

На правах рукописи



Александрова Марина Павловна

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ОБЛАЧНОСТИ И РАДИАЦИОННЫХ ПОТОКОВ НАД МИРОВЫМ
ОКЕАНОМ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
Гулев Сергей Константинович

Официальные оппоненты: **Вильфанд Роман Менделевич**
доктор технических наук, научный руководитель
Федерального государственного бюджетного
учреждения «Гидрометеорологический научно-
исследовательский центр Российской Федерации»

Горшенин Андрей Константинович
доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник, руководитель отдела
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской
академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Главная геофизическая обсерватория
им.А.И. Воейкова»

Защита состоится «__» _____ 2023 г. в ___ час. ___ мин. на заседании
диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва,
117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
<http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Приходящая к поверхности Земли солнечная радиация является основным источником энергии для всех процессов, протекающих на нашей планете, в том числе в атмосфере и океане. Она является приходной частью уравнения теплового баланса:

$$H = SW \downarrow - LW \uparrow - Q_h \uparrow - Q_e \uparrow, \quad (1)$$

где H – тепловой баланс, SW и LW – потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, Q_h и Q_e – турбулентные потоки явного и скрытого тепла, Вт/м². Оценки теплового баланса существенно (до 10%) разнятся даже в работах одного и того же автора [Trenberth and Solomon, 1994; Trenberth, 2009; Trenberth and Cheng, 2022]. Такой разброс связан в числе прочего с точностью расчета потоков. В конце XX века сложилось мнение, что проблема неопределенностей кроется в неточности оценок турбулентных потоков, и именно на уменьшение ошибок параметризаций турбулентных потоков были направлены основные усилия [Gulev et al., 2007; Fairall et al. 2011, Gulev and Belyaev, 2012; Bentamy et al., 2017; Cronin et al., 2019]. В 80-х гг. ошибка оценки турбулентных потоков доходила до 20–30 Вт/м², а в наши дни ее удалось сократить до 5 Вт/м² [Fairall et al., 2011; Cronin et al., 2019]. При этом развитие параметризаций радиационных потоков практически остановилось на рубеже 1990-х – 2000-х гг. [Dobson, 1988; Гидрюк, 1992], и ошибка в их расчетах составляет 10–25 Вт/м². Кроме улучшения качества параметризаций важно оценить долгопериодную изменчивость радиационных потоков для анализа их вклада в процессы изменения климата на различных временных масштабах [Gulev et al., 2013; Trenberth et al., 2014; Gulev et al., 2021].

Главную роль в формировании радиационных потоков играет облачность [Clarck et al., 1974; Reed, 1977; Dobson, 1988; Гидрюк и др., 1992; Gulev, 1995; Josey et al., 2003], которая и сама является важным элементом климатической системы и одним из наиболее эффективных параметров для диагностики

чувствительности климата [Bony et al., 2004 2006, 2015; Fasullo and Trenberth, 2012; Bellomo, 2014]. Информация об облачности над океанами представлена в различных архивах данных (реанализы, спутниковые данные), но самые длинные ряды данных – это визуальные наблюдения, полная коллекция которых ассимилирована в архиве ICOADS [Woodruff et al., 2011; Freeman et al., 2017]. Главным их недостатком являются пространственная и временная неоднородность [Gulev et al., 2007a,b]. Кроме того, в конце 40-х гг. XX века была изменена методика визуальных наблюдений, что привело к возникновению систематических ошибок в данных в первой половине XX века. Таким образом, для получения долговременных устойчивых оценок облачности и радиационных потоков над Мировым океаном требуется анализ данных об облачности, нацеленный на получение однородных рядов.

Основной целью диссертационной работы является создание базы стандартизированных данных общего балла облачности и радиационных потоков над Мировым океаном с начала XX века.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Выявить неоднородности в рядах данных об общем балле облачности на вековом масштабе, вызванные изменением методики визуальных наблюдений за облачностью в середине XX века;
- Разработать метод коррекции данных об общем балле облачности в первой половине XX века на основе фильтрации недостоверных наблюдений и статистической стандартизации достоверных;
- Адаптировать параметризацию коротковолновой радиации, разработанную в Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений (ЛВОАМКИ), для оценки потоков на вековом масштабе;
- Адаптировать параметризацию Josey [Josey, 2003] для расчета длинноволновой радиации для оценки потоков на вековом масштабе;

- Разработать методику построения климатологий радиационных потоков на регулярной сетке по неоднородным в пространстве и времени данным из архива ICOADS.

Методы исследования. Основные результаты диссертации получены с помощью статистических методов обработки и оценки данных. Для оценки распределения облачности по октам автором диссертации было разработано аналитическое смешанное гамма-распределение. Для оценивания радиационных потоков на поверхности океана использовались современные параметризации, в том числе разработанные автором.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Разработан набор методов коррекции исторических визуальных данных об облачности, основанный на анализе индивидуальных рейсов;
- Создано аналитическое смешанное гамма-распределение для аппроксимации частоты повторяемости различных окт облачности, позволяющее эффективно описывать распределения количества облаков;
- Разработан алгоритм расчета характеристик коротковолновой и длинноволновой радиации с помощью мгновенных моделей параметризации;
- Созданы сеточные массивы стандартизированных данных об общем балле облачности и оценках коротковолновых и длинноволновых радиационных потоков над океанами за последнее столетие.

Научная новизна исследования заключается, во-первых, в стандартизации столетних данных визуальных наблюдений общего балла облачности над океаном с помощью разработанного метода коррекции исторических данных, во-вторых, в построении однородных по пространству и времени долгопериодных климатологий общего балла облачности, коротковолновой и длинноволновой радиации, в-третьих, в создании новой

трехпараметрической смешанной гамма-функции для аппроксимации эмпирического распределения облачности по октам.

Достоверность результатов обеспечивается применением обоснованных статистических методов и оценкой статистической значимости всех полученных результатов. Достоверность результатов подтверждается сравнением с близкими исследованиями на альтернативных массивах данных. Наконец, полученные результаты не противоречат современным представлениям о физических процессах формирования облачности и радиационных потоков и их изменчивости.

Научная и практическая значимость. Получение однородных данных о балле общей облачности и радиационных потоках над океанами с начала XX века позволяет уточнить характеристики взаимодействия океана и атмосферы и получить достоверные оценки климатических изменений облачности и потоков радиации на долгопериодном масштабе. Предложенная методика коррекции визуальных данных об облачности впервые позволила использовать информацию об облачности над океанами из архива ICOADS ранее 1950 года, что расширяет временной масштаб для исследования физических и динамических процессов формирования и изменчивости облачности над Мировым океаном.

Апробация работы. Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих конференциях:

Открытая научная конференция Всемирной климатической программы WCRP Open Science, 2023, Kigali, Rwanda, 2023 год; Всероссийская конференция КЛИМАТ - 2023 «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», Москва, 2023 год; Международный радиационный симпозиум, Салоники, Греция, 2022 год; Всероссийская конференция КЛИМАТ -2019 «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», Москва, 2019 год; Пятый семинар объединенной технической комиссии по океанографии и морской метеорологии «Достижения в области морской метеорологии»

(CLIMAR-5), Гамбург, Германия, 2019 год; Ежегодная ассамблея Европейского геофизического союза (EGU), Вена, Австрия, 2017 год; Ежегодная встреча Европейского метеорологического общества: конференция по прикладной метеорологии и климатологии, Дублин, Ирландия, 2017 год; Международный радиационный симпозиум, Окленд, Новая Зеландия, 2016 год; 17-я международная конференция по облакам и осадкам, Манчестер, Великобритания; 19-я Международная школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы.», Шепси, 2015 год; 26-я Генеральная ассамблея Международного союза геодезии и геофизики, Прага, Чехия, 2015 год; Школа-конференция молодых ученых «Изменения климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация», Кисловодск, 2014 год; 14-я ежегодная встреча Европейского метеорологического общества, объединенная с 10-й европейской конференцией по прикладной климатологии, Прага, Чехия, 2014 год; 21-я сессия научной руководящей группы по изменчивости, предсказуемости и изменениям климата и океана (CLIVAR), Москва, 2014 год; Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2013), Санкт-Петербург, 2013 год; 13-я ежегодная встреча Европейского метеорологического общества, объединенная с 11-й европейской конференцией по прикладной метеорологии, Рединг, Великобритания, 2013 год; Семинар «Синтез океана и оценка потоков между океаном и атмосферной» (CLIVAR-GSOP), Вудсхолл, США, 2012 год.

Личный вклад автора работы. Все представленные в работе результаты получены автором лично. Автор определял планирование всех этапов работы и выполнял соответствующие блоки работ (постановка задачи, интерпретация полученных результатов, подготовка полученных результатов к публикации). Также автор принимал участие в сборе данных о характеристиках облачности и радиационных потоках в течение трех научных рейсов, которые использовались для построения параметризации потоков коротковолновой радиации.

Публикации. По теме диссертации опубликованы в 27 научных работах (8 – статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК, и входящих в базы данных Web of Science , 15 – тезисы российских и международных конференция, 1 – монография, 2 – свидетельства о регистрации без данных, 1 – патент на изобретение).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 7 глав, введения, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 191 страницу с 74 рисунками и 5 таблицами. Список литературы включает 171 наименований.

Благодарности. Автор искренне благодарит своего научного руководителя, член-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, профессора Гулева Сергея Константиновича за ценные советы и всестороннюю поддержку в процессе выполнения работы. Также автор выражает глубокую благодарность всему дружному коллективу ЛВОАМКИ за создание комфортной рабочей атмосферы и интересные научные дискуссии. Особенно отмечу поддержку и помощь Беяева К.П., Зюляевой Ю.А., Гаврикова А.В., Григорьевой В.Г., Тилининой Н.Д и Веземской П.С. Отдельная благодарность Эрику Фриману и Скотту Вудруфу (NOAA, США), Лиз Кент (NOC, Великобритания) и Акселю Андерсону (DWD, Германия) за помощь и участие в обсуждении результатов. Автор благодарит своих друзей и близких и отдельно Аверина П.В. за поддержку во время работы над диссертацией.

Особую благодарность и признательность автор выражает своей маме, Александровой Людмиле Николаевне. Без ее поддержки, одобрения и веры в меня этой работы не было бы.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, содержится общая характеристика работы: положения, выносимые на защиту, новизна, достоверность, вклад автора, апробация, список публикаций.

Глава 1 посвящена описанию массивов данных об облачности над океанами. В **разделе 1.1** дается характеристика данных визуальных наблюдений за облачностью с коммерческих судов (Voluntary Observing Ships, далее VOS), из архива ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set) [Freeman et al., 2017; Woodruff et al., 2011]. Ряды данных об облачности начинаются в XIX века, однако в современном научном сообществе используются данные, начиная с 1950–1952 гг. [Norris, 1999; Hahn and Warren, 2007; Bellomo and Clement, 2015; Deser, 2010]. Основными недостатками данных VOS, являются пространственная и временная неоднородности.

В **разделах 1.2, 1.3 и 1.4** дается характеристика данных об облачности со спутников, из реанализов и результатов климатических моделей соответственно.

В **разделе 1.5** сформулированы основные требования к данным для расчета долговременных рядов облачности и радиации и обоснован выбор массива ICOADS для решения поставленных в диссертационной работе задач.

В **Главе 2** в **разделе 2.1** выявляются проблемы точности визуальных наблюдений облачности в первой половине XX века. На рисунке 1 показаны разности между климатологиями, рассчитанными для периодов 1910–1930 гг. и 1960–1989 гг. Видно, что в первой половине XX века практически над всей акваторией Мирового океана средний балл облачности заметно меньше (на 0,2–0,6 окты), чем во второй половине XX века.

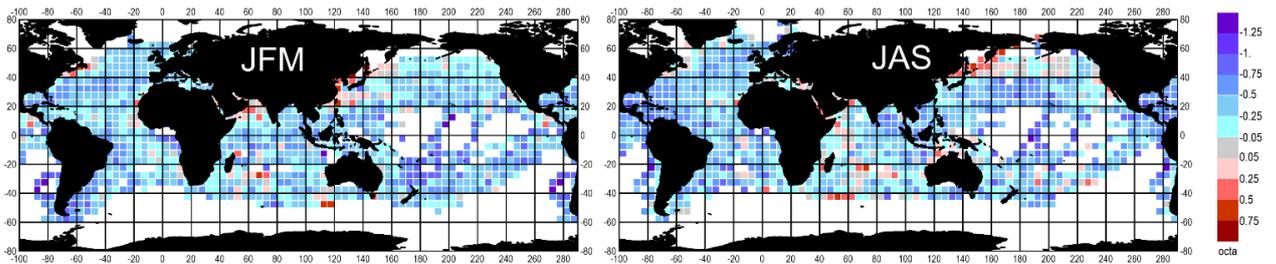


Рисунок 1 – Разности между климатологиями общего балла облачности для периода 1910–1939 гг. и 1960–1989 гг.

То, что это не естественный линейный тренд, а искусственный сдвиг, проиллюстрировано на рисунке 2, где представлен временной ряд для Северной Атлантики. Систематический сдвиг составляет 0,5–0,7 окты.

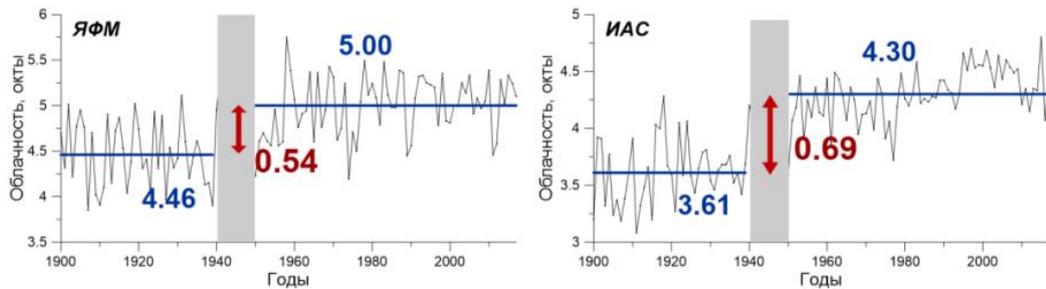


Рисунок 2 – Временные ряды общего балла облачности, построенные на основе «сырых» данных VOS для Северной Атлантики

Для анализа причин сдвига построены гистограммы распределения облачности по октам для периодов 1910–1939 гг. и 1960–1989 гг. (рисунок 3). Видно, что в первой половине XX века выделяются пики на 2 и 6 октах и отмечается меньшая повторяемость облачности 8 окт.

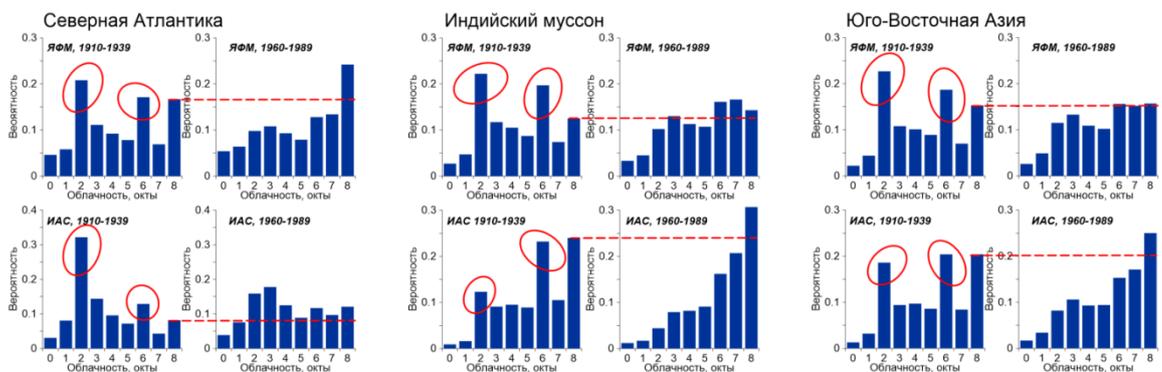


Рисунок 3 – Гистограммы распределения общего балла облачности по октам для 1910–1939 и 1960–1989 гг. для выбранных регионов Мирового океана

Еще одна проблема данных VOS, которая относится ко всему периоду наблюдений – не репрезентативность результатов, полученных по данным

визуальных наблюдений в районах, плохо обеспеченных данными. В разделе 2.2 сформулированы выделенные проблемы данных.

Глава 3 посвящена разработке аналитического распределения облачности по октам. В разделе 3.1 дается исторический обзор анализа облачности на основе частотных распределений.

В разделе 3.2 описывается смешанное трехпараметрическое гамма-распределение, которое выражается как

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

где $P(x)$ – плотность вероятности, переменная x – облачный покров в долях единицы ($[0,1]$), α и β ($\alpha > 0$ и $\beta > 0$) – параметр формы и параметр масштаба, 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 чистого неба и полностью закрытого облаками неба, полученные непосредственно из данных наблюдений. Для расчета параметров α и β использовался метод градиентного спуска. Получено выражение для нормализующей константы C :

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

где $\gamma(\alpha+1, \beta)$ – верхняя неполная гамма-функция, а также приведены выводы уравнения для плотности вероятности, среднего и дисперсии.

Уравнение (1) представляет собой непрерывный случай смешанного гамма-распределения, поэтому для применения распределения к данным визуальных наблюдений за облачностью VOS (которые представлены в октах), был разработан дискретный случай распределения:

$$P_d(k) = \beta^{(\alpha+1)} \gamma^{-1}(\alpha+1, \beta) \times \frac{1}{n-1} \times \left\{ \theta \left(1 - \frac{k}{n-1}\right)^\alpha \exp \left[-\beta \left(1 - \frac{k}{n-1}\right) \right] + (1-\theta) \left(\frac{k}{n-1}\right)^\alpha \exp \left(-\beta \frac{k}{n-1} \right) \right\}, \quad (4)$$

где $k = 0, 1, \dots, 8$ – целочисленные значения облачного покрова в октах от 0 до 8, n соответствует количеству дискретных категорий. Также приводятся уравнения для расчета среднего и дисперсии в дискретном случае.

В разделе 3.3 анализируется поведение аналитического распределения. На рисунке 4 показана аппроксимация эмпирических гистограмм дискретным случаем предлагаемого распределения (4). Как видно, предлагаемое распределение может описывать любые встречающиеся в природе распределения облачности по октам.

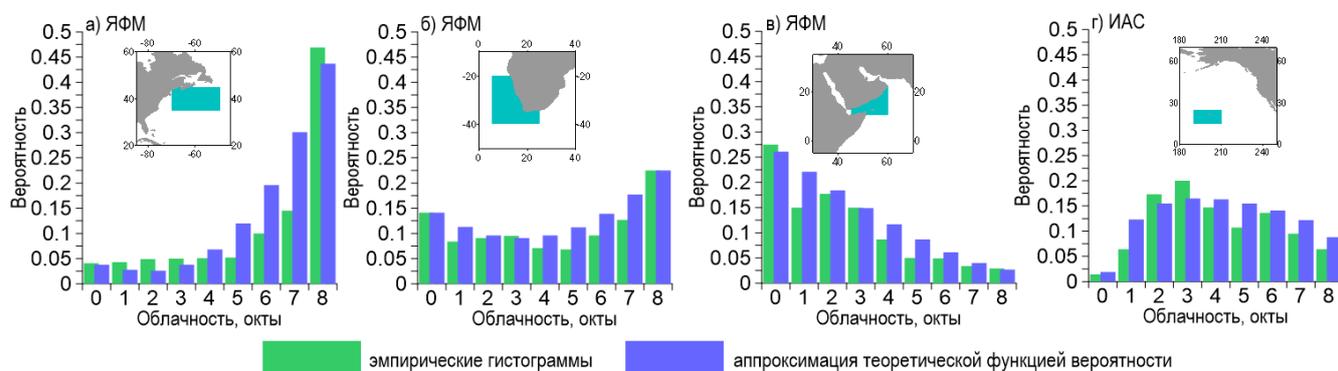


Рисунок 4 – Эмпирические гистограммы (зеленый) и их аппроксимация дискретным трехпараметрическим смешанным гамма распределением (4) (синий) для отдельных районов Мирового океана

В разделе 3.4 оценивается точность аппроксимации, а в разделе 3.5 кратко приведены основные результаты, полученные в Главе 3.

В Главе 4 описывается применение трехпараметрического смешанного гамма-распределения к данным визуальных наблюдений облачности. В разделе 4.1 приводятся климатологии общего и нижнего балла облачности и климатологии параметров для общего балла облачности по данным VOS (рисунок 5).

Дискретное смешанное гамма-распределение позволяет оценивать теоретическую вероятность отдельных окт облачности, что может решить проблему малого размера выборки. На рисунке ба представлена вероятность повторяемости 6 окт облачности для лета (ИАС) 2006 года по данным VOS, которая характеризуется сильным пространственным шумом. При этом

пространственное распределение вероятности, полученной из аналитического выражения (рисунок 6б), показывает гораздо меньше пространственного шума.

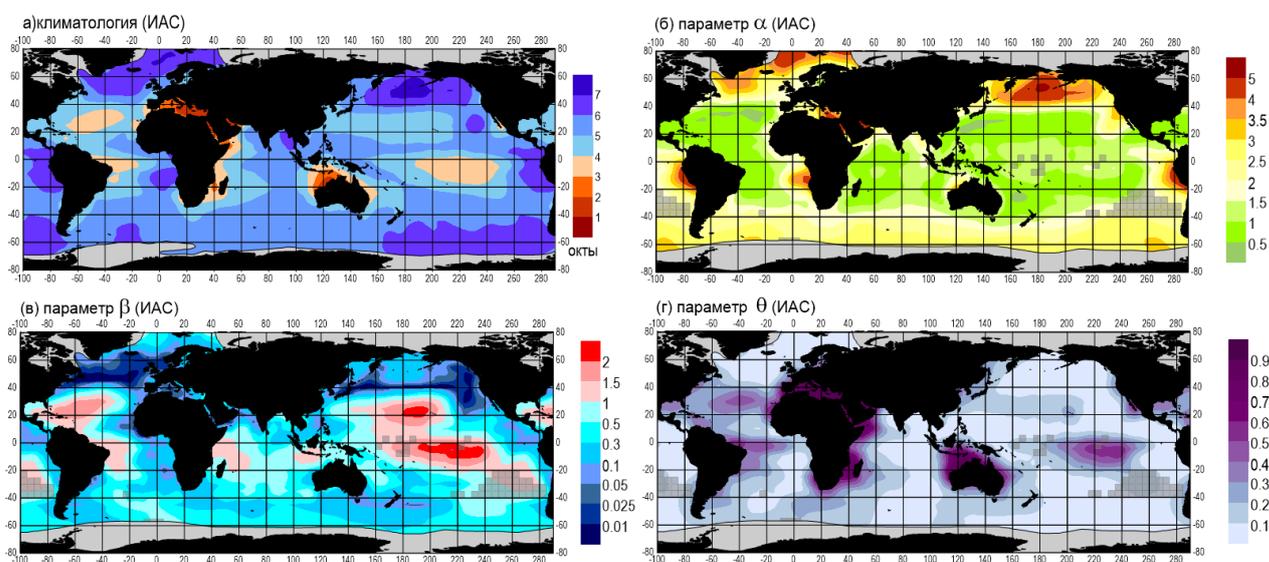


Рисунок 5 – Глобальные климатологии общего балла облачности (а), параметра формы α (б), параметра масштаба β (в) и управляющего параметра θ (г) для ИАС

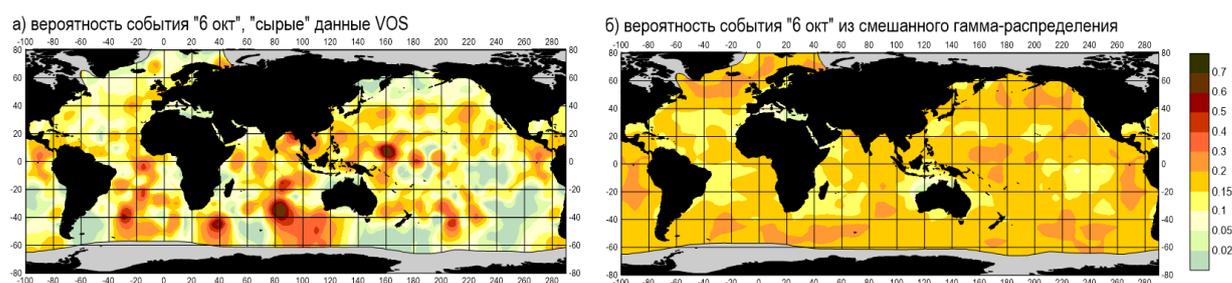


Рисунок 6 – Вероятности появления 6 окт облачности, рассчитанные по «сырым» данным VOS (а) и полученные из теоретического смешанного гамма-распределения (б) для ИАС 2006 года

В разделах 4.2 и 4.3 приводятся сравнение дневных и ночных наблюдений облачности и общей и нижней облачности соответственно. В разделе 4.4 представлены основные результаты Главы 4.

В Главе 5 рассматриваются причины ошибок данных визуальных наблюдений за облачностью в начале XX века, описывается методика их коррекции, демонстрируются скорректированные долгопериодные ряды облачности. В разделе 5.1 описываются потенциальные причины возникновения ошибок, которые кроются в изменении методики наблюдения. Согласно наставлениям ВМО [WMO, 1947; Elms et al., 1993], до 1949 года

измерения облачности на судах проводились в десятых долях. При создании архива ICOADS эти данные переводились в окты согласно коду 2700 ВМО (рисунок 7а). Видно, что в категорию 2 окты попадают измерения 2 и 3 балла по десятичной системе измерений, а в категорию 6 окт попадают измерения 7 и 8 баллов.

a)

2700

N Total cloud cover
 N_h Amount of all the C₁ cloud present or, if no C₁ cloud is present, the amount of all the C_M cloud present
 N_s Amount of individual cloud layer or mass whose genus is indicated by C
 N* Amount of cloud whose base is below the level of the station

Code figure		
0	0	0
1	1 oktas or less, but not zero	1/10 or less, but not zero
2	2 oktas	2/10 - 3/10
3	3 oktas	4/10
4	4 oktas	5/10
5	5 oktas	6/10
6	6 oktas	7/10 - 8/10
7	7 oktas or more, but not 8 oktas	9/10 or more, but not 10/10
8	8 oktas	10/10
9	Sky obscured by fog and/or other meteorological phenomena	
/	Cloud cover is indiscernible for reasons other than fog or other meteorological phenomena, or observation is not made	

Note: For use of (/), see Regulation 12.1.4.

b)

Cols. 24, 25, 46

Cloud Amount in Eighths

Punched	8ths	4ths
0	0	0
1	1	
2	2	1
3	3	
4	4	2
5	5	
6	6	3
7	7	
8	8	4
9	Obscured	
Blank	Missing	

Рисунок 7 – Код 2700 наставлений ВМО по переводу измерений облачности в десятых в окты (а) и таблица перевода облачности, закодированной в квартах, в окты (б)

Другой причиной пиков на 2 и 6 октах является то, что некоторая часть измерений в первой половине XX века проводилась в квартах, которые затем были переведены в окты (рисунок 7б). Наконец, было обнаружено некоторое количество рейсов, в которых преобладает наблюдение 2 окты. Предположительно в этих рейсах не проводились наблюдения за облачностью, а в графе облачность наблюдатель ставил «Z», который при автоматической оцифровке данных был распознан как «2».

Причиной недооценки количества наблюдений 8 окт, по нашему предположению, является то, что часть записей в судовых журналах до 1940-х гг. уже содержала информацию, выраженную в октах [Norris, 1999], которые, так как предполагалось, что информация представлена в десятых долях, были подвергнуты переводу согласно коду, показанному на рисунке 7а. Другими словами, имел место перевод из окт в окты, при котором невозможно появление категории 8 окт.

Для удаления из дальнейшего анализа данных, которые мы считаем подозрительными, выделялись индивидуальные рейсы по методу, изложенному в [Carela, Kent and Berry, 2015], который описан в **разделе 5.2**.

В **разделе 5.3** описывается методика коррекции данных. На первом этапе проводится фильтрация «недостоверных» рейсов: рейсы, в которые не содержится ни одного наблюдения 8 окт (измерения были проведены в октах, а затем подвергнуты еще одному переводу в окты); рейсы, содержащие только четные окты (измерения в этих рейсах проводились в квартах); рейсы, с преобладанием наблюдения 2 окты (в этих рейсах использовался символ «Z»). Эта фильтрация решает проблему недооценки 8 окт. Для устранения систематической ошибки пиков на 2 и 6 октах для каждого сезона и для каждой ячейки сетки проводилась симуляция частот 2 и 6 окт с последующем нормированием нового распределения.

В **разделе 5.4** представлены скорректированные данные. На рисунке 8 показаны разницы между средними значениями скорректированной облачности в 1910–1939 гг. и 1960–1989 гг. Как видно, эти разности имеют меньшее значение по модулю, а также уже нет превалирования отрицательных значений.

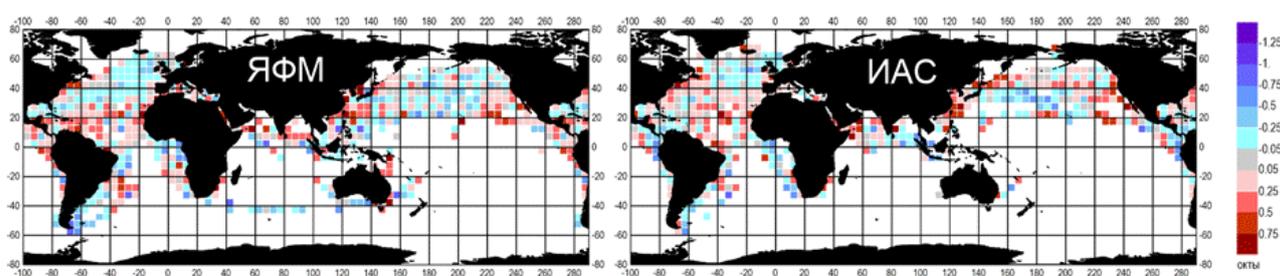


Рисунок 8 – Разности между климатологиями общего балла облачности для периода 1910–1939 гг. и 1960–1989 гг. после коррекции данных VOS в первой половине XX века

На рисунке 9 показаны временные ряды для Северной Атлантики после применения к данным об облачности в первой половине XX века предложенной схемы коррекции. Как видно, скачок в данных на рубеже 40-х и 50-х гг. (см. рисунок 2) исчез.

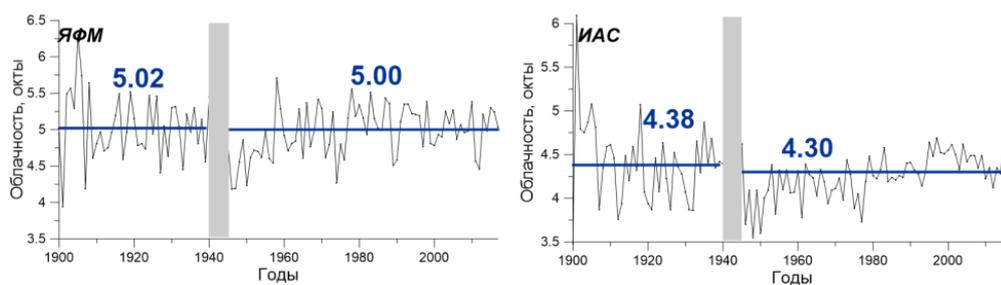


Рисунок 9 – Временные ряды общего балла облачности, построенные после коррекции данных VOS об облачности в первой половине XX века для Северной Атлантики

На рисунке 10 показаны гистограммы для начала XX века, построенные по скорректированным данным, и гистограммы для второй половины XX века. Как видно, пики повторяемости на 2 и 6 октах исчезли, также не наблюдаются недооценки 8 окт облачности.

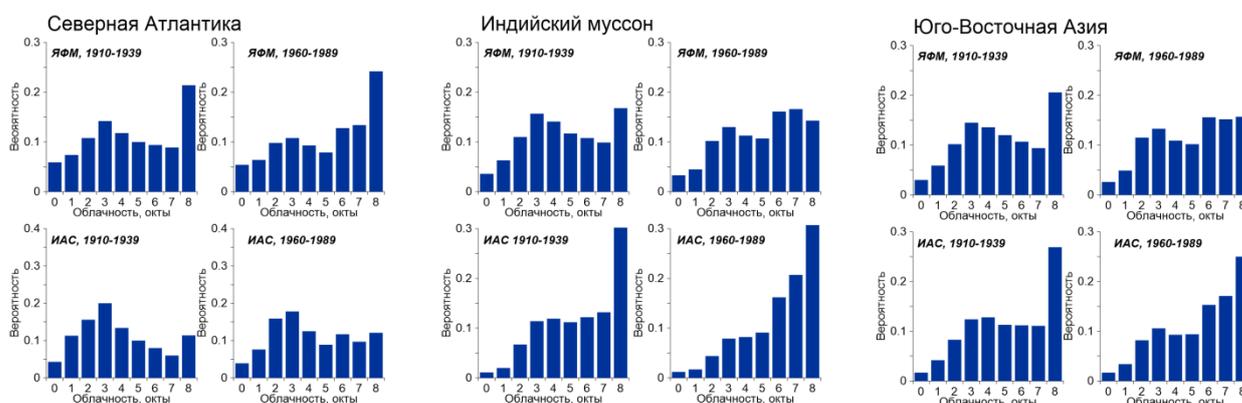


Рисунок 10 – Гистограммы распределения общего балла облачности по октам после коррекции данных для первой половины XX века для 1910–1939 и 1960–1989 гг.

В разделе 5.5 приведены основные выводы по Главе 5.

Глава 6 посвящена описанию расчетов радиационных потоков. В разделе 6.1 описывается влияние облачности на радиационные потоки, а также приводится обзор работ, посвященных расчетам коротковолновой радиации над океанами.

В разделе 6.2 описывается параметризация коротковолновой радиации, разработанная в Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений (ЛВОАМКИ). В этой параметризации поток коротковолновой радиации выражается как

$$Q = Q_0(a_i + b_i \sin h), \quad (5)$$

где Q – приходящая к поверхности океана коротковолновая радиация, Вт/м², Q_0 – солнечная постоянная (1368*sinh, Вт/м²), a_i и b_i – эмпирические коэффициенты, зависящие от количества облачности, h – высота Солнца. Особенностью параметризации ЛВОАМКИ является использование логарифмической зависимости фактора пропускания атмосферы от высоты Солнца.

В разделе 6.3 описывается методика расчета коротковолновой радиации по мгновенной параметризации применительно к массовым наблюдениям VOS. Для получения однородной климатологии использовался метод объективной интерполяции [Akima, 1970]. Зависимость высоты Солнца от широты учитывалась путем интегрирования потока коротковолновой радиации по всем широтам внутри ячейки сетки. Для решения проблемы неравномерного внутрисуточного распределения наблюдений применялся метод виртуального вращения часовой стрелки, а проблема внутрисезонной неоднородности решалась методом интегрирования по всем дням сезона.

После коррекции данные об облачности представлены в виде гистограмм для каждой ячейки сетки для каждого сезона, поэтому была разработана методика применения параметризации коротковолновой радиации к данным, представленным в виде гистограмм, которая описана в разделе 6.4.

В разделе 6.5 приводится методика расчета длинноволновой радиации по параметризации Джоси [Josey, 2003], в которой поток выражается как

$$Q_{LW} = \varepsilon \sigma_{SB} T_s^4 - (1 - \alpha_L) \sigma_{SB} \{T_a + an^2 + bn + c\}, \quad (6)$$

где Q_{LW} – поток приходящей длинноволновой радиации, $\varepsilon=0,98$ – коэффициент излучения поверхности океана, $\sigma_{SB}=5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана, T_s – температура поверхности океана, К, T_a – температура воздуха, К, n – балл общей облачности, доли единицы, $\alpha_L=0,045$ – длинноволновое альbedo, $a=10,77$, $b=2,34$, $c=-18,44$ – эмпирические коэффициенты. Как видно из формулы (6), временная неоднородность в расчетах длинноволновой радиации не играет такой роли, как для коротковолновой радиации. Методика

расчета была адаптирована для применения к данным, представленным в виде гистограмм.

В разделе 6.6 приводятся климатологии и скорректированные долгопериодные ряды радиационных потоков. На рисунке 11 представлены временные ряды коротковолновой радиации (нескорректированные (черная линия) и скорректированные (синяя линия)). До коррекции разница между средними за рассматриваемые периоды значениями в Северной Атлантике составляет $4\text{--}7 \text{ Вт/м}^2$, после коррекции различия между средним значениями уменьшается до $1\text{--}4 \text{ Вт/м}^2$.

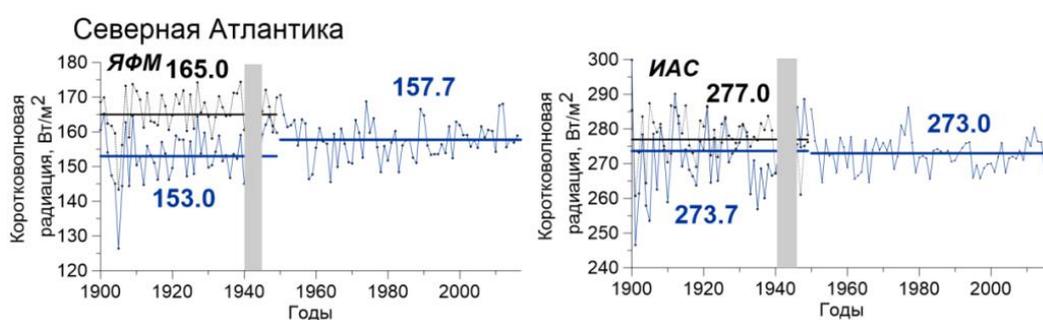


Рисунок 11 – Временные ряды коротковолновой радиации для Северной Атлантики. Для периода 1900–1949 гг. представлены неисправленные потоки (черный график) и скорректированные потоки (синий график)

Различия между средними значениями нескорректированных потоков длинноволновой радиации и потоками во второй половине XX века (рисунок 12) доходят до 3 Вт/м^2 . После коррекции разница заметно сокращается.

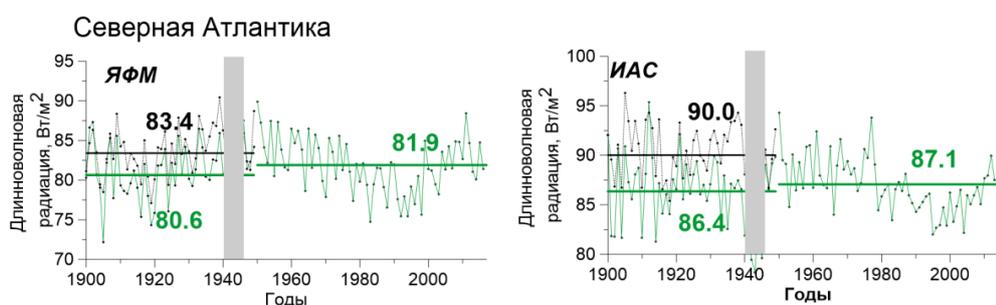


Рисунок 12 – Временные ряды длинноволновой радиации для Северной Атлантики. Для периода 1900–1949 гг. представлены неисправленные потоки (черный график) и скорректированные потоки (зеленый график)

В разделе 6.7 приведены основные результаты, полученные в Главе 6.

В Главе 7 показываются примеры применения полученных долгопериодных стандартизированных данных об облачности и радиационных потоках над Мировым океаном для решения задач метеорологии, океанологии и климатологии.

В разделе 7.1 рассматриваются долгопериодные изменения теплового баланса в Северной Атлантике. Бьеркнес [Bjerknes, 1964] предположил, что характер крупномасштабных взаимодействий атмосферы и океана зависит от временного масштаба: атмосфера ответственна за межгодовую изменчивость температуры поверхности океана (ТПО), а океан формирует значительную часть мультideкадных изменений ТПО. В работах [Gulev et al., 2013; Gulev and Latif, 2015] впервые исследованы мультideкадные изменения теплообмена между океаном и атмосферой с использованием 128-летней реконструкции турбулентных потоков тепла. Однако отсутствие оценок радиационных потоков ставило вопросы о достоверности полученных результатов. После добавления радиационных потоков (рисунок 13) становится очевидным, что именно турбулентные потоки вносят максимальный вклад в изменчивость суммарного потока тепла.

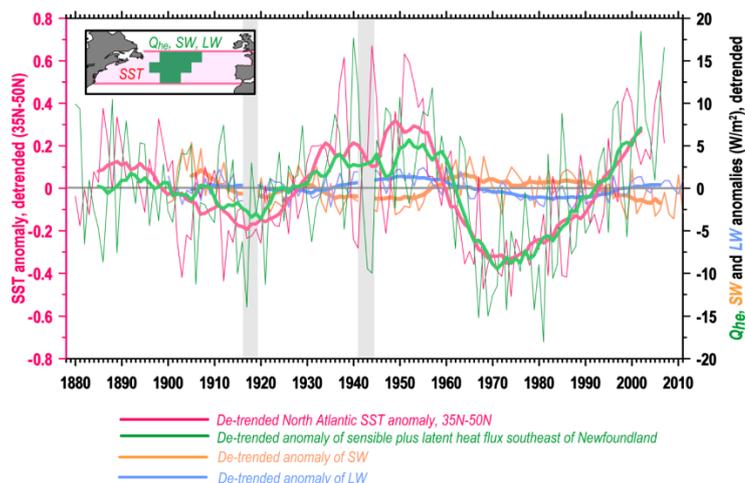


Рисунок 13 – Временные ряды атлантической мультideкадной вариаций аномалий температуры поверхности океана, потока турбулентного тепла, коротковолновой и длинноволновой радиации в средних широтах Северной Атлантики

Раздел 7.2 посвящен оценке долгопериодных линейных трендов. На рисунке 14 видно, что над большей частью акватории Мирового океана линейные тренды облачности положительные и достигают 0,2 окты за 10 лет.

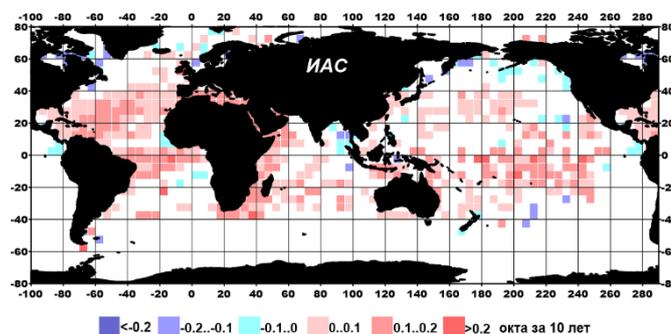


Рисунок 14 – Линейные тренды общего балла облачности за период 1950–2017 гг. для ИАС

В экваториальной и тропической зонах Атлантического океана, на западе Индийского океана, в центральных районах Тихого океана отмечаются отрицательные значения трендов коротковолновой радиации (до -2 Вт/м^2 за десятилетие) (рисунок 15а). В Северной Атлантике, в восточной половине Индийского океана, на западе и востоке северной части Тихого океана преобладают положительные тренды коротковолновой радиации (до 2 Вт/м^2).

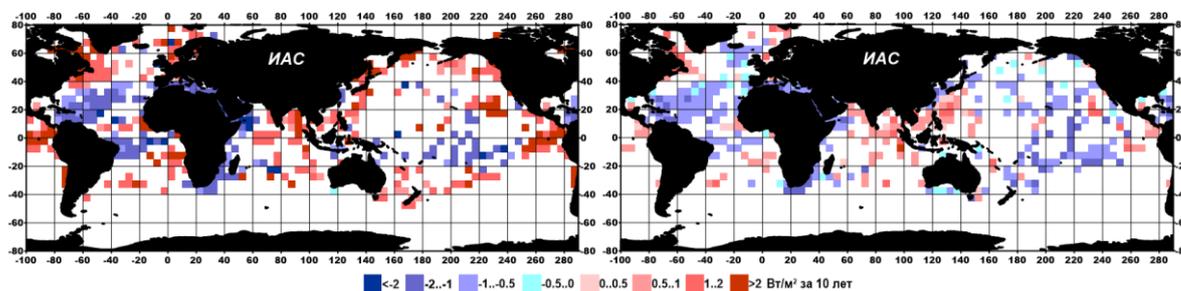


Рисунок 15 – Линейные тренды коротковолновой (а) и длинноволновой (б) радиации за период 1950–2017 гг. для ИАС

В трендах длинноволновой радиации (рисунок 15б) преобладают отрицательные значения (от $-0,5$ до -2 Вт/м^2). Положительные тренды в ИАС наблюдаются близ побережья острова Лабрадор, на востоке Аравийского моря, в Бенгальском заливе.

На рисунке 16 показаны долгопериодные линейные тренды общего балла облачности и радиационных потоков в двух районах в Северной Атлантике. Тренды облачности положительные ($0,02$ окты за 10 лет в субтропической зоне

и 0,04 окты за 10 лет в умеренных широтах). При этом тренды коротковолновой радиации в субтропической области также положительные (0,95 Вт/м² за 10 лет), в то время как в умеренных широтах поток коротковолновой радиации уменьшается на 0,52 Вт/м² за 10 лет. Что касается длинноволновой радиации, то в обоих районах ее поток уменьшается (на 0,19 Вт/м² за 10 лет в субтропической зоне и на 0,34 Вт/м² за 10 лет в умеренных широтах).

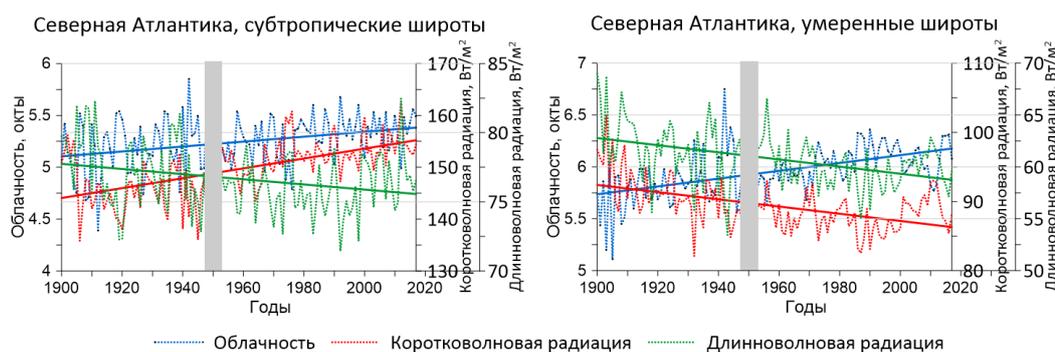


Рисунок 16 – Временные ряды и тренды общего балла облачности и радиационных потоков для выбранных регионов в Северной Атлантике для зимы (ЯФМ)

В разделе 7.3 анализируется связь облачности с Эль-Ниньо и циркуляцией Уокера.

В разделе 7.4 выделены основные результаты, полученные в Главе 7.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Выявлены и количественно оценены погрешности в визуальных данных об облачности над Мировым океаном и **впервые** разработаны алгоритмы их коррекции, включающие все аспекты практики наблюдений и кодирования данных до и после середины XX века.

2. **Впервые** на основе визуальных наблюдений общего балла облачности с судов построены долговременные климатологии характеристик облачности над Мировым океаном за период с начала XX века по настоящее время.

3. **Впервые** обоснована аналитическая трехпараметрическая функция распределения облачности, основанная на смеси гамма-распределений, позволяющая эффективно аппроксимировать распределение повторяемости облачности по октам.

4. **Разработан алгоритм** расчетов потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности Мирового океана на основе локальных параметризаций. Алгоритм использует различный размер ячеек в различных районах Мирового океана, включает метод объективной интерполяции и метод «интегрирования по широтам ячейки сетки» для учета нелинейности изменения угла высоты Солнца с широтой. Алгоритм использует метод «виртуального вращения часовой стрелки» для учета неравномерности распределения данных внутри суток и «интегрирование по всем дням сезона» внутри сезона.

5. На основе стандартизированной базы данных об общем балле облачности и разработанного алгоритма расчетов радиационных потоков **впервые** построены долговременные климатологии потоков коротковолновой и длинноволновой радиации над Мировым океаном, охватывающие период с начала XX века по настоящее время. Создание таких климатологий позволило **впервые** на основании наблюдений подтвердить, что собственная мультидекадная изменчивость суммарного потока тепла на поверхности океана определяется изменениями турбулентных потоков при относительно малом вкладе радиационных потоков.

6. **Получены** оценки линейных трендов, показывающие, что над большей частью акватории Мирового океана облачность увеличивается (до 0,2 окты за 10 лет). Показано, что линейные тренды коротковолновой радиации носят региональный характер, будучи отрицательными (местами превышают -2 Вт/м^2 за 10 лет) в экваториальной и тропической Атлантике и в западной части Индийского океана и положительными (до 2 Вт/м^2 за 10 лет) в Северной Атлантике, Бенгальском заливе и северо-западной части Тихого океана. Линейные тренды длинноволновой радиации на большей части акватории отрицательные (до -2 Вт/м^2 за 10 лет), локально положительные тренды длинноволновой радиации обнаружены в северо-западе Атлантического океана, в Филиппинском море и в Бенгальском заливе.

Список работ, опубликованных по теме диссертации*Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК*

1. Aleksandrova M. Cloudiness over the oceans at subarctic latitudes as a visible part of atmospheric moisture transport / **M. Aleksandrova** // Russian Journal of Earth Sciences. – 2021. – V. 21. – № 1. – P. ES1004.
2. Krinitskiy M. On the generalization ability of data-driven models in the problem of total cloud cover retrieval / M. Krinitskiy, **M. Aleksandrova**, P. Verezemskaya, S. Gulev, A. Sinitsyn, N. Kovaleva, A. Gavrikov // Remote Sensing. – 2021. – V. 13. – № 2. – P. 326.
3. Aleksandrova M. Minimizing heterogeneity of VOS observations for improving estimates of short-wave radiation over the oceans / **M. Aleksandrova** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – V. 606. – № 1. – P. 012001.
4. Aleksandrova M. Climatology and interannual variability in statistical characteristics of cloud cover over the North Atlantic during 1950-2017 / **M. Aleksandrova**, K. Belyaev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – V. 231. – № 1. – P. 012005.
5. Aleksandrova M. Probability distribution for the visually observed fractional cloud cover over the ocean / **M. Aleksandrova**, S.K. Gulev, K. Belyaev // Journal of Climate. – 2018. – V. 31. – № 8. – P. 3207–3232.
6. Александрова М.П. Климатические закономерности коротковолновой солнечной радиации над океанами, на основе новой параметризации / **М.П. Александрова**, А.В. Сеницын, С.К. Гулев // Океанология. – 2017. – V. 57. – № 2. – P. 253–256.
7. Сеницын А.В. Оценка погрешностей прямых измерений приходящих радиационных потоков, связанных с колебаниями корабля / А.В. Сеницын, **М.П. Александрова** // Океанология. – 2009. – V. 49. – № 4. – P. 494–500.

8. Александрова М.П. Уточнение параметризации коротковолновой радиации на поверхности океана на основе прямых измерений в Атлантическом океане / **М.П. Александрова**, С.К. Гулев, А.В. Сеницын // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 4. – Р. 45–54.

Соавторство в монографии:

9. Облачность над океаном: современные методы исследований / М.А. Крицкий, **М.П. Александрова**, С.К. Гулев, А.В. Сеницын. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТОПУС ПРЕСС", 2018. – 236 с. – ISBN 978-5-94588-249-2. – DOI 10.30826/OCEAN-CLOUDS-2018. – EDN YVCNBR.

Также автором опубликовано 15 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях, получены 2 свидетельства о регистрации баз данных и 1 патент на изобретение.