

На правах рукописи

Погарский Фёдор Алексеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЕЙ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ В ИНДИЙСКОМ
ОКЕАНЕ**

Специальность 25.00.29 – "Физика атмосферы и гидросферы"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в ФГБУН Институте физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Полников Владислав Гаврилович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Кузнецов Сергей Юрьевич

ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
заведующий лабораторией

доктор физико-математических наук
Репина Ирина Анатольевна

ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,
заведующая лабораторией

Ведущая организация:

ФГБУ Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова

Защита состоится 12 декабря 2013 г. в 11:00 на заседании диссертационного
совета Д 002.096.01 в ФГБУН Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова
РАН по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института физики
атмосферы им. А. М. Обухова РАН.

Автореферат разослан " 11 " ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.096.01

к. г. н.

Краснокутская Людмила Дмитриевна

Общая характеристика работы

Работа посвящена изучению пространственно-временной изменчивости полей ветра и волнения на конкретном примере Индийского океана (ИО). При этом поле ветра берётся из реанализа NCEP/NCAR, а поле волнения рассчитывается при помощи численной модели WAM с модифицированной функцией источника.

Использован реанализ за период 1998–2009 гг. с разрешением 1° по широте и $1,25^\circ$ по долготе с дискретностью по времени 3 часа. Точность реанализа ветра составляет примерно $\pm 1,5$ м/с.

Модификация модели WAM (WAve Modeling), разрабатываемой рядом европейских научных центров с середины 1980-х годов, включает в себя замену функции-источника в уравнении эволюции спектра волн, ответственную за физическое содержание модели, и увеличение набора выводимых результатов расчетов за счет накопления физических параметров, характеризующих механическое взаимодействие атмосферы и океана. Модифицированная модель верифицирована по натурным данным измерений высот волн на волноизмерительных буйках. В результате верификации путём настройки модели получено повышение точности расчётов до 30% по сравнению с оригинальной моделью WAM. Кроме того, модифицированная модель имеет в полтора раза большее быстродействие.

Столь подробное поле реанализа не было использовано ранее для расчёта полей волнения в ИО. Благодаря этому и повышенной точности модели волнения получены результаты, превосходящие имеющиеся аналоги, как по полноте, так и по точности исследуемых полей.

Актуальность темы

Настоящая работа направлена на многоплановое и систематическое изучение свойств геофизических полей ветра и ветрового волнения на акватории ИО, включающее в себя анализ их пространственно-временной изменчивости, статистических свойств и долговременных трендов. Актуальность такого исследования продиктована приоритетными задачами

рационального природопользования и разработки технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, а также предотвращения и ликвидации ее загрязнения.

Изучение и оценка значений величин переноса механической энергии (ПЭМ) из атмосферы в океан представляют собой один из ключевых вопросов в понимании механизмов динамики атмосферы и гидросферы и изменчивости климата Земли. Построение, использование и совершенствование численных моделей требует досконального изучения физических процессов и явлений, происходящих в атмосфере и гидросфере. В свою очередь, результаты моделирования приносят новые знания о природе взаимодействия атмосферы и океана, которые могут быть использованы как в научном, так и практическом плане.

Спектральные характеристики полей волнения, их региональная изменчивость по мировому океану и отдельным его частям в литературе освещены мало. Довольно подробно представлены лишь исследования по спектрам метеопараметров, которые не связаны с полями волнения. Более того, практически нет работ по изучению полей энергии ветрового волнения, представляющих большой интерес. В частности, этот интерес обусловлен тем, что в численных моделях ветрового волнения непосредственно рассчитывается именно поток энергии от ветра к волнам. Косвенно вопросы энергетики полей ветра и волнения и их взаимодействия постепенно начинают привлекать внимание исследователей. Однако эти работы пока находятся в начальной стадии.

Практический интерес к изучению полей ветрового волнения обусловлен, главным образом, тем фактором, что большие волны могут быть опасны для судоходства и др. Знание их статистики, экстремумов и трендов крайне важно для оценки рисков морской деятельности. По этой причине, данного рода исследования полезно проводить не только для Мирового океана в целом, что наиболее часто представлено в литературе, но и для отдельных регионов.

Цели и задачи исследования

Работа включает в себя большой список задач. Основные из них таковы: определение сезонной и межгодовой изменчивости средних величин скорости ветра и высоты волн; определение пространственной структуры средних полей этих величин и установление выделенных зон в ИО; определение величин энергии ветра и волнения в точках и средних по зонам и для всего ИО, их изменчивости по сезонам и годам, а также по масштабам временной изменчивости; определение 12-летних трендов средних величин всех перечисленных полей и их пространственного распределения; получение информации об экстремальных значениях ветра и волнения, включая их распределение по зонам и времени; анализ спектров и гистограмм величин скорости ветра и высот волнения; оценка статистических моментов их эмпирических распределений.

Целями выполнения указанных задач являются: определение пространственных областей независимой динамики исследуемых полей, нахождение выделенных масштабов временной изменчивости «мгновенных» и средних значений скорости ветра, высоты волн и их энергий как в выделенных точках, так и по зонам и по ИО в целом; демонстрация пространственной и временной изменчивости функции распределения ветра и волн и степени отличия статистических характеристик от таковых, известных из литературы.

Аналогичные задачи решаются для специально рассчитанных полей притока механической энергии из атмосферы к волнам и диссипации волновой энергии. Цель заключается в получении пространственного распределения указанных характеристик, оценке их изменчивости, экстремумов и долговременных трендов.

Научная новизна работы

Впервые реализован комплексный подход к статистическому анализу геофизических полей. Особенностью предложенного подхода является то, что он не ограничивается исследованиями свойств только полей скорости ветра и

высот волн, а включает в себя исследования полей их энергий и скорости ПЭМ от ветра к волнам и её диссипации.

Впервые получены 12-летние поля ветра, волн, их энергий и скорости ПЭМ из атмосферы в океан на акватории ИО с высоким разрешением. Выделена шестизонная пространственная структура указанных полей, определяемая устойчивой неоднородностью как их средних величин, так и характера их временной изменчивости. Определены масштабы этой изменчивости.

По указанным полям построены 12-летние ряды скорости ветра, высоты волн, энергии ветра и волнения, для которых выполнен спектральный анализ. Анализ показал существование следующих масштабов изменчивости: 1 год, $\frac{1}{2}$ года, 40-50 суток, 1, $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ суток, а также различные законы спадания интенсивности спектра начиная с 10 суток, отличающиеся для различных величин и различные по пространству.

Установлены достоверные 12-летние тренды для среднегодовых значений энергии ветра, высот волн и энергии волнения.

Впервые выполнен анализ пространственно-временной изменчивости поля ПЭМ из атмосферы в волны, полученного с помощью численного моделирования на акватории ИО.

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы заключается в углублении понимания особенностей пространственно-временной изменчивости полей ветра и волнения. В частности, показано, что эти характеристики в разных районах и в разные сезоны существенно различны, т. е. должны подвергаться независимому исследованию.

Полученные величины средних, их дисперсий, спектральных масштабов изменчивости, трендов величин и скорости ПЭМ из атмосферы в океан могут служить опорными точками для последующего более детального исследования.

Так, показано, что оценки трендов средней для Мирового океана скорости ветра и средней высоты волн, сделанные на основе анализа многолетних

спутниковых данных, в 2-3 раза ниже полученных нами. Это различие порождает ряд задач. Одна из них связана с уточнением области достоверных значений данных дистанционного зондирования. Другая – с уточнением степени достоверности результатов численного моделирования путём сравнения с большим количеством данных измерений на буйках.

Впервые предложена процедура отдельного вычисления и анализа величин передачи энергии от ветра к волнам (накачки) I_E и диссипации волновой энергии D_E . Такой подход позволил существенно уточнить прежние оценки потока энергии, полученные на основе уравнения роста ветровых волн для прямого разгона.

Практическая значимость заключается в получении обширной базы данных экстремальных значений высот волн, скоростей ветра и скоростей обмена энергией между ними, которая позволяет решать задачи оценки риска особо опасных явлений и тенденций их климатической изменчивости в ИО. Задачи такого рода постоянно присутствуют при решении вопросов рационального природопользования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Существует устойчивая пространственная неоднородность ИО, имеющая структуру выделенных зон, которая проявляется как в поле ветра, так и в поле волнения.

Гистограммы ветра и волнения и их статистические моменты в зонах существенно различаются, а спектральные характеристики закономерно меняются от севера к югу. Детальное их изучение в каждой зоне необходимо проводить независимо.

2. Временные характеристики изменчивости ветра и волнения имеют следующий набор выделенных масштабов: 1 год, 50-40 суток, 1 сутки, 1/2 и 1/3 суток. В северных зонах в поле ветра имеется хорошо выделенная полугодовая гармоника. Форма временных спектров для рядов ветра и волнения незначительно меняется при пространственном осреднении от зоны до всего океана.

3. Помимо отмеченных выделенных масштабов в диапазоне от 100 до 10 суток наблюдается спектр, близкий к спектру белого шума, а от 10 суток и менее – закономерный степенной спад спектра. Для скорости ветра показатель степени спада меняется от $-5/3$ до -2 , для плотности горизонтального потока энергии ветра (ППЭВ) – $-2,5$, для высоты волн – -4 , для энергии волн – от $-4,5$ до -5 .

4. Энергетика волн и ветра проявляет ту же зонную структуру, более резко выраженную.

Характерные средние по океану величины поверхностной плотности энергии волн составляют $\sim 10^4$ Дж/м², ППЭВ $\sim 10^3$ Вт/м².

Масштабы переноса механической энергии (ПЭМ) от ветра к волнам имеют порядок 1 Вт/м², экстремальные значения ПЭМ достигают величин 60 Вт/м². При этом разность между передачей энергии от ветра волнам и диссипацией волновой энергии (баланс) может достигать 3 Вт/м².

5. 12-летние тренды средних по ИО величин таковы: для скорости ветра по реанализу NCAR/NCEP тренд нулевой (недостововерен), для ППЭВ – положительный 1% в год, для значительной высоты волн – положительный 1% в год, для плотности энергии волн – положительный 2% в год.

Апробация работы

Результаты работы докладывались:

1) на научных семинарах ИФА им. А. М. Обухова РАН, заседаниях Учёного совета физического сектора ИО им. П. П. Ширшова РАН, семинаре "Математическое моделирование геофизических процессов" в ИВМ РАН.

2) на Международных конференциях по ветровому волнению WISE-2011 (Китай), 2012 (Испания), 2013 (США); совещании по прогнозу ветрового волнения Waves-2012 (США), конференции EGU General Assembly-2012 (Австрия), на общеинститутском семинаре Морского гидрофизического института НАНУ (Украина).

Публикации

По материалам, изложенным в диссертации, опубликовано 7 научных работ, в т. ч. 5 статей в рецензируемых журналах и сборниках, из них 3 в журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук.

Личный вклад автора

Выполнение расчётов волнения с использованием численной модели. Анализ полей ветра, волнения и их энергий. Построение гистограмм и расчёт их статистических моментов. Анализ спектров, временных рядов, экстремумов. Обработка данных буйковых измерений и оценка точности модели ветровых волн.

Объём и структура работы

Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, включающего в себя 68 названий.

Содержание

Во введении обоснована актуальность темы, обозначены основные цели настоящей диссертационной работы, перечислены использованные литературные источники и приведено краткое содержание работы. Проанализированы методики исследования полей ветра и волнения, сформулированы методы и подходы, используемые в настоящей работе.

В основу исследования ставится изучение долговременной пространственно-временной изменчивости крупномасштабных, так называемых геофизических, полей ветра и волнения.

Исследования полей ветра ведутся давно и имеют широкое разнообразие интересов. В частности, привлекаются как данные реанализа, так и прямые дистанционные наблюдения. Следует отметить, что немаловажную роль играют и работы по оценке достоверности всех анализируемых полей ветра,

основанные на сопоставлениях разного вида данных, калибровках, и измерениях. Однако детальная пространственная изменчивость полей ветра, специфическая для каждого из районов Мирового океана, как правило, остается вне внимания. Также редко проводится анализ спектров полей ветра, и совершенно отсутствует анализ полей энергии ветра и ветрового волнения, представляющих большой научный и практический интерес.

В настоящей работе впервые осуществлён систематический подход к изучению геофизических полей как ветра, так и волнения. Необходимо, во-первых, дальнейшее уточнение пределов точности применяемых методов расчета и измерения, как полей ветра, так и полей волнения, а во-вторых, нужно более детально и более систематически исследовать именно отдельные районы Мирового океана, существенно различающиеся по режимам ветра и волнения. Эти вопросы сформулированы в первой главе при постановке задач нашего исследования.

В первой главе обосновывается выбор направления исследования и проводится постановка задач. С учетом современных тенденций в исследованиях геофизических полей, общая формулировка направлений исследования в приложении к акватории ИО следующая.

1) Многоплановое систематизированное исследование пространственно-временной изменчивости геофизических полей ветра и волнения на многолетних масштабах времени их эволюции.

2) Анализ статистических характеристик полей (построение гистограмм, функций распределения скорости ветра и высот волн и расчет статистических моментов этих функций).

3) Спектральный анализ рядов указанных полей.

4) Расчет средних величин и оценка долговременных трендов полей ветра и волнения за продолжительный период времени.

Для выполнения указанной работы привлекается реанализ ветра NCAR/NCEP высокого пространственного ($1^\circ \times 1,25^\circ$) и временного (3 ч) разрешения и численная модель ветрового волнения WAM, модифицированная с целью повышения скорости и точности расчетов значительной высоты

ветровых волн H_s . Указанное качество модели достигается путём использования новой функции источника модели, содержащей улучшенное описание физических процессов. Доказательство ее преимуществ приводится в 3 главе с использованием данных буйковых измерений.

Кроме того, численная модель волнения впервые привлекается для прямого расчёта величин ПЭМ из атмосферы в океан. Формулировка данной задачи и результаты её выполнения приведены в главе 5.

Указанные цели исследования приводят к следующей совокупности задач (здесь сформулированы на примере поля ветра):

1. Выполнить анализ четырех типов карт полей средней скорости ветра $\langle W(i, j, T) \rangle$, заданной формулой

$$\langle W(i, j, T) \rangle = \left(\sum_{t_n \in T} \Delta t_n W(i, j, t_n) \right) / \sum_{t_n \in T} \Delta t_n, \quad (1)$$

где $\Delta t_n = 10800$ с – дискретность полей по времени, T – период осреднения, $W(i, j, t_n)$ – модуль ветра в точке пространственного узла (i, j) на момент времени t_n .

Выполняются следующие построения: а) карты для одного зимнего (январь) и одного летнего (июль) месяцев с осреднением за все годы и карты сезонной изменчивости; б) карты среднегодовые и карты межгодовой изменчивости; в) карта среднего за весь период поля ветра; г) карта среднего за весь период тренда поля скорости ветра.

Установить существование пространственной неоднородности рассматриваемых полей и провести их зонирование.

2. Выполнить анализ карт средних плотностей горизонтальных потоков кинетической энергии ветра (ППЭВ)

$$E_A(i, j, t_n) = \rho_a W^3(i, j, t_n) / 2, \quad (2)$$

рассчитываемых аналогично (1), где $\rho_a = (353/T_K)$ кг/м³ – плотность воздуха с учетом ее зависимости от климатической среднесуточной температуры T_K (по шкале Кельвина), меняющейся по широте и сезонам. Используются четыре типа осреднения, указанные в задаче 1.

3. Построить графики временного хода средней по пространству и времени скорости ветра $W(R,T)$ и средней ППЭВ $E_A(R,T)$, заданных соотношениями

$$W(R,T) = \left(\sum_{i,j \in R} W(i,j,T) \Delta S_{ij} \right) / \sum_{i,j \in R} \Delta S_{ij}, \quad (3)$$

$$E_A(R,T) = \left(\sum_{i,j \in R} E_A(i,j,T) \Delta S_{ij} \right) / \sum_{i,j \in R} \Delta S_{ij}, \quad (4)$$

где ΔS_{ij} – площадь ячейки сетки на акватории ИО, левым нижним углом прилегающей к узлу i -й широты и j -й долготы. Аргумент R означает индексацию пространственной области интегрирования (точка, зона или весь океан).

4. Построить 12-летние ряды: а) временного хода для «мгновенных» (с шагом 3 ч) величин $W(R,T,t)$ и $E_A(R,T,t)$ в фиксированных точках зон; б) хода тех же величин, но с суточным их осреднением (шаг 1 сутки) и осреднением по выделенным зонам, в) хода тех же величин с суточным осреднением и осреднением по всему ИО. Полученные временные ряды подвергаются спектральному анализу.

5. Построить график временного хода среднего ветра $W(R,T,t)$ и ППЭВ $E_A(R,T,t)$ с годовым осреднением (за каждый год периода 1998–2009 гг.) для каждой зоны и по всему ИО.

6. Определить экстремальные значения скорости ветра $W_{\max}(i_m, j_m, t_m)$ и их пространственно-временное расположение (i_m, j_m, t_m) для каждой зоны. Построить карту экстремальных значений ветра $W_{\max}(i, j)$, найденных для каждой точки исследуемой акватории ИО.

7. Построить гистограммы для скорости ветра: а) для отдельных (выделенных) точек каждой зоны, единые за весь период 1998–2009 гг.; б) за выделенный зимний (январь) и летний (июль) месяцы с накоплением по всем годам (для каждой зоны); в) единые за все годы с пространственным накоплением для каждой зоны отдельно и по всему ИО.

Для всех вариантов гистограмм, рассчитать 4 статистических момента (среднее, стандартное отклонение, асимметрию и эксцесс) и оценить параметры модельной функции распределения, параметризованной распределением Вейбулла.

Задачи исследования поля ветрового волнения в ИО формулируются полностью по аналогии с таковыми для поля ветра. Единственное отличие заключается в том, что для получения средних полей высот волн $\langle H_S(i, j, T) \rangle$ в формулах (1) и (3) поле ветра $W(i, j, t_n)$ нужно заменить на поле высот волн $H_S(i, j, t_n)$, а для получения полей энергии волн $\langle E_W(i, j, T) \rangle$ в формулах (2) и (4) ППЭВ $E_A(i, j, t_n)$ надо заменить на поверхностную плотность энергии волн

$$E_W(i, j, t_n) = g\rho_w H_S^2(i, j, t_n)/16, \quad (5)$$

где g – ускорение силы тяжести, а ρ_w – плотность воды).

Для полей передачи механической энергии от ветра к волнам $I_E(i, j, T)$ и диссипации энергии волн $D_E(i, j, T)$, связанных с изучением ПЭМ из атмосферы в океан совокупность задач формулируется по аналогии с задачами 1–6, описанными выше.

Во второй главе исследована пространственно-временная изменчивость поля ветра на акватории ИО. Исследование включает в себя построение и анализ карт полей скорости ветра и ППЭВ различных масштабов осреднения, а также и спектральный анализ рядов этих характеристик. Главные результаты, касающиеся анализа поля ветра в ИО, заключаются в следующем.

Установлено и обосновано районирование ИО на 6 зон (рис 1), динамика циркуляции ветра в которых имеет свои устойчивые характерные особенности на всех рассмотренных масштабах осреднения. На примере анализа гистограмм ветра показано, что в силу пространственной изменчивости оценку статистических величин необходимо проводить для каждой зоны независимо.

На основе спектрального анализа установлено многообразие масштабов изменчивости как для «мгновенных» значений ветра в точках, так и для рядов, полученных при различных масштабах их пространственно-временного осреднения. Выявлено закономерное укрупнение главного периода

изменчивости по мере продвижения по зонам на юг с периода 0,5 года на период 1 год.

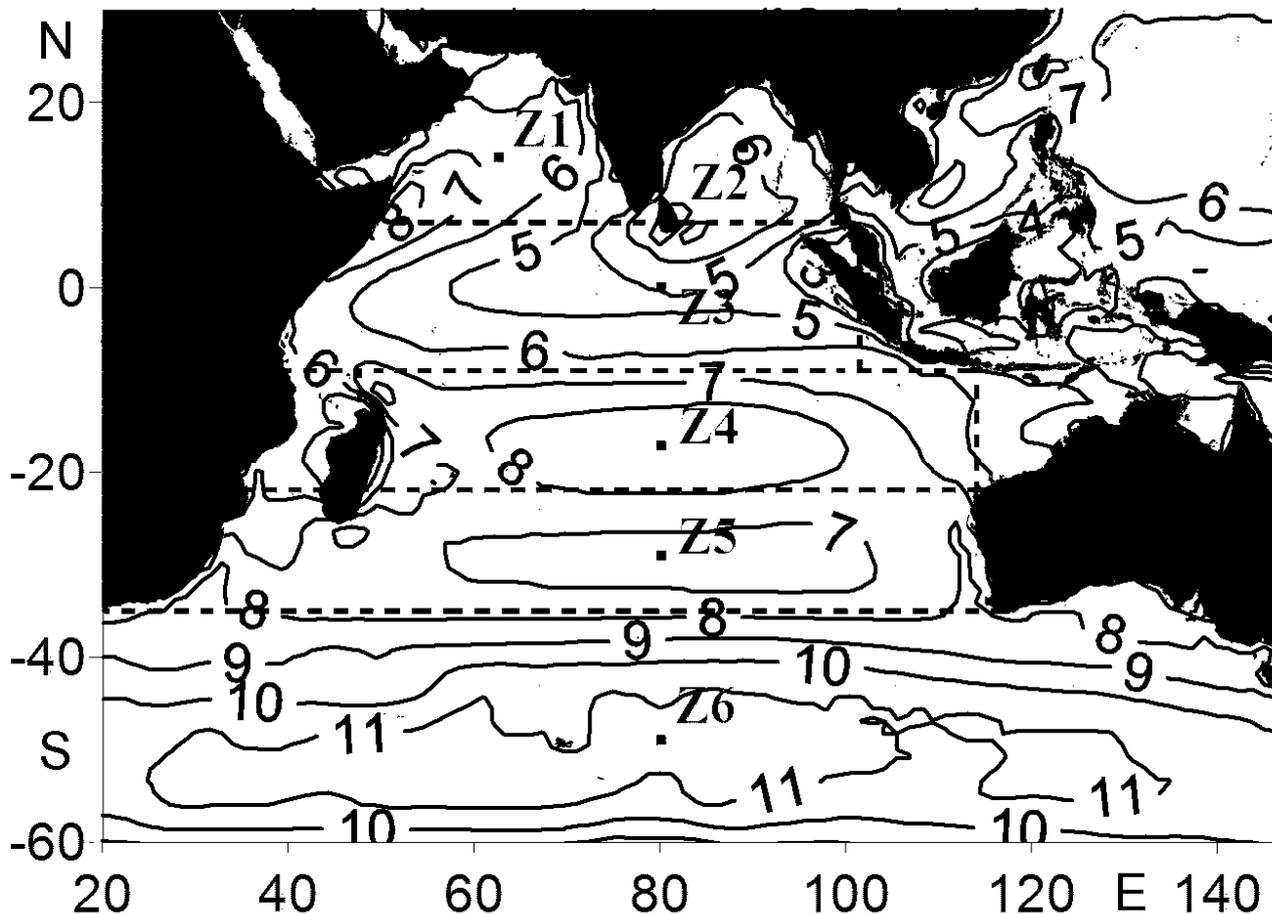
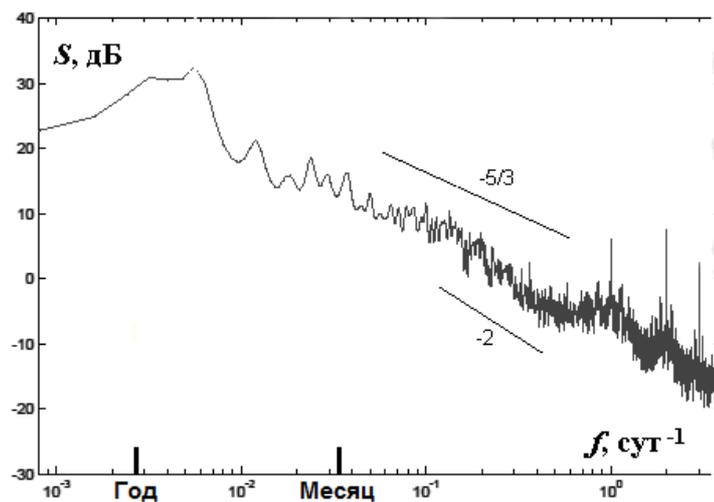
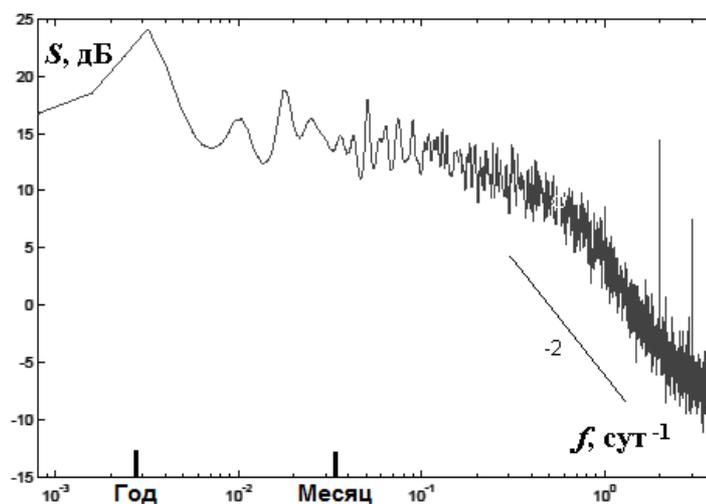


Рис. 1. Поле средней скорости ветра за весь период 1998–2009 гг., м/с (штриховыми линиями указаны границы выбранных зон Z1–Z6 районирования ИО, жирными точками обозначены «центральные» точки зон)

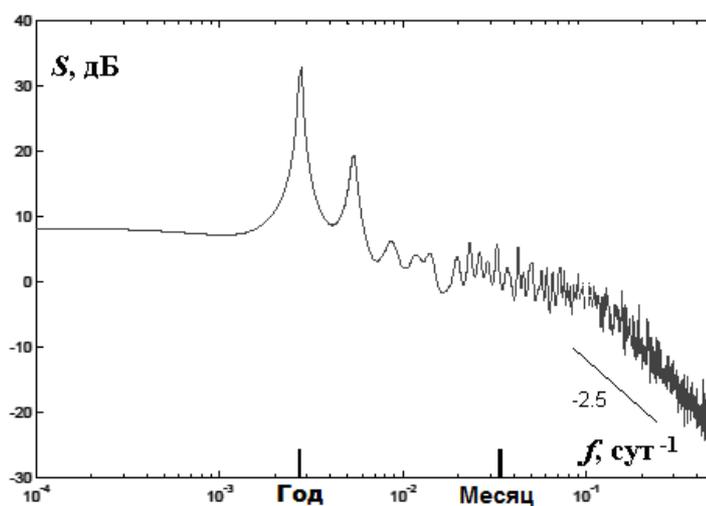
В спектрах «мгновенных» рядов (с шагом 3 ч) зарегистрированы следующие масштабы изменчивости (как скорости ветра, так и ППЭВ): 1 год, 0,5 года, 100 дней, 60 дней, 40 дней, 1 сутки, 0,5 суток, 0,3 суток. Начиная с синоптических масштабов (10 суток и менее), спектры скорости ветра и ППЭВ имеют степенные законы спадания с показателями степени от $-5/3$ до $-2,5$ (рис. 2а,б).



а



б



в

Рис. 2. Временные спектры скорости ветра: трёхчасовых рядов в «центральных» точках зон Z1 (а) и Z6 (б) и осредненного за одни сутки и по всей акватории ИО (в)

В спектрах среднесуточных величин скорости ветра и энергии, осредненных по зонам и всему океану, хорошо выделены только масштабы 1 год и 0,5 года (рис. 2в). Кроме того, наблюдаются также масштабы синоптической изменчивости (5–8) суток, которые проявляются на фоне степенного спадания высокочастотной части спектра. Именно эти масштабы ответственны за визуально наблюдаемую значительную синоптическую изменчивость энергетики ветра.

Для осредненных по зонам и океану рядов величин ППЭВ, между масштабами максимальной изменчивости (1 год и 0,5 года) и малыми масштабам турбулентной природы, спектр имеет участок типа белого шума («полка»), начинающийся от масштабов 100 суток и заканчивающийся масштабами 10-3 суток. Наличие «полки» в спектре свидетельствует об отсутствии заметной связи движений по масштабам в указанном диапазоне. В то же время, динамика процессов на более мелких масштабах (турбулентный перенос энергии по каскаду масштабов) во всех зонах аналогична, что и приводит к сохранению на этих масштабах степенных спадающих спектров при любых вариантах осреднения полей.

Впервые получены оценки энергозапаса поля ветра и его изменчивости как по зонам, так и всему ИО. Показано, что на отрезке времени 1998–2009 гг. имеет место достоверный положительный тренд средней по всему океану ППЭВ порядка 1% в год. В виду сравнительно небольшой величины периода анализа (12 лет), полученные результаты носят предварительный характер. Тем не менее, они придают изучению многолетней изменчивости динамики атмосферы дополнительный научный интерес.

В третьей главе описана используемая в работе модель ветрового волнения, дано её физическое содержание и результаты её верификации на основе сравнения с буйковыми данными.

В простейшем случае глубокой воды и пренебрежения влиянием течений современная численная модель ветрового волнения описывается уравнением пространственно-временной эволюции двумерного (частотно-углового) энергетического спектра волн $S(\sigma, \theta, \mathbf{x}, t) \equiv S$ вида

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_{gx} \frac{\partial S}{\partial x} + C_{gy} \frac{\partial S}{\partial y} = F \equiv NL + IN - DIS, \quad (6)$$

где слева стоит полная производная спектра по времени, C_{gx} и C_{gy} – компоненты групповой скорости волн, а правая часть есть т. н. функция источника модели ветровых волн F . Общепринято, что функция источника F состоит из трех слагаемых, являющихся составными частями общего механизма эволюции ветровых волн:

- нелинейный механизм передачи энергии по спектру NL ,
- механизм энергоснабжения волн ветром IN (накачка)
- механизм потерь энергии волн DIS (диссипация).

Физический смысл каждого из слагаемых функции источника хорошо известен. Поэтому в диссертации детали этого вопроса не рассматриваются.

Таблица 1.

Координаты буев и среднеквадратичные ошибки δH_s модельных расчетов высот волн H_s для двух вариантов модели WAM и для 3 буев в ИО

Индекс буя [координаты]	$\delta H_s, \text{ м}$	
	WAM	NewWAM
DS1 [15,5N; 69,3E]	0,75	0,47
DS2 [10,7N; 72,5E]	0,40	0,29
SW3 [15,4N; 73,7E]	0,45	0,28
Средняя ошибка	0,53	0,35

В работе используется численная модель ветрового волнения WAM (cycle 4), в которой с целью повышения ее быстродействия и точности расчета высот волн изменена функция источника. В итоге удается получить существенное (на 35%) ускорение счета полей волнения и заметное снижение ошибки расчета высот волн (на 10%) по сравнению с прототипом (модель WAM). Причина ускорения счета в модифицированной численной модели обусловлена упрощением расчётных процедур для нелинейного механизма

эволюции волн, а повышение точности – более совершенным представлением физики потерь энергии ветровых волн. Полученная таким образом новая версия модели, которая имеет преимущества перед прототипом, была взята для выполнения всех численных расчётов. В таблице 1 приведены результаты верификации модифицированной версии модели.

Четвертая глава посвящена пространственно-временной изменчивости поля волнения.

Наиболее важные результаты анализа изменчивости поля ветровых волн в ИО заключаются в следующем.

1. Показано, что в общих чертах районирование поля волн на акватории ИО может быть привязано к принятому ранее районированию для поля ветра. На этом основании анализ масштабов изменчивости волнения проводится по отдельности для каждой из зон (рис. 1), а ежегодные средние по всему океану величины анализируются лишь в порядке определения 12-летней изменчивости поля волн (многолетние тренды высот волн и их энергии, средних по всему ИО). При этом статистики значительно более достоверны при их построении для каждой зоны отдельно.

2. Спектральный анализ рядов волнения, полученных для различных масштабов пространственного осреднения (отдельные точки, зоны, весь океан), показывает, что главным масштабом изменчивости является период в 1 год. На его фоне присутствует изменчивость с периодами 0,5 года, и ряд масштабов в диапазоне 40-10 суток. При этом период 0,5 года характерен только северных зон Z1–Z3 (рис. 1).

Для южных зон Z4–Z6 установлена слабая изменчивость интенсивности спектров в диапазоне периодов от 100 до 10 суток. Эта особенность формы спектров высот волн повторяет аналогичную особенность спектров скорости ветра, что позволяет (по аналогии) трактовать ее как проявление отсутствия корреляция в изменчивости волновых полей в данном диапазоне масштабов. Отметим, что этот результат не имеет аналогов.

В области периодов, меньших 10 суток, для всех масштабов осреднения поля волн, наблюдается степенное спадание спектра вида $S(f) \propto f^{-n}$. Для рядов

высот волн параметр спада $n = -(3-4)$, а для спектров энергии волн $n = -(4-5)$. Трактовка этих результатов требует дальнейших теоретических исследований.

3. На основе расчётов получены оценки сезонной, межгодовой и 12-летней изменчивости полей высот и энергии волн. Впервые установлено, что на отрезке времени 1998–2009 гг. имеет место положительный тренд средней по всему океану высоты волн порядка 1%, а энергии волн порядка 2% в год. Этот результат хорошо коррелирует с установленной ранее величиной тренда среднего ППЭВ в 1% в год (глава 2).

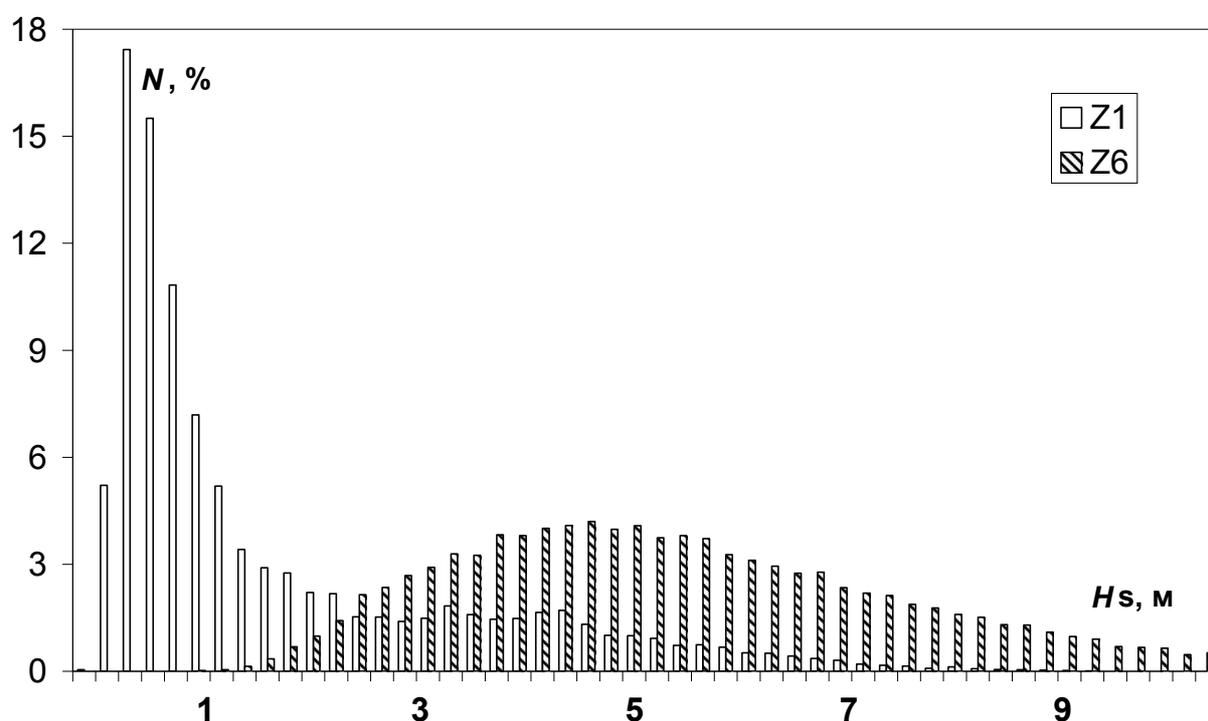


Рис. 3. Гистограммы распределения значительной высоты волн H_s в «центральных» точках зон Z1 и Z6.

Пятая глава посвящена исследованию переноса механической энергии (ПЭМ) из атмосферы в океан.

Анализ пространственно-временной изменчивости поля ПЭМ из атмосферы в океан выполнен на основе отдельного вычисления слагаемых функции источника модели ветровых волн для акватории ИО за период 1998–2009 гг. Поле ПЭМ описывается двумя интегральными величинами, рассчитанными на единицу площади: скоростью полного притока энергии от

ветра к волнам $I_E(\mathbf{x}, t)$ и скоростью потерь энергии ветровых волн $D_E(\mathbf{x}, t)$. Для решения данной задачи использовалось описанное выше поле ветра (глава 2), а поля $I_E(\mathbf{x}, t)$ и $D_E(\mathbf{x}, t)$ были рассчитаны путем использования модифицированной численной модели WAM (глава 3).

Анализ поля ПЭМ включает: построение карт полей $I_E(\mathbf{x}, t)$ и $D_E(\mathbf{x}, t)$, рассчитанных с различными масштабами пространственно-временного осреднения, и следующее из них районирование ИО по зонам; определение экстремальных и средних значений ПЭМ; определение сезонной, межгодовой и 12-летней изменчивости; оценку 12-летнего тренда интегральных величин ПЭМ.

Наиболее важные результаты пятой главы состоят в следующем.

1. На основе карт полей накачки волн ветром и полей диссипации энергии ветровых волн, полученных с различными масштабами временного осреднения, показано соответствие зонной структуры этих полей структуре исходного поля ветра (глава 2). В частности, в южной части ИО даже средние по зоне величины $I_E(\mathbf{x})$ и $D_E(\mathbf{x})$ имеют значения порядка 1 Вт/м^2 , что более чем вдвое превышает оценки, полученные другими авторами. Кроме того, установлены области преимущественно положительного и отрицательного баланса ПЭМ.

2. Получены величины экстремумов I_E и D_E (рис. 4). Показано, что в отдельные моменты они могут достигать значений порядка 60 Вт/м^2 , с величиной баланса B_E порядка 3 Вт/м^2 . Эти величины получены впервые и важны как референтные для последующего их сравнения с оценками для других районов Мирового океана и для больших временных масштабов долговременной эволюции полей ветра и волнения в ИО.

3. Для относительной величины скорости накачки волн ветром, задаваемой отношением I_E/E_A , определены средние значения по зонам ИО и установлен диапазон ее изменчивости. Показано, что I_E/E_A растет с ростом энергии ветра E_A , а в южной части ИО эта величина может достигать значений порядка 0,001, что вдвое выше оценки, полученной другими авторами. Причина столь

заметного различия заключается в учете раздельного учёта слагаемых I_E и D_E , отсутствующем в более ранних работах.

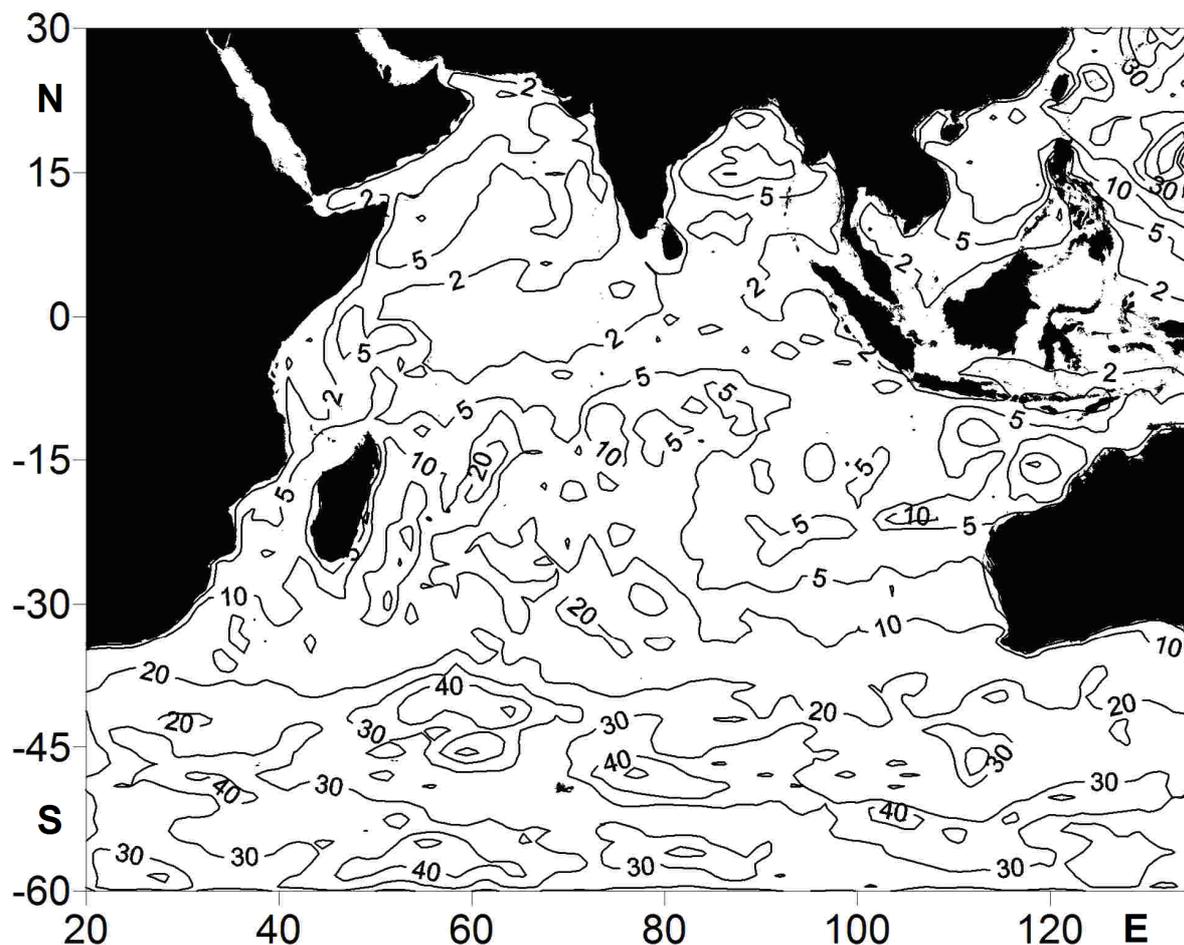


Рис. 4. Абсолютные экстремумы диссипации энергии волн $D_{E_{\max}}(i, j)$ за 12 лет, $Вт/м^2$.

4. Получены оценки величин E_W/B_E и E_W/I_E , характеризующие соответственно максимальное и минимальное время, за которое энергия волн в выбранной части океана может полностью измениться. Характерные величины E_W/I_E составляют несколько часов, что соответствует оценкам в [5], в то время как оценки E_W/B_E варьируют от нескольких до десятков суток.

5. Показано, что на рассмотренных масштабах времени (12 лет) средние как по зонам ИО, так и по всему ИО величины I_E и D_E имеют положительный тренд порядка 2% в год, близкий по величине к положительному тренду энергии волнения E_W и почти в два раза превышающий положительный тренд

энергии ветра E_A , установленные ранее в [6]. На этом основании делается вывод об определяющей роли состояния волнения в оценке скорости ПЭМ из атмосферы в океан.

В **заключении** приводится развёрнутое изложение результатов диссертационной работы, выносимых на защиту.

Основные публикации

1. Г. С. Голицын, В. Г. Полников, Ф. А. Погарский. Численные оценки переноса механической энергии из атмосферы в Индийский океан // ДАН, 2012, том 446, № 2. С. 216-221.

2. Ф. А. Погарский, В. Г. Полников, С. А. Саннасираджд. Совместный анализ изменчивости полей ветра и волнения на акватории Индийского океана за период 1998–2009 гг. // Изв. РАН, ФАО, 2012, том 48, № 6. С. 714-732.

3. Ф. А. Погарский, В. Г. Полников. Изменчивость ветра и волнения по данным буйковых измерений и численного моделирования в Индийском океане // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. — М.: МАКС Пресс, 2013. №19. С. 390-401.

4. Полников В. Г., Погарский Ф. А., Голицын Г. С. Пространственно-временная изменчивость поля переноса механической энергии из атмосферы в Индийский океан // Изв. РАН, ФАО, Т.49, №5. С. 601-614.

5. Polnikov V.G., Pogarskii F, Sannasiraj S.A. Statistical Features of the Wind Field over the Indian Ocean for the period 1998-2008. www.ArXiv.org. 2011. arXiv: 1109.5073.

6. Polnikov V.G., Pogarskii F, Sannasiraj S.A. Modeling and Analysis of the Wind-Waves Field Variability in the Indian Ocean During 1998-2009 Years. www.ArXiv.org. 2011. arXiv:1109.6542.

7. Vladislav G. Polnikov, Fedor A. Pogarskii. Short-Term Variability of Wind and Waves, Based on Buoy Measurements and Numerical Simulations in the Hindustan Area // Marine Science, 2013; 3(2): 48-53. doi:10.5923/j.ms.20130302.02.