

РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДНЕСЕЗОННОЙ ОБЛАЧНОСТИ НАД МИРОВЫМ ОКЕАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ И СИНГУЛЯРНЫХ СПЕКТРОВ

© 2025 г. А. В. Синицын*, С. К. Гулев

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

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

Поступила 15.10.2024 г.

После доработки 07.11.2024 г.

Принята к публикации 18.12.2024 г.

Применение оценки вероятностного распределения для спутниковых данных об общей облачности над Мировым океаном представляет собой ключевой аспект нашего исследования. Мы используем данную оценку для более глубокого анализа структуры облачности и ее изменений с течением времени. Такой подход позволяет не только оценивать вероятности появления различных режимов облачности, но и прогнозировать их изменения в ответ на различные факторы. Наши расчеты основаны на использовании неполной гамма-функции плотности распределения, что обеспечивает более точное представление о статистической структуре общей облачности. Эти оценки вероятностей помогают построить прогностическое распределение по окта для общего балла облачности в 5-летней перспективе для Мирового океана. Пилотные расчеты глобального покрытия облачности были выполнены на сетке $5^\circ \times 5^\circ$ для зимних и летних сезонов. В работе используется климатология общего балла облачности CLARA-A ed. 3, полученная по спутниковым измерениям AVHRR полярно орбитальных спутников с 1979 по 2023 г. Прогностическое распределение общего балла облачности строилось с применением метода сингулярного спектрального анализа для каждого следующего года. В качестве проверочных были взяты годы с 2019 до 2023 г. Прогностическое распределение строилось по данным 1979–2018 гг., и каждый спрогнозированный год сравнивался с данными проверочного года. Далее были сравнены 5-летние сезонные осреднения общего балла облачности спутниковых и прогностических данных. Использование функции распределения на основе неполной гамма-функции позволяет прогнозировать распределение общего балла облачности с ошибкой значений до 2 окта в зависимости от режима облачности. Причина рассогласования заключается в том, что применение неполной гамма-функции не позволяет точно описать резкое изменение плотности вероятности при переходе от одной окты к другой. Это приводит к систематическим ошибкам в прогнозировании общего балла облачности.

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

DOI: 10.31857/S0030157425040016

ВВЕДЕНИЕ

Данные об облачности, доступные по наблюдениям различных спутниковых систем, являются важным источником информации для анализа изменчивости облачного покрова на различных пространственно-временных масштабах, а также необходимы для валидации результатов численного моделирования и ре-анализов [4, 9]. В сравнении с данными визуальных наблюдений за облачностью, получаемых на коммерческих судах (Voluntary Observing Ships, VOS) и агрегированных в базе данных ICOADS [5, 3], спутниковые наблюдения обладают гораздо меньшими ошибками опреде-

ления общего балла облачности за счет однородности данных об облачности. Тем не менее, анализ данных об облачности, доступных благодаря различным спутниковым наблюдениям, требует валидации и сопоставления с судовыми данными. Возможности валидации спутниковых данных по прямым инструментальным измерениям (например, [7]) ограничены и могут быть выполнены только регионально за периоды времени проведения таких наблюдений. В этом смысле массовые данные визуальных наблюдений за облачностью предоставляют уникальную возможность анализа для всего Мирового океана за период в несколько

десятилетий. Помимо сравнения средних климатологических характеристик облачности важным аспектом является анализ характеристик повторяемости облачности различных категорий, позволяющих анализировать функции распределения облачности. В работе [3] обоснована функция вероятностного распределения балла общей облачности по категориям в окта, основанная на неполной гамма-функции. В данной работе мы исследуем применимость данной функции распределения к спутниковым данным об облачности.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе используются глобальные данные о характеристиках облачности (табл. 1), представляющие среднесуточные величины балла общей облачности, полученные из данных CLARA-A ed. 3.0, доступных из архива Европейского Агентства метеорологических спутников EUMETSAT в рамках инициативы Satellite Application Facility on Climate Monitoring [6].

Таблица 1. Характеристики климатологии CLARA-A ed. 3.0

Период	01.01.1979–30.06.2023
Покрытие	90.0° ю.ш.–90.0° с.ш. 180.0° в.д.–180.0° з.д.
Временное разрешение	Среднесуточные
Пространственное разрешение	0.25° × 0.25° (до 7.5°) Пространственное осреднение 5°
Инструментарий	AVHRR на полярно орбитальных спутниках

Исходное пространственное разрешение данных (0.25 градуса) в целом неплохо согласуется с пространственными характеристиками визуальных наблюдений, определяемых дальностью видимости горизонта (от 15 до 30 км). Детальный анализ масштабных характеристик спутниковых данных был проведен в работах [1, 8] и показал устойчивость характеристик облачности в этом диапазоне масштабов. Пространственное осреднение в 5 градусов, использованное в данной работе, совпадает с тем, что было использовано в работе [3].

Предложенная в работе [3] функция распределения балла общей облачности выражается соотношением

$$P(x) = C(\alpha, \beta) \left\{ \theta(1-x)^\alpha \exp[-\beta(1-x)] + (1-\theta)x^\alpha \exp(-\beta x) \right\}, \quad (1)$$

где $P(x)$ – плотность вероятности, переменная x – облачный покров в долях единицы ([0,1]), α и β ($\alpha > 0$ и $\beta > 0$) – параметры формы и масштаба соответственно, θ – управляющий параметр, отвечающий за “смешивание” двух гамма-распределений. Из уравнения (1) следует, что параметр θ определяется как

$$\theta = \frac{P(0)}{P(0) + P(1)}, \quad 0 \leq \theta \leq 1, \quad (2)$$

где $P(0)$ и $P(1)$ – оценки вероятности условий чистого неба и полностью закрытого облаками неба соответственно, полученные непосредственно из данных наблюдений. Для расчета параметров α и β использовался метод градиентного спуска. Нормализующая константа C рассчитывается как

$$C = \beta^{(\alpha+1)} \gamma^{-1} (\alpha+1, \beta), \quad (3)$$

где $\gamma(\alpha+1, \beta)$ – верхняя неполная гамма-функция. Нами использовалась дискретная форма распределения (1), приведенная также в [3] для использования в приложении к наблюдениям облачности в окта. Конвертация спутниковых данных об облачности, представленных в долях единицы, в окта выполнялась на основе методологии, предложенной в [2]. Также нами использовались те же трехмесячные сезоны, что и в работе [3]: январь – март и июль – сентябрь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выполнения анализа спутниковых данных на первом этапе нами были рассчитаны среднесезонные (январь – март и июль – сентябрь) коэффициенты для неполной гамма-функции вероятностного распределения балла общей облачности по окта за период с 1979 по 2023 г. На представленных рисунках (рис. 1а–г) можно видеть, что полученные коэффициенты имеют схожую пространственную структуру с результатами, полученными ранее по данным визуальных наблюдений с коммерческих судов VOS [1, 3].

Для коэффициента θ (рис. 1в, г) для большей части океана обнаруживается бинарное распределение значений [0:1], при этом значение 0 характерно для областей, где режим чистого неба практически не идентифицируется спутниковыми данными. Значение коэффициента θ , близкое к 1, рассчитывалось для областей, где по данным спутниковых наблюдений отмечается или чистое небо, или малый балл общей облачности. Пространственное распределение коэффициента β (рис. 1б, г) повторяет структуру глобального распределения общего балла облачности в окта

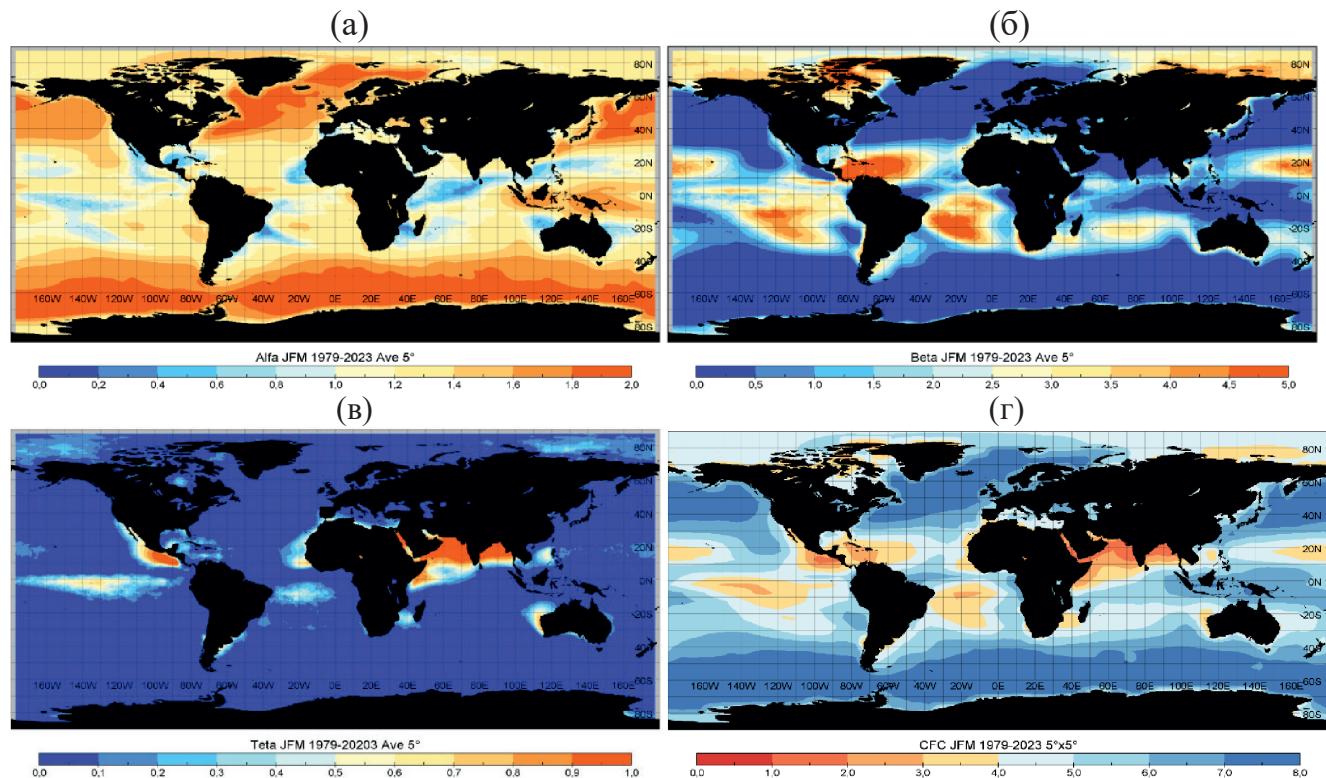


Рис. 1. Среднесезонные распределения для зимних сезонов 1979–2023 гг. коэффициентов α (а), β (б), θ (в) неполной гамма-функции вероятностного распределения общего балла облачности по окта и общего балла облачности по окта (г).

за исключением областей со сплошной общей облачностью и районов, характеризующихся чистым небом, где коэффициент β равен 0. В этих областях распределение балла общей облачности по окта имеет выраженный пик на 0 или 8 окта и неполнная гамма-функция вырождается. Наконец, коэффициент α (рис. 1а, г) характеризуется максимальными значениями в областях сплошной общей облачности, а также средними значениями в областях, где наблюдается облачность в диапазоне от 3 до 6 окта.

Важным вопросом является оценка неопределенностей, связанных с аппроксимацией распределением (1) реальных гистограмм распределения облачности по окта. В работе [3] для данных visualных наблюдений над облачностью этот вопрос был проанализирован в двух аспектах. Во-первых, анализировалась точность аппроксимации распределением (1) эмпирических распределений облачности, а во-вторых, проверялась гипотеза о том, что данное распределение более эффективно, чем альтернативные распределения. В частности, в качестве альтернативного рассматривалось смешанное степенное распределение. На основе использования теста хи-квадрат было показано, что в большинстве районов распределение (1) достаточно эффективно аппрок-

симирует эмпирическое распределение, а также что предложенное распределение, основанное на смешанном гамма-распределении, эффективнее альтернативного. Наименьшая успешность аппроксимации отмечалась в районах, плохо обеспеченных данными, как, например, южная часть Тихого океана. Аналогичные оценки, выполненные для спутникового массива данных, показали результаты, очень близкие к полученным в [3]. При этом для районов, где были обнаружены наибольшие рассогласования, получены более устойчивые оценки, что объясняется значительно более равномерным распределением измерений в спутниковом массиве данных и отсутствием областей с крайне малым количеством наблюдений.

Учитывая выполненные оценки точности аппроксимации и проведенный выше анализ (рис. 1), можно сделать промежуточный вывод, что неполная гамма-функция вероятностного распределения (1) для общего балла облачности по окта в целом применима и к данным спутниковых климатологий общего балла облачности над Мировым океаном.

Следующим шагом было решение задачи о восстановлении пространственной картины распределения общего балла облачности по величинам

коэффициентов неполной гамма-функции распределения (1), описанного выше. Спутниковые данные об общем балле облачности имеют глобальное покрытие за период с 1979 по 2023 г. и не имеют пропусков, что обеспечивается данной версией массива The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). Поэтому наиболее естественным примером решения задачи восстановления характеристик распределения облачности будет задача прогнозирования общего балла облачности на летний сезон 2024 года.

Для решения этой задачи мы применили метод сингулярного спектрального анализа (SSA). В рамках такого подхода временной ряд среднесезонных коэффициентов α , β и θ неполной гамма-функции вероятностного распределения (1) можно разложить на сумму рядов долгосрочного и сезонного трендов и остатка. Каждый из этих компонентов представляет собой многомерный ряд, реконструированный численно. В первую очередь, мы проверили предлагаемый подход на данных с известным конечным результатом. Для этого временные ряды среднесезонных коэффициентов были разделены на ряд, полученный с помощью моделирования, и тестовый (контрольный) ряд, которые имели перекрытие в период с 1979 по 2019 г. Далее для моделируемого ряда мы находили значения среднесезонных коэффициентов неполной гамма-функции и сравнивали их с тестовым рядом для периода 2020–2024 г. При этом в моделируемом ряде данные для каждого последующего года рассчитывались с учетом предыдущего года, также полученного в рамках данной модели без использования значений коэффициентов из тестового ряда для соответствующего года.

Для нахождения среднесезонных коэффициентов неполной гамма-функции распределения мы предполагали, что значения соответствующего коэффициента для тестового ряда (N значений аргумента) и моделируемого ряда ($N+1$ значений аргумента), найденные методом SSA, будут близки для N первых значений аргумента.

Задача решалась методом оптимизации, что предполагало нахождение минимального значения суммы квадратов отклонений элементов матриц для долгосрочного и сезонного трендов и матрицы остатков, соответствующих элементам тестового и моделируемого рядов для N первых значений аргумента, найденных численным методом и лежащим в диапазоне значений коэффициентов α , β и θ . В результате мы получаем среднее значение коэффициентов для N первых значений аргумента, которые попадают в диапа-

зон трех стандартных отклонения от среднего для этих значений функции.

Таким образом, были получены среднесезонные значения коэффициентов неполной гамма-функции для зимних сезонов 2020–2024 гг. Далее по ним были восстановлены значения общего балла облачности для этого периода и проведено сравнение полученных величин со спутниковыми данными об общем балле облачности за тот же период. На рисунках 2а и 2б хорошо видно, что использованный метод реконструкции позволяет получить распределение, достаточно хорошо сопоставимое с реальным распределением балла общей облачности для Мирового океана. Реконструированное распределение адекватно воспроизводит область сплошной облачности для Южного океана, северо-западной и северных частей Атлантического океана, а также области сплошной облачности в экваториальных районах. На картах хорошо воспроизведены районы чистого неба в Центральной Атлантике и Тихом океане, а также малооблачный режим для северной части Индийского океана. Характеристики облачности в переходных районах, тем не менее, воспроизведены в рамках данного подхода недостаточно точно. Скорее всего, неопределенности расчетов для этих районов могут быть связаны с недостаточно успешной адаптацией метода SSA ко всей акватории Мирового океана, поскольку настройка метода осуществлялась таким образом, чтобы обеспечить получение оперативных результатов по материалам климатологии CLARA-A ed. 3.0, опубликованной в открытом доступе в апреле 2024 года. В дальнейшем мы предполагаем провести доработку и дополнительную настройку SSA метода, что позволит повысить его точность в районах, характеризующихся значительными погрешностями реконструкции облачности. Тем не менее, можно сделать вывод, что использование SSA метода позволяет прогнозировать коэффициенты неполной гамма-функции вероятностного распределения общего балла облачности над Мировым океаном.

Далее мы применили описанную выше процедуру для получения значений коэффициентов неполной гамма-функции распределения (1) для лета 2024 года с дальнейшим восстановлением балла общей облачности для летнего сезона 2024 года. Отметим, что на момент написания статьи спутниковые данные о распределении облачности в период летнего сезона 2024 года не были включены в массив, доступный потребителям, поэтому сравнение проводилось со среднесезонным распределением балла общей облачности за

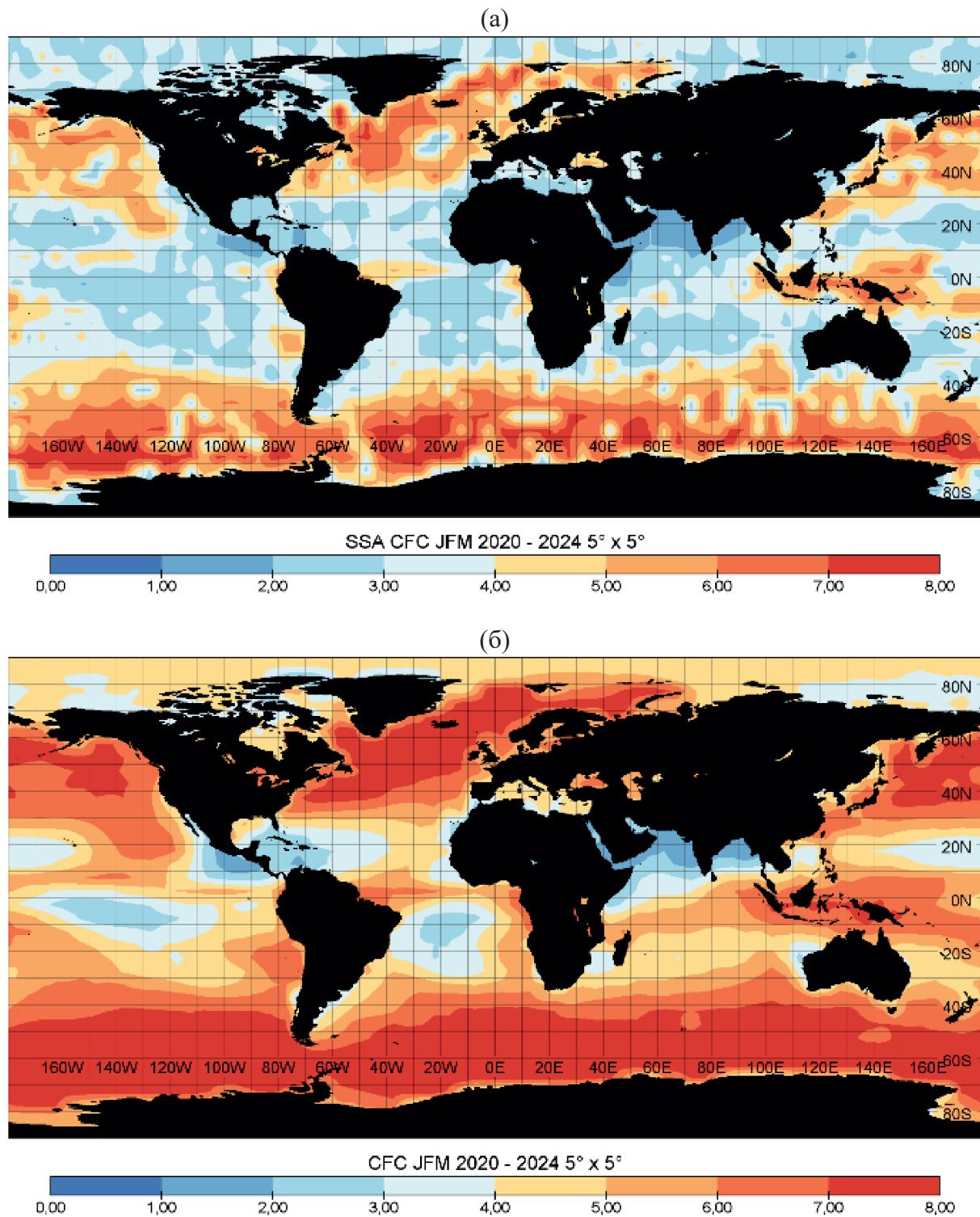


Рис. 2. Сравнение глобального распределения общего балла облачности в окта, спрогнозированного методом SSA (а) и данным общего балла облачности из климатологии CLARA-A ed. 3.0 (б) для зимних сезонов 2020–2024 гг.

летний период с 1979 по 2023 г. На рисунках 3а и 3б отчетливо видно, что в результате прогностического моделирования мы получили в целом адекватное соответствие распределения с климатологией балла общей облачности для летних

сезонов 1979–2024 гг. Прогностические расчеты воспроизводят характерные районы максимумов и минимумов облачности, с поправкой на особенности сезонного режима общего балла облачности, как было отмечено выше.

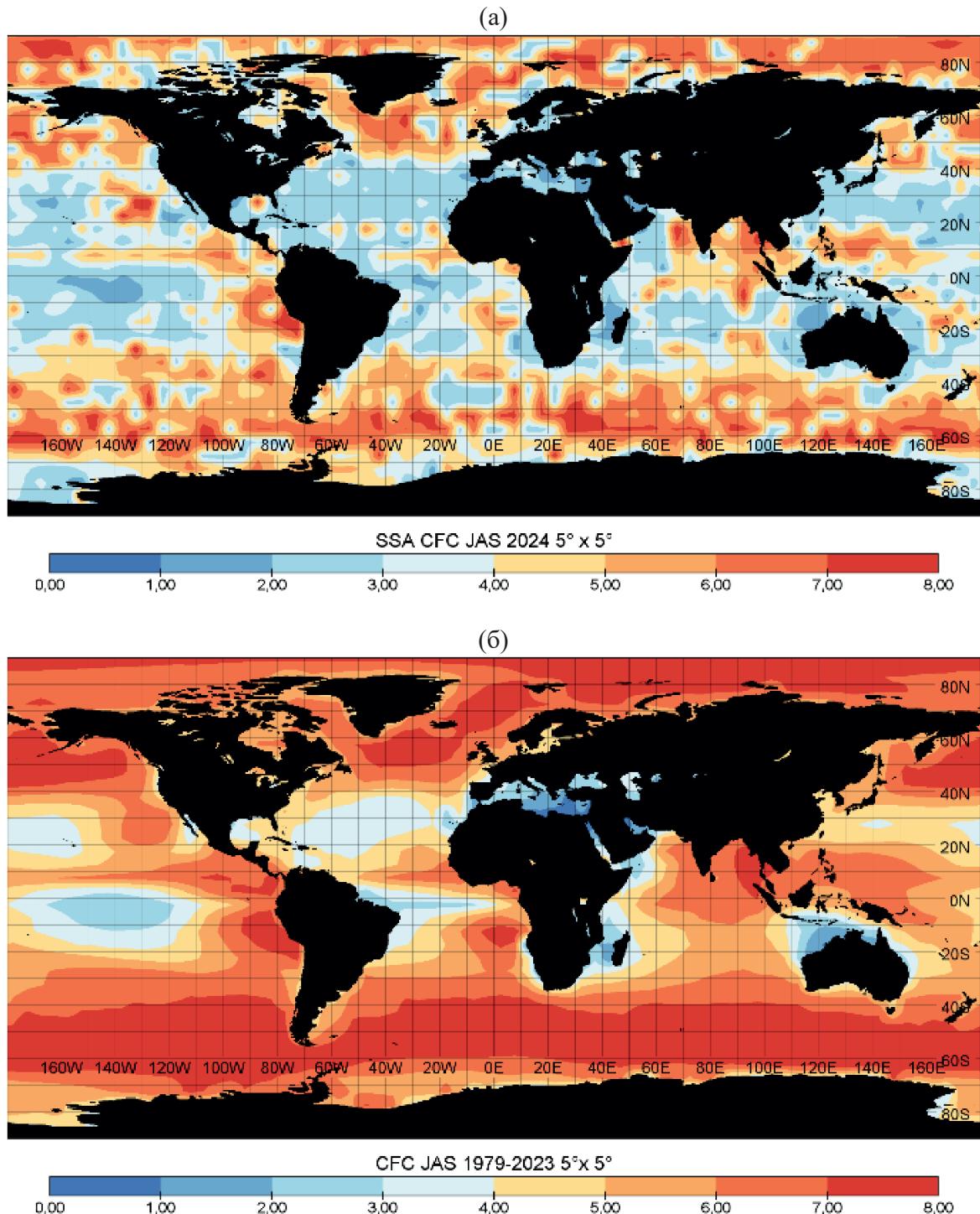


Рис. 3. Сравнение глобального распределения общего балла облачности в окта, спрогнозированного методом SSA для лета 2024 г. (а) и данным общего балла облачности из климатологии CLARA-A ed. 3.0 (б) для летних сезонов 1979–2024 гг.

Отдельного рассмотрения требуют характеристики распределения балла общей облачности, получаемые из расчетов по неполной гамма-функции вероятностного распределения (1). На рисунке 4а показана разность глобального распределения балла общей облачности по расче-

там с помощью неполной гамма-функции и климатологии CLARA-A ed. 3.0 для зимних сезонов Северного полушария для периода 1979–2024 гг. На карте можно выделить области с величинами менее 0.8 окта, которые соответствуют районам с устоявшимися режимами облачности, а так-

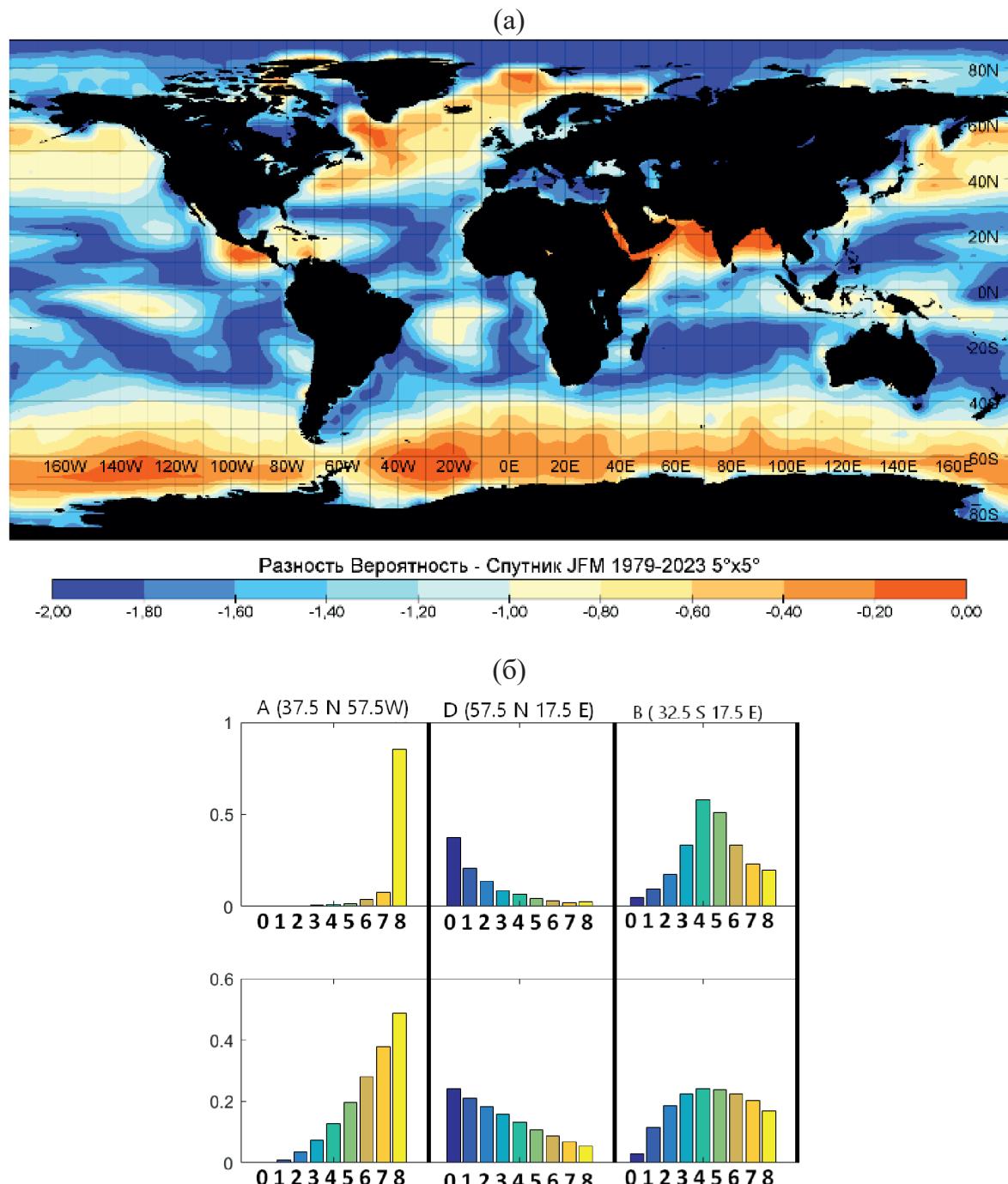


Рис. 4. Разность глобального распределения общего балла облачности в окта по расчетам с помощью неполной гамма-функции и климатологии CLARA-A ed. 3.0 для зимних сезонов 1979–2024 гг. (а). Гистограммы распределения балла общей облачности по окта, оцененные по данным спутниковых наблюдений (верхний ряд) и реконструированные на основе использования гамма-функции (нижний ряд) для точек А, Д и В с координатами (б).

же или со сплошной облачностью, или с чистым небом (рис. 1г). Районы со средним значением общего балла облачности характеризуются занижением величин восстановленного балла общей облачности на величины, варьирующиеся в пределах 0.8–1.2 окта. Максимальные отклонения балла общей облачности (до 2 окта) соот-

вествует “переходным” областям со значениями 4–6 окта. Для понимания причин возникновения отмеченных неопределенностей необходимо сравнить распределение балла общей облачности для нескольких точек по данным климатологии CLARA-A ed. 3.0 с реконструированными с помощью неполной гамма-функции данными

за период с 1979–2023 гг. Для точки А, находящейся южнее о. Ньюфаундленд, гистограмма распределения балла общей облачности характеризуется пиком повторяемости на значениях 8 окта (рисунок 4б, верхний ряд), при этом гамма-функция не способна описать такую сингулярность, в результате чего распределение получается более плавным и, как результат, возникает погрешность в расчетах среднего балла общей облачности до 0.8 окта.

Для района Аравийского полуострова (точка D на рис. 4б) гистограммы балла общей облачности (рисунок 4б, верхний и нижний ряды), оцененные по данным наблюдений и реконструированные на основе использования гамма-функции, практически совпадают. Как следствие, разность в расчетах балла общей облачности для этого района везде менее 0.2 окта. Еще один пример распределения общего балла облачности по данным климатологии CLARA-A ed. 3.0 представлен для точки В (рис. 4б) в районе течения Агульяс. Здесь гистограмма распределения облачности характеризуется максимумами повторяемости на значениях 4 и 5 окта. Распределение, основанное на неполной гамма-функции балла общей облачности, существенно сглаживает эти пики, одновременно увеличивая оценки плотности вероятности для диапазонов 2–3 и 6–8 окта (рисунок 4б, верхний ряд). Как результат, возникает занижение величины среднего балла общей облачности для этой точки примерно на 1.5 окта.

ВЫВОДЫ

Проанализирована возможность использования функции вероятностного распределения (1) балла общей облачности для анализа данных спутниковых измерений облачности над Мировым океаном. Показано, что в целом пространственная структура изменчивости коэффициентов распределения воспроизводится адекватно. Выполнены прогностические расчеты среднесезонного балла общей облачности с помощью подхода, основанного на использовании метода сингулярных спектров. Прогностические расчеты выявили районы, для которых балл общей облачности воспроизводится с достаточно высокой точностью. Для областей, где точность расчетов несколько падает (переходные районы) необходимо провести дополнительную настройку используемого метода.

Источники финансирования. Предварительная обработка спутниковой информации выполнена

в рамках госзадания № FMWE-2024-0017. Расчет функций распределения, анализ сингулярных спектров и получение реконструированных оценок выполнено за счет гранта РНФ № 23-47-00030.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнение натурных и спутниковых данных об общем балле облачности для Атлантического океана в период 2004–2014 гг. // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.31857/S0030157422010142>. EDN WMFCFO
2. Синицын А.В., Гулев С.К. Применение оценки распределения вероятностей спутниковых данных об общем балле облачности для Мирового океана // Окружающая среда и энерговедение. 2023. № 4(20). С. 21–29. <https://doi.org/10.24412/2658-6703-2023-4-21-29>. EDN LHEDEK
3. Aleksandrova M., Gulev S.K., Belyaev K.P. Probability distribution for the visually observed fractional cloud cover over the ocean // J. Climate. 2018. V. 31. P. 3207–3232. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0317.1>
4. Bedacht E., Gulev S.K., Macke A. Intercomparison of global cloud cover fields over oceans from the VOS observations and NCEP/NCAR reanalysis // Int. J. Climatol. 2007. V. 27. P. 1707–1719. <https://doi.org/10.1002/joc.1490>
5. Freeman E., Woodruff S.D., Worley S.J. et al. ICOADS release 3.0: a major update to the historical marine climate record // Int. J. Climatol. 2017. V. 37. № 5. P. 2211–2232. <https://doi.org/10.1002/joc.4775>
6. Karlsson K.-G., Riihelä A., Trentmann J. et al. CLARA-A3: CM SAF cLoud, Albedo and surface RA-diation dataset from AVHRR data – Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring. 2023. https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V003
7. Paszkuta M., Markowski M., Kręzal A. Empirical verification of satellite data on solar radiation and cloud cover over the Baltic Sea // J. Atmos. Oceanic Technol. 2024. V. 41. P. 161–178. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-23-0061.1>
8. Siniatsyn A, Aleksandrova M, Gulev S.K. Comparison of field and satellite data of the total cloud cover for the Atlantic Ocean 2004–2014 // AIP Conf. Proc. 18 January 2024; 2988 (1): 060002. <https://doi.org/10.1063/5.0183817>
9. Wan J.S., Chen CC.J., Tilmes S. et al. Diminished efficacy of regional marine cloud brightening in a warmer world // Nat. Clim. Chang. 2024. V. 14. P. 808–814. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02046-7>

RECONSTRUCTION OF SEASONAL MEAN CLOUDS OVER THE WORLD OCEAN USING PROBABILISTIC DISTRIBUTION OF CLOUDS AND SINGULAR SPECTRA

A. V. Sinitsyn*, S. K. Gulev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Development of the effective probability distribution functions for cloud cover data is critically important for the quantitative statistical description of cloud cover over the oceans, including the probabilities of various cloud regimes. We analyze applicability of probability distribution developed for visually observed cloud cover to satellite observations of the total cloud cover over the global oceans. Further we use parameters of probability distributions for quantifying cloud cover response to different factors. We utilized mixed Gamma distribution for approximation of the probability density of the total cloud cover. Further probability estimates derived from the theoretical distribution were used for developing predictive statistical metrics for five-year total cloud cover over the World Ocean. Global calculations were conducted for a $5^\circ \times 5^\circ$ grid for the winter and summer seasons. Total cloud data were taken from the CLARA-A ed. 3 dataset retrieved from satellite measurements of AVHRR on the polar orbit satellites over the period from 1979 to 2023. The predictive distribution of total cloud cover was designed utilizing Singular Spectrum Analysis for $N + 1$ year with the test years ranging from 2019 to 2023. The forecasts were based on data records from 1979–2018, and each prediction for $N + 1$ year was next checked against the data for the respective test year. This procedure was applied for 5-year means for winter and summer seasons. Despite the use of a distribution function based on the incomplete Gamma function, prediction of the distribution of total cloud cover may have uncertainties of up to 2 octas, contingent to the dominant cloud cover regime. This discrepancy is due to poor capability of the distribution function to precisely capture abrupt changes in probability density of the cloud cover for specific cloud regimes.

Keywords: total cloud cover; satellite data; shortwave fluxes