых измерений хорошо согласуется с теорией радиационного переноса в атмосфере.

3) Результат сравнения корабельных измерений и соответствующих им спутниковых измерений позволяет утверждать, что спутниковые данные о приходящих коротковолновых потоках за последние 30 лет являются хорошим проверочным базисом для существующих интегральных параметризаций коротковолновых потоков для Атлантического океана.

4) Выполненное исследование имеет хорошие перспективы для развития. Во-первых, дальнейшее использование долговременных рядов спутниковых наблюдений в Атлантике позволяет выполнить анализ межгодовых и междекадных изменений солнечной коротковолновой радиации и связать эти изменения с долгопериодной динамикой турбулентных потоков тепла [5], пусть даже за относительно короткий промежуток времени. Кроме того, дальнейшие работы позволят использовать этот уникальный массив для анализа и уточнения расчетных полей коротковолновой солнечной радиации, основанных на применении балк-параметризаций [2, 4], которые в значительной степени зависят от точности определения облачности над Мировым океаном. В этом смысле использование данных об облачности из архива наблюдений EUMETSAT в совокупности с инструментальными наблюдениями [3] за облачностью и радиационными измерениями представляется крайне перспективным.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 14-17-00697).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асмус В.В., Милехин О.Е., Успенский А.Б. Спутниковые наблюдения Земли и дистанционные измерения, усваиваемые в моделях прогноза погоды // [ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/library/pdf/satellite.doc](http://ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/library/pdf/satellite.doc).
2. Гирдюк Г.В., Егоров Б.Н., Малевский-Малевиц С.П. Определение радиационного баланса поверхности океана // Справочное пособие. СПб.: Гидрометиздат, 1992. 148 с.
3. Криницкий М. А., Синицын А.В. Адаптивный алгоритм оценки общего балла облачности по широкоугольным снимкам неба с использованием индекса степени серости // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 3. С. 341–345.
4. Синицын А.В., Александрова М.П., Гулев С.К. Уточнение параметризации коротковолновой радиации на поверхности океана на основе прямых измерений в Атлантическом океане // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 4. С. 45–54.
5. 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.
6. Kipp & Zonen, 2004. CNR-1 Instruction Manual – Manual Version. 0904 // <http://www.kippzonen.com/Download/85/Manual-CNR-1-Net-Radiometer-English>.
7. Meteosat second generation: the satellite development / Ed. Battrick B. Noordwijk: ESA BR / Europe space agency. 1999. 55 p. ISBN 92-9092-634-1.
8. Müller R., Trentmann J. CM SAF Validation Report. Meteosat Solar Surface Radiation and effective Cloud Albedo Climate Data Record // EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF), 2014. 28 p.
9. Müller R., Trentmann J. CM SAF Meteosat Solar Surface Radiation and effective Cloud Albedo Climate Data Records – Heliosat // EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF), 2015. 96 p.

## Comparison of *in situ* and Satellite Data of Surface Incoming Shortwave Radiation for the Atlantic Ocean during 2004–2014

A. V. Sinitsyn, S. K. Gulev

Shortwave radiation fluxes at the ocean-atmosphere system, along with the turbulent exchange, are a key process in the interaction of these components. The shortwave solar radiation fluxes is the main source of heat for the ocean. Information about the shortwave radiation fluxes at the surface of the ocean is available from a ship and buoys observations, as well as satellite data archives. Currently, the most comprehensive archive of shortwave radiation fluxes provide operational geostationary satellites of the Earth such as METEOSAT first and second generation (EU), the GOES (USA), HIMAWARI (Japan), equipped scanners with visible and infrared (IR) spectral range, and allowing to obtain every 0.5 h image of the Earth. For daily and monthly average values of the incoming shortwave solar radiation can be used satellites on medium-polar sun-synchronous orbits with AVHRR radiometer on board, such as European satellites EPS / MetOP and US NOAA [2]. Satellite data about radiation fluxes undoubtedly plays a key role in the future, but at present they are only available for the past few decades and are quite inaccurate, requiring detailed validation.