

УДК 551.501.86, 551.521.12

## КОРОТКОВОЛНОВАЯ РАДИАЦИЯ НАД ОКЕАНОМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ОБ ОБЛАЧНОСТИ

© 2020 г. А. В. Синицын<sup>1,\*</sup>, член-корреспондент РАН С. К. Гулев<sup>1</sup>

Поступило 29.07.2019 г.

После доработки 15.08.2019 г.

Принято к публикации 29.08.2019 г.

В работе рассматривается использование спутниковых данных об общем балле облачности в интегральных параметризациях коротковолновых приходящих потоков на поверхность Земли в условиях массовых расчетов. Выделены основные условия применимости этих данных, точность расчетов и дальнейшие пути улучшения интегральных параметризаций для коротковолновых потоков.

*Ключевые слова:* коротковолновые потоки, спутниковые данные, общий балл облачности

**DOI:** 10.31857/S2686739720020140

Высокоточные расчеты приходящих коротковолновых потоков (КВ) солнечной радиации на поверхности моря принципиальны для достоверных оценок теплового баланса поверхности океана. Начиная с 1984 г. появилось несколько глобальных и региональных массивов спутниковых данных о КВ-потоках [1] и облачности [2], позволяющих оценивать межгодовую динамику КВ-потоков за этот период. Однако для оценки междекадной изменчивости КВ-потоков необходимы использование судовых наблюдений за облачностью и применение интегральных параметризаций, основанных на связи функции пропускания атмосферы от общего балла облачности (ОБО) при различных высотах Солнца. Долгосрочные расчеты, пусть даже региональные, позволят дополнить реконструкции турбулентных потоков [3] оценками КВ-потоков и оценить изменения теплового баланса океана. Кроме того, использование спутниковых данных об облачности с высоким разрешением позволяет оценить применимость интегральных параметризаций КВ-потоков для различных пространственно-временных масштабов, что принципиально важно при быстром изменении метеорологических условий в средних широтах. В данной работе нами впервые проводятся тестирование применимости одной из наиболее развитых интегральных параметризаций КВ-потоков к использованию спутниковых данных об облачности [2] и сопоставление

результатов с высокоразрешающими данными спутниковых измерений КВ-потоков [1].

Нами использована параметризация SAIL [4], основанная на более чем пятилетнем массиве прямых наблюдений за КВ-потоками в различных районах Северной Атлантики. Параметризация SAIL [4] представляет собой так называемую “окта-модель”, в которой приходящий КВ-поток зависит от ОБО в октах, а коэффициент пропускания атмосферы имеет нелинейную зависимость и от высоты Солнца, что важно для корректного описания КВ-потоков при низких углах Солнца. Для тестирования параметризации [4] нами использовались спутниковый массив данных об облачности CLAAS ed.2 [2] и массив спутниковых измерений КВ-потоков SARAH ed.2 [1].

Для адаптации параметризации SAIL к использованию суточных данных в данной работе используется метод так называемого “виртуального вращения часовой стрелки”, когда мы фиксируем информацию об облачности, а высоту Солнца рассчитываем с определенным шагом (1 час в данной работе) для всего суточного хода локальной астрономии, а среднесуточная величина КВ-потока определяется осреднением. Эти величины далее сравнивались с прямыми измерениями КВ-потоков в спутниковом массиве SARAH ed.2.

Нами оценивались абсолютные разности между рассчитанными КВ-потоками и спутниковыми измерениями в совпадающие моменты времени, а также среднеквадратические отклонения (СКО) расчетных значений КВ-потока от спутниковых данных, характеризующие кумулятив-

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: [sinitsyn@sail.msk.ru](mailto:sinitsyn@sail.msk.ru)

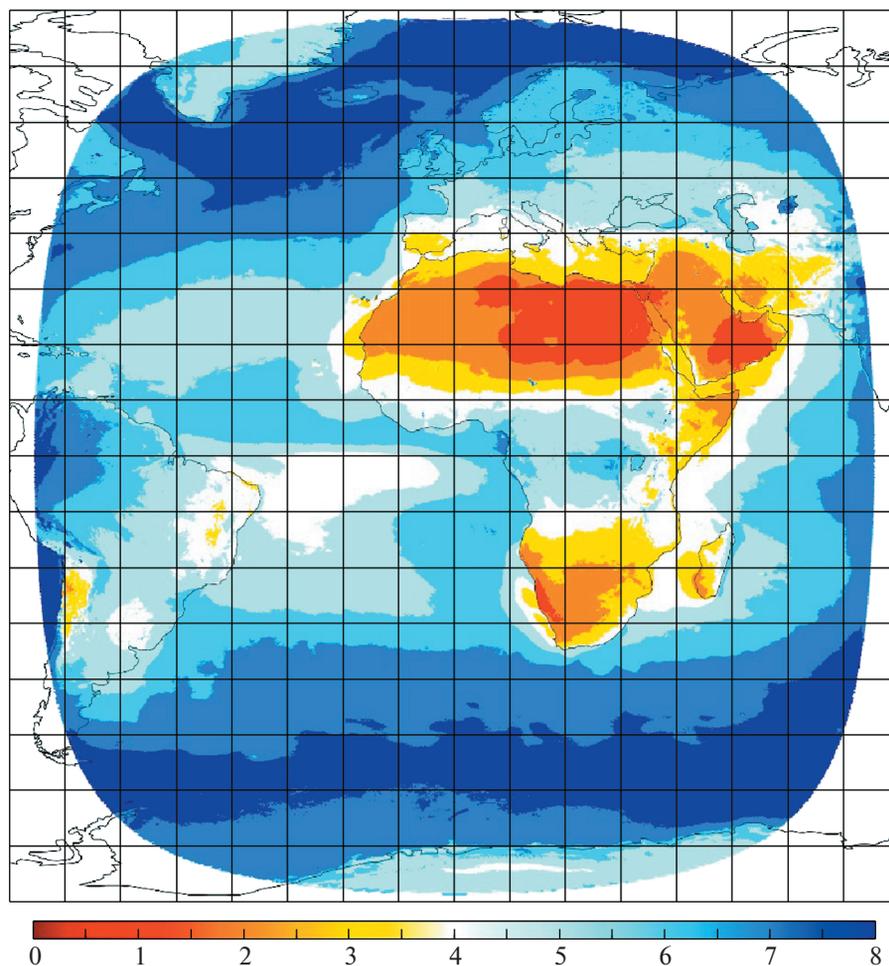


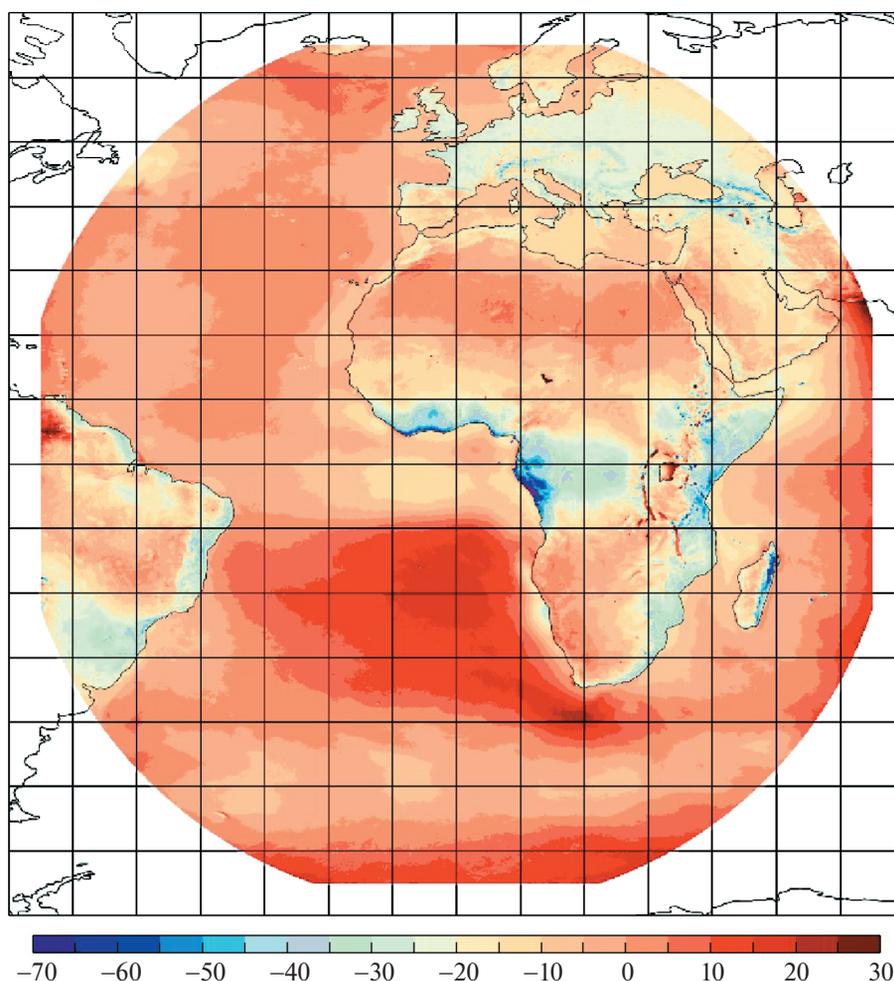
Рис. 1. Распределение общего балла облачности в окта за период 2004–2015 гг.

ную ошибку расчетов [5]. Расчеты выполнены за 12-летний период с января 2004 по декабрь 2015 гг. Проведение расчетов как над океаном, так и над сушей (учитывая, что спутниковые данные CLAAS ed.2 [2] и SARAH ed.2 [1] доступны над континентами) позволило оценить применимость морских параметризаций для расчетов над континентами. В частности, в работе [6] показано, что параметризации, разработанные по данным наблюдений над континентами, не подходят для морского использования, однако обратного анализа не проводилось.

На рис. 1 показано среднеклиматическое распределение ОБО (основного параметра для расчета КВ-потока) для области покрытия спутником за период 2004–2015 гг. Пространственное распределение, более подробно анализируемое в работе [7], хорошо согласуется с климатологией ОБО [8]. Над океаном ОБО изменяется от 4 окта в тропических районах до 7–8 окт (сплошной облачности) в субполярных областях, характеризующихся интенсивной циклонической активностью,

особенно в зимний период [9]. Оценки по данным попутных наблюдений [8] дают несколько меньшие величины, что объясняется эффектом масштабирования как самих индивидуальных наблюдений, так и последующего сеточного осреднения. Так, визуальные наблюдения обычно относятся к видимому горизонту (примерно 15–25 км), тогда как спутниковые наблюдения CLAAS ed.2 [2] имеют меньшее исходное разрешение 0,05 градуса.

На рис. 2 показаны абсолютные разности величин КВ-потоков, рассчитанных по параметризации SAIL ОБО по данным CLAAS ed.2 [2] и спутниковых измерений SARAH ed.2 [1]. Над океаном рассчитанные поля КВ-потоков хорошо согласованы с измеренными для всей северной части Атлантики, где систематическая ошибка лежит в пределах  $\pm 5$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 2а), а величина СКО хорошо согласуется с характеристиками ОБО в этой части Атлантики. В районах со средним ОБО 4–5 окт величины СКО составляют 20–30 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3). При такой облачности в тропи-



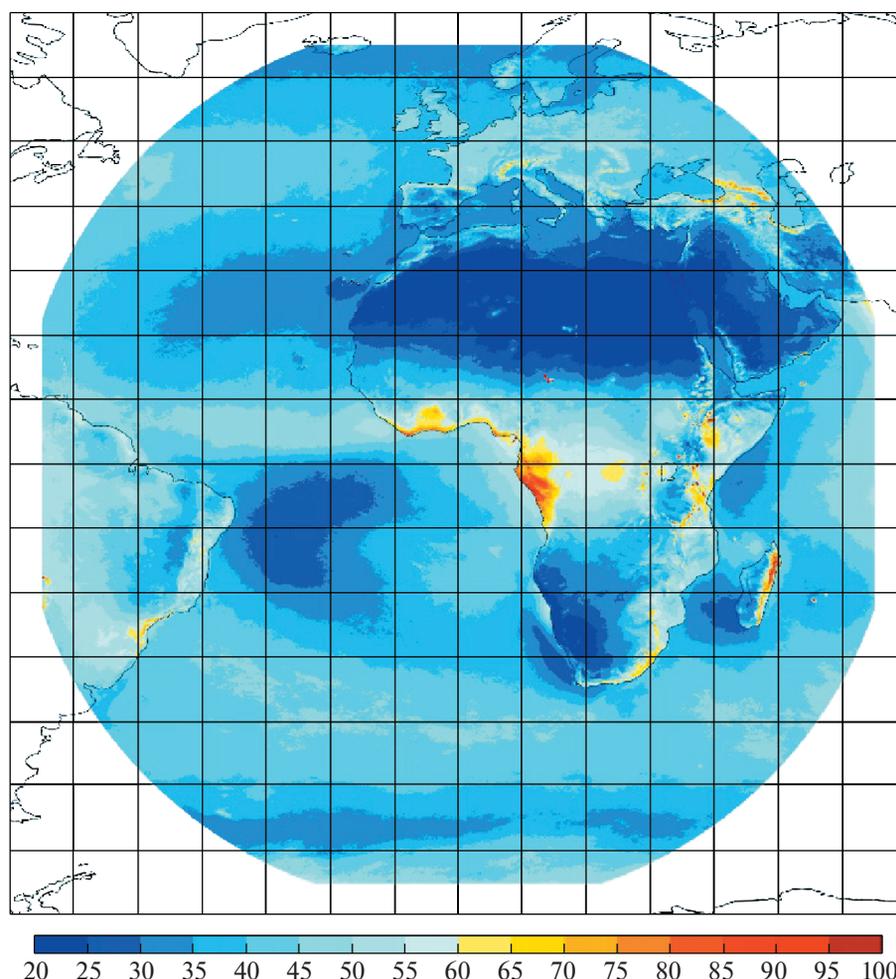
**Рис. 2.** Систематическая ошибка между параметризацией SAIL и спутниковой базой данных приходящих коротковолновых потоков SARAH ed.2 в  $W/m^2$ .

ческих областях режим прямых КВ-потоков превалирует над рассеянными КВ-потоками. В то же время при облачности 6–7 окт в среднеширотных и субполярных районах (рис. 1) СКО может достигать  $50 W/m^2$ , что связано с перемежаемостью прямых и рассеянных КВ-потоков. При увеличении ОБО до 8 окт величины СКО уменьшаются до  $30–35 W/m^2$ , что отражает ослабление короткопериодной изменчивости КВ-потоков при сплошной облачности.

В целом параметризация SAIL показывает лучшие результаты для Северной Атлантики по сравнению с южной. Это объясняется тем, что при создании параметризации было использовано значительно большее количество данных именно в Северной Атлантике [5]. Отметим, что в восточной части субтропической Южной Атлантики параметризация SAIL серьезно завышает расчетные величины КВ-потоков на величину до  $30 W/m^2$ . Причиной этого, видимо, является существенное влияние облачности нижнего яруса,

которое при умеренной облачности 4–6 окт наименее оптически прозрачны для КВ-потоков. В этом контексте следует отметить, что параметризация SAIL в усложненной форме [4] позволяет учитывать типы и высоту нижней кромки облаков, что существенно уменьшает погрешности расчетов для различных облачных режимов, однако выделение режимов облачности, связанных с различными типами, невозможно по данным SARAH ed.2 [1].

Над континентами режимы малооблачного и “чистого” неба (ОБО менее 2–3-х окт), практически не наблюдаемые над Атлантикой [8, 10], хорошо представлены над Африканским континентом в районе пустынь Сахары и Намиб, а также над Аравийским полуостровом. В этих условиях прямой КВ-поток существенно превосходит рассеянный, и параметризация SAIL, разработанная для морских условий, может оказаться эффективной. Рис. 2б показывает, что для районов с малым ОБО СКО расчетов КВ-потоков минимальна –

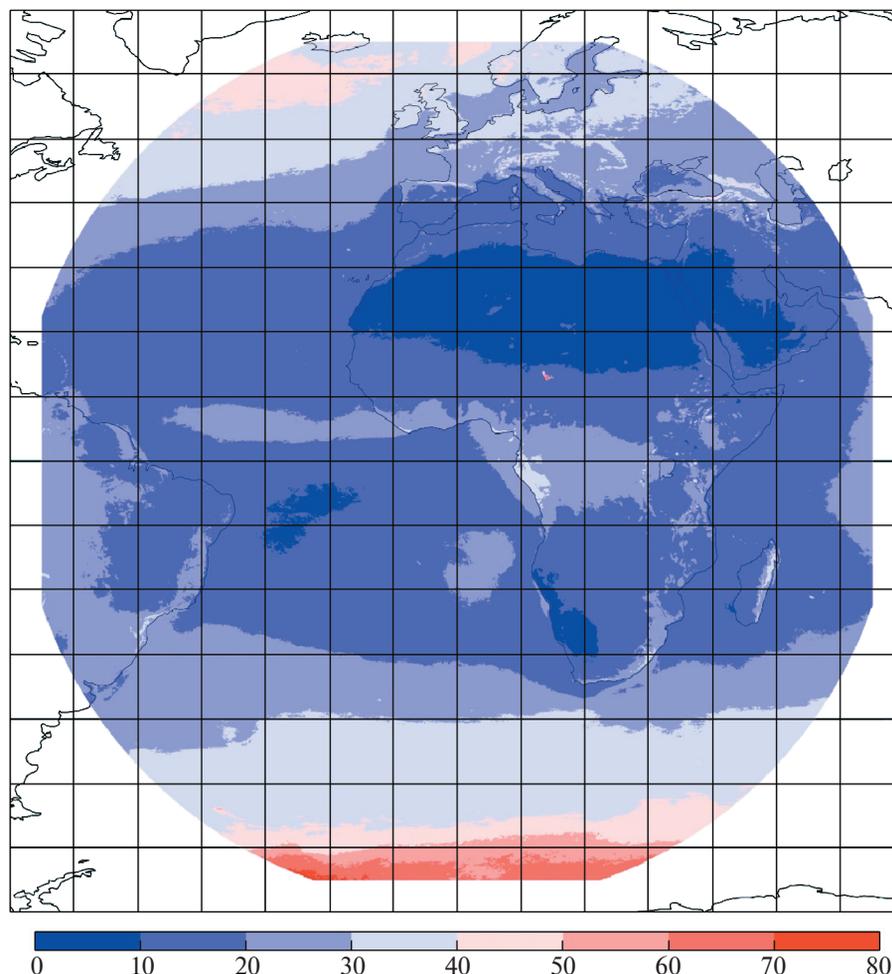


**Рис. 3.** Среднеквадратическое отклонение в расчетах между параметризацией SAIL и спутниковой базой данных приходящих коротковолновых потоков SARA ed.2 в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

менее  $25 \text{ Вт}/\text{м}^2$  для среднесуточных значений. Систематическая ошибка составляет порядка  $15 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , что в целом не хуже, чем над тропическим океаном. Такой результат ожидаем для условий почти чистого неба, когда потоки зависят практически только от высоты Солнца. Некоторое завышение рассчитанных КВ-потоков в отдельных районах над экваториальной Африкой связано с тем, что параметризация SAIL (в виде, используемом в данной работе) не учитывает аэрозольного поглощения КВ-потоков в атмосфере над пустыней [11]. При чистом небе атмосфера над океанами более оптически прозрачна и приходящий КВ-поток на поверхность океана в первую очередь будет определять облачность, а во вторую – влагосодержание столба атмосферы. На рис. 2 показано сильное завышение расчетных величин (до  $60 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ) и СКО КВ-потоков (более  $55 \text{ Вт}/\text{м}^2$  для среднесуточных значений) в отдельных экваториальных и тропических районах Африки и Южной Америки. При этом ОБО для этих

районов составляет 4–6 окт, однако именно здесь можно говорить о существенно более прозрачных облаках над континентами (в том числе в континентальных областях), чем над океанами. В этих условиях применение параметризации SAIL для расчетов КВ-потоков над континентами не оправдано. Для европейского континента систематическая ошибка составляет примерно  $-30 \text{ Вт}/\text{м}^2$  и СКО  $30 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , с локальным возрастанием СКО до  $60\text{--}70 \text{ Вт}/\text{м}^2$  в горных массивах, где параметризация SAIL не учитывает повышенной инсоляции в силу большей оптической прозрачности атмосферы на высотах.

Наша работа показывает, что интегральная параметризация SAIL в целом применима для использования спутниковых данных об облачности. Валидация SARA ed.2 [12] со станциями BSRN (Baseline Surface Radiation Network) декларирует желаемую точность спутниковых приходящих коротковолновых потоков на уровне  $20 \text{ Вт}/\text{м}^2$  для среднесуточных значений. Для большей части



**Рис. 4.** Отношение среднеквадратического отклонения расчета приходящих коротковолновых потоков по параметризации SAIL к средней величине с потоков по данным SARAH ed.2 в %.

Атлантического океана мы приблизились к этой величине, в частности, в районах с относительно невысоким общим баллом облачности. Важно, что при этом систематическая ошибка в этих районах близка к  $0 \text{ Вт/м}^2$ . В областях Атлантического океана с режимом облачности, близкой к сплошной, среднеквадратическое отклонение также не превышает  $25 \text{ Вт/м}^2$ . В остальных районах эта величина не превышает  $50 \text{ Вт/м}^2$ .

Однако оперировать величинами среднеквадратического отклонения без рассмотрения средней величины коротковолновых потоков несколько некорректно. Рисунок 4 показывает отношение среднего коротковолнового потока по данным SARAH ed.2 за период январь 2004—декабрь 2015 гг. к величинам среднеквадратического отклонения расчетных значений коротковолновых потоков по параметризации SAIL. С учетом относительных величин параметризация SAIL хорошо воспроизводит потоки для общего балла облачности менее 5 окт. С продвижением в

средние и высокие широты, где общий балл облачности увеличивается и, как следствие, возрастает вариативность облачных режимов, качество расчетов падает. Дальнейшее улучшение параметризации SAIL должно быть направлено на раздельный учет прямого и рассеянного приходящего коротковолнового потока.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение 14.613.21.0083, уникальный идентификатор RFMEFI61317X0083).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pfeifroth U., Kothe S., Müller R., et al. Surface Radiation Data Set—Heliosat (SARAH)—Edition 2 // Satellite Application Facility on Climate Monitoring. 2017. [https://doi.org/10.5676/EUM\\_SAF\\_CM/SARAH/V002](https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002).

2. *Finkensieper S., Meirink J.-F., van Zadelhoff, G.-J., et al.* CLAAS ed.2: CM SAF CLOUD property dAtAset using SEVIRI—Edition 2 // Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF), 2016. [https://doi.org/10.5676/EU-M\\_SAF\\_CM/CLAAS/V002](https://doi.org/10.5676/EU-M_SAF_CM/CLAAS/V002).
3. *Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Kolterman K.P.* North Atlantic Ocean Control on Surface Heat Flux on Multidecadal Timescales // *Nature*. 2013. V. 499. P. 464–467. <https://doi.org/10.1038/nature>
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. *Синицын А.В., Гулев С.К.* Сравнение натуральных и спутниковых данных о приходящих коротковолновых потоках солнечной радиации для Атлантического океана в период 2004–2014 гг. // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 2. С. 268–274.
6. *Гирдюк Г.В., Егоров Б.Н., Малевский-Малевиц С.П.* Определение радиационного баланса поверхности океана // *Справочное пособие*. СПб.: Гидрометиздат. 1992. 148 с.
7. *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.
8. *Aleksandrova, Gulev S.K., Belyaev K.P.* 2018: Probability Distribution for the Visually Observed Fractional Cloud cover over the ocean // *J. Climate* **31**, 3207–3232. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0317.1>
9. *Tilinina N., Gulev S.K., Bromwich D.*, 2014: New View of Arctic cyclone activity from the Arctic System reanalysis // *Geophys. Res. Lett.*, 43. <https://doi.org/10.1002/2013GL058924>
10. *Bedacht E., Gulev S.K., Mackea A.* Intercomparison of global cloud cover fields over oceans from the VOS observations and NCEP/NCAR reanalysis // *Int. J. Climatol.* 2007. № 27. P. 1707–1719. <https://doi.org/10.1002/joc.1490>
11. *Smirnov A., Sayer A.M., Holben B.N., et al.* 2012: Effect of wind speed on aerosol optical depth over remote oceans, based on data from the Maritime Aerosol Network. *Atmos // Meas. Tech.*, 2012. 5, 377–388.
12. *Pfeifroth U., Kothe S., Müller R.*, CM SAF Validation Report Meteosat Solar Surface Radiation and Effective Cloud Albedo Climate Data Record SARAH 2 // EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF), 2016. 196 p.

## APPLICATION OF INTEGRAL PARAMETRIZATION OF SHORT-WAVE RADIATION FLUXES BASE ON SATELLITE DATA OF THE CLOUD AMOUNT

**A. V. Sinitsyn<sup>a,#</sup> and Corresponding Member of the RAS S. K. Gulev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: sinitsyn@sail.msk.ru*

The paper discusses the use of satellite data on the total cloud amount in the integral parameterizations of short-wave incoming fluxes to the Earth's surface under mass calculations. The main conditions for the applicability of these data, the accuracy of calculations and further ways of improving the integral parameterizations for shortwave fluxes are highlighted.

*Keywords:* shortwave fluxes, satellite data, total cloud amount