



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему «Зависимость двухдневной волны от фазы квазидвухлетних  
колебаний»

Исполнитель Балалин Максим Алексеевич ПМ-Б17-1-3

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико - математических наук,

(ученая степень, ученое звание)

доцент Ермакова Татьяна Сергеевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«6» июня 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

## Содержание

Введение.....	3
1. Общая информация.....	5
1.1 Волны в атмосфере .....	5
1.2 Планетарная волна.....	6
1.3 Квази-двухлетние колебания.....	8
2. Используемые данные и методики.....	14
2.1 Японский реанализ JRA-55 .....	14
2.2 Вейвлет-анализ.....	16
3. Полученные результаты .....	21
3.1 Результаты полученные для 1 фазы КДК.....	21
3.2 Результаты полученные для 2 фазы КДК.....	31
3.3 Результаты полученные для 3 фазы КДК.....	40
3.4 Результаты полученные для 4 фазы КДК.....	49
Заключение .....	59
Список литературы .....	60

## Введение

Стратосфера и тропосфера – это взаимосвязанная система, поэтому любые изменения динамических, химических и радиационных процессов в стратосфере могут повлиять на состав тропосферы и климат. Возмущения тропосферы, в свою очередь, вызывают изменения в составе стратосферы и циркуляции, которые влияют на погоду и климат в тропосфере. Лучшее понимание влияния стратосферных химических, радиационных и динамических процессов на тропосферный климат и его изменение необходимо для выполнения задач, связанных с прогнозированием изменений климата в будущем. Изучение изменчивости динамических процессов в стратосфере является важной фундаментальной задачей физики атмосферы. Одним из основных объектов исследования служат волны планетарного масштаба. В результате диссипации волны могут пространственно перераспределять импульс и энергию тем самым воздействуя на тепловой баланс и циркуляцию атмосферы. Планетарные волны (ПВ) в средней атмосфере могут сильно взаимодействовать со средним зональным ветром и меридиональной циркуляцией, таким образом, играя ключевую роль в тепловом балансе, балансе импульса и химического состава атмосферы.

Не так много волн планетарного масштаба с большими амплитудами на высотах средней атмосферы, которые наблюдаются из года в год и имеют регулярную сезонную изменчивость. Прежде всего вспоминают про атмосферные приливы и во вторую очередь – про квази-двухдневную волну. Существуют данные наземных наблюдений, свидетельствующие о том, что ПВ модулируют атмосферные приливы и что взаимодействие между планетарными волнами и приливами может быть основным источником приливной изменчивости в верхних слоях атмосферы.

Целью данной работы было исследование зависимости двухдневной волны от фазы квази-двухлетних колебаний (КДК).

Для достижения цели выпускной квалификационной работы были поставлены и решены следующие задачи:

1) Выбор данных японского реанализа JRA-55 для лет в условиях 4 различных фаз КДК (западной и восточной и двух переходных фаз).

2) Получение 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны на 6 заданных широтах ( $22.5^\circ$  ю.ш.;  $12.5^\circ$  ю.ш.;  $2.5^\circ$  ю.ш.;  $2.5^\circ$  с.ш.;  $12.5^\circ$  с.ш.;  $22.5^\circ$  с.ш.).

3) Графическое представление полученных распределений амплитуд двухдневной волны с использованием вейвлет-анализа полученных гармоник.

4) Анализ полученных результатов.

## 1. Общая информация

### 1.1 Волны в атмосфере

Волны в атмосфере — это распространяющиеся в атмосфере Земли колебания воздуха. Различают собственные колебания атмосферы и волновые движения, возникающие под действием внешних сил. В зависимости от физической природы этих сил выделяют три основных класса волн в атмосфере: акустические (звуковые) волны, гравитационные волны, планетарные волны [1].

Акустические (звуковые) волны – это возмущения упругой материальной среды. Под возмущением подразумевается локальное отклонение давления и плотности от равновесных значений. Период акустических волн не превышает 300 м/с, а скорость распространения колеблется около 300 м/с [2].

Гравитационные волны – это волны, которые возникают в результате изменения плотности воздуха с высотой, когда в условиях устойчивой температурной стратификации атмосферы на элементарный объем воздуха действует возвращающая сила. Скорость распространения таких волн изменяется от десятков до сотен метров в секунду, длина достигает нескольких десятков километров и более. В нижней атмосфере амплитуда гравитационных волн невелика, однако в верхних слоях атмосферы она растет вместе по мере уменьшения плотности воздуха.

Планетарная волна — это крупномасштабное возмущение атмосферной циркуляции, которое когерентно распространяется на полный долготный круг. Возмущения имеют волнообразную форму в продольном и вертикальном направлениях, а часто и в широтном направлении. Эти крупномасштабные волны являются доминирующей частью пространственной и временной изменчивости стратосферы, а также вносят свой вклад на больших высотах в мезосфере. Наиболее важными являются квазистационарные волны Россби на средних широтах, которые распространяются вверх от тропосферы и яв-

ляются повсеместными, но весьма изменчивыми в средней атмосфере зимой. Они важны, потому что они оказывают значительное влияние на скорость ветра, температуру ветра, распределение озона и другие характеристики средней атмосферы. Другие планетарные волны, которые также важны — это глобальные бегущие моды, известные как нормальные моды, и класс волн, ограниченных экваториальной областью.

## 1.2 Планетарная волна

Так как тема моей выпускной квалификационной работы на прямую связана с планетарными волнами в этой подглаве более подробно представлена информация о планетарных волнах.

Планетарные волны (ПВ) – распространённые атмосферные волны, главным образом зависящие от неравномерного нагрева атмосферы и асимметрии рельефа. Основные периоды планетарных волн – квази-двухдневные, квази-пятидневные, квази-десятидневные, квази-шестнадцатидневные. Наиболее заметной составляющей в мезосфере и нижней термосфере является квази-двухдневная волна (КДВ), способная влиять на горизонтальный ветер и температуру в средних слоях атмосферы. Амплитуды температуры и ветра КДВ могут достигать 12 К и  $60 \text{ мс}^{-1}$ . Следы КДВ также могут быть обнаружены в атмосферной  $\text{H}_2\text{O}$ , монооксиде углерода, выбросах ОН и высоте слоя F2. Кроме того, обнаружено, что КДВ играют важную роль в фотохимических процессах в области мезопаузы. Многие исследования предполагают, что КДВ могут часто взаимодействовать с солнечными потоками, другими ПВ и гравитационными волнами. Было доказано, что взаимодействие между КДВ и мигрирующими приливами является одним из основных механизмов генерации немигрирующих потоков. Когда происходит внезапное стратосферное потепление, под влиянием этого изменяется фоновый зональный ветер и образуется КДВ как в тропической, так и во внетропической областях. Недавние исследования говорят, что КДВ могут быть смоделированы низко-

частотными колебаниями атмосферы, такими как квази-двухлетние колебания в экваториальном зональном ветре и солнечной активностью, и дают межгодовые изменения КДВ. Все эти исследования показали, что КДВ имеют тесные связи со многими динамическими процессами в средней и верхней атмосфере. Поэтому необходимы интенсивные исследования характеристик КДВ.

Основные характеристики КДВ были выявлены в ходе наземных наблюдений за последние десятилетия. КДВ — это явление переходной и неустойчивой волны. Обычно они происходят после летнего солнцестояния в средней и верхней атмосфере и продолжаются в течение нескольких недель, около 13-15 волновых периодов. Летом в Северном полушарии они совершают серию всплесков, разделенных на 5-8 дней. Их пиковые амплитуды часто происходят на 70 км, и также они существуют в нижних слоях атмосферы на низких широтах. Вертикальная протяженность волн варьируется от 40 до 110 км. В Южном полушарии их периоды и волновые числа около 48 часов и -3 (минус означает распространение на запад) соответственно, в то время как в Северном полушарии периоды составляют 53–56, 48–50 и 42–43 часов с соответствующими волновыми числами -2, -3 и -4. Кроме того, многочисленные наблюдения подтвердили нелинейные взаимодействия между КДВ и другими ПВ, что может частично объяснить краткосрочные изменения в КДВ. Однако фоновые атмосферные поля ветра могут также влиять на ежедневные изменения КДВ. Кроме того, было установлено, что солнечная активность может повлиять на межгодовые колебания КДВ. Во время максимума солнечной активности амплитуды КДВ больше в высоких широтах Северного полушария.

Хотя были достигнуты большие успехи, по-прежнему сложно всесторонне понять глобальное распространение КДВ основываясь только на наблюдениях с земли, которые, как правило, географически разбросаны. Спутники могут отслеживать всё глобальное поле ветра, температурный и атмосферный состав от верхней тропосферы до нижней термосферы. Напри-

мер, Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) может измерять более низкую температуру атмосферы; Upper Atmospheric Research Satellite/High Resolution Doppler Imager (UARS/HRDI) измеряет температуру, зональный и меридиональный ветер, водяной пар и концентрацию озона в средней и верхней атмосфере; Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics/Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (TIMED/SABER) используется для измерения температуры в верхних слоях атмосферы и при прямой видимости ветер может быть исследован микроволновым эхолотом установленном на спутнике Aura. Спутниковые наблюдения вносят значительный вклад в наши знания о глобальной морфологии КДВ. Явные КДВ часто возникают в средней и верхней атмосфере на средних широтах после летнего солнцестояния, и амплитуды их вдвое больше в Южном полушарии, чем в Северном полушарии. Также с КДВ могут быть связаны некоторые динамические процессы. КДВ в летнем полушарии могут быть связаны с распространением ПВ в зимнем полушарии. Более того, нелинейные взаимодействия между КДВ и другими волнами, вероятно, могут привести к краткосрочным колебаниям КДВ. Кроме того, модуляция долгосрочной динамики, например КДК, на КДВ может привести к их межгодовым колебаниям [3].

### 1.3 Квази-двухлетние колебания

Квази-двухлетние колебания экваториальной нижней и средней стратосферы представляют собой довольно регулярный 2-3-летний цикл, характеризующийся чередованием нисходящих режимов восточного (распространяется на запад) и западного (распространяется на восток) зонального ветра (Рис. 1). КДК зонального ветра сопровождают аномалии температуры, следовых составляющих и средней меридиональной циркуляции [4].

Известно, что КДК влияет на глобальную атмосферную циркуляцию в тропосфере и стратосфере. КДК модулирует планетарные волны, тем самым



оказывая влияние на циркуляцию средних широт, воздействует на процессы генерации и общую циркуляцию озона и других примесей в атмосфере, а также взаимодействует с таким важным для системы океан—атмосфера явлением как Эль-Ниньо / Южное Колебание [5].

Наступление новых западных режимов КДК в средней стратосфере связано с нисходящими западными фазами полугодовых колебаний стратосферы.

Не все фазы полугодовых колебаний инициируют новую фазу КДК, очевидно, поскольку период КДК в 4–6 раз больше периода полугодовых колебаний. Новые фазы КДК наверху обычно ждут, пока старые фазы того же знака распадутся в нижней стратосфере и исчезнут. Ниже 30 гПа сезонный цикл модулирует окончательный спуск старых фаз КДК. Этот сезонный эффект отличается от эффекта полугодовых колебаний и, вероятно, вызван годовыми циклами апвеллинга и волновых потоков, входящих в стратосферу снизу.

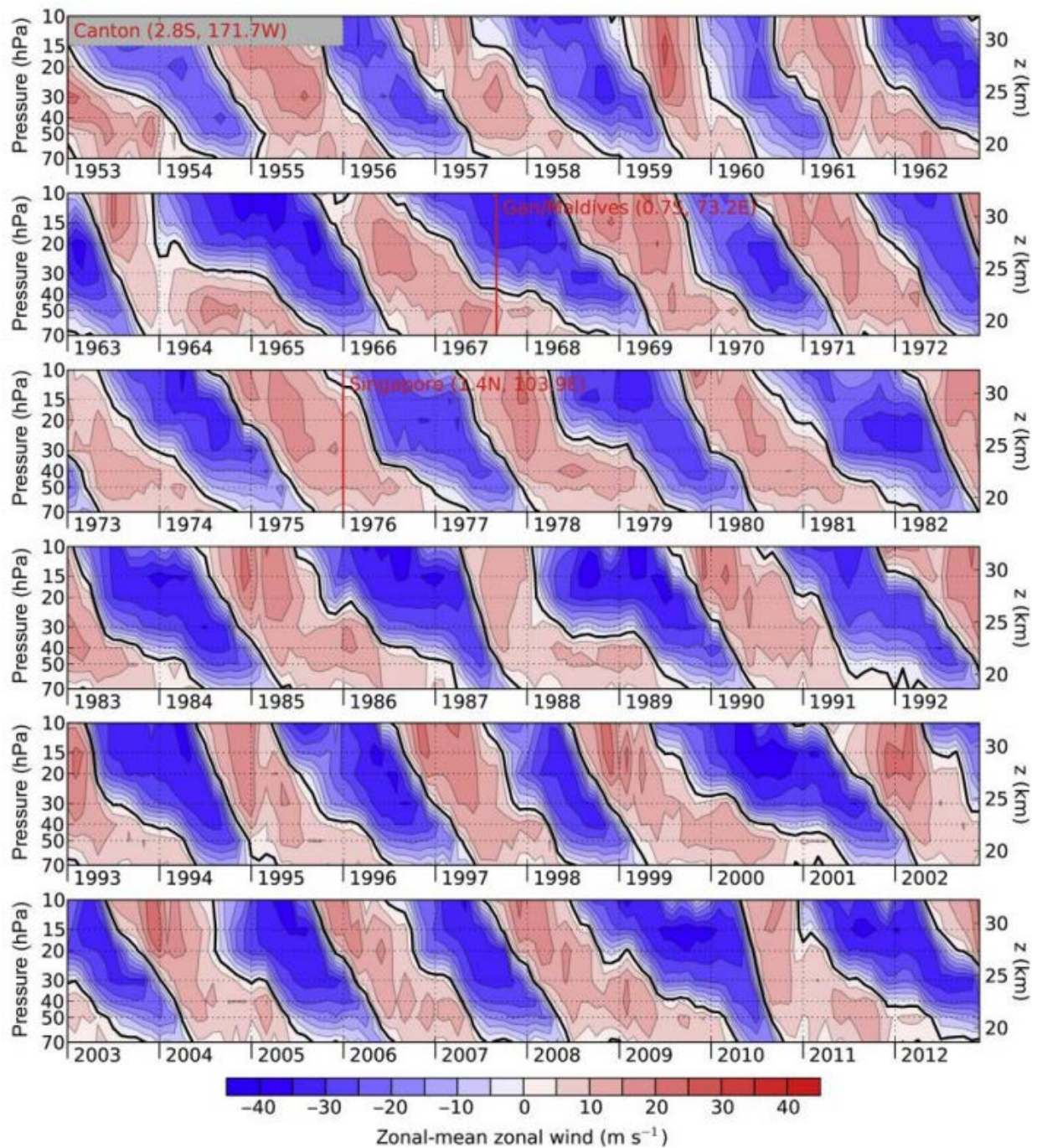


Рис. 1 Высотно – временной разрез среднемесячного зонального ветра вблизи экватора. Интервал изолиний  $5 \text{ m s}^{-1}$ , западные – красные, восточные – синие. Правая вертикальная ось показывает высоту в км. Левая вертикальная ось показывает давление в гПа. Горизонтальная ось показывает года наблюдений.

Период КДК не связан с каким-либо известным периодическим воздействием и поэтому его трудно понять, но мы не должны упускать из виду регулярный характер колебаний. Предсказуемость КДК замечательна, учитывая, что волновые движения, ответственные за КДК, занимают широкий спектр пространственных и временных масштабов, являются эпизодическими, сложными и непредсказуемыми по своей природе. Колебания наблюдаются с помощью регулярных радиозондов уже более полувека (26 полных циклов) с довольно постоянной амплитудой и, по всей видимости, являются постоянной особенностью тропической стратосферы.

КДК зонального ветра непосредственно связаны с аналогичными колебаниями температуры тропической стратосферы. КДК тропической температуры являются результатом баланса между термическим ветром и вертикальным сдвигом зонального ветра.

Прослеживается хорошая корреляция между КДК вертикального сдвига зонального ветра и колебаниями отклонений экваториальной температуры. Небольшие отклонения экваториальной температуры, наблюдаемые около тропопаузы, простираются вниз с вариациями амплитуды температуры около  $\pm 0,5$  К. КДК отклонений температуры проникают в среднюю и верхнюю стратосферу, где они находятся в противофазе с такими же отклонениями температуры в нижней стратосфере.

На рис. 2 приведен пример отклонений температуры по широте, связанных с восточной фазой КДК зонального ветра в течение зимы 1994 г., данные наблюдения на высотах до 45 км.

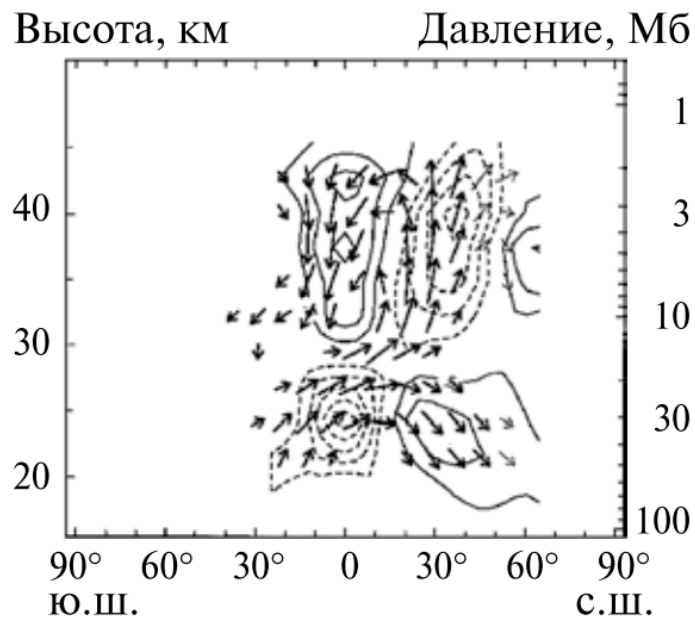


Рис. 2 Отклонения температуры и скорость остаточной средней циркуляции; изолинии отрицательных отклонений температуры показаны пунктирными линиями, положительных — сплошными, изолинии проведены через 0,5 К, скорость показана стрелками. Правая вертикальная ось показывает давление в Мб. Левая вертикальная ось показывает высоту в км. На горизонтальной оси отложены широты.

Хотя данные наблюдений недооценивают величину КДК температуры, на рисунке видна сдвинутая по фазе вертикальная структура — характерная особенность, которая также наблюдалась в данных спутниковых наблюдений за долгий период времени.

Анализ квази-двухлетней цикличности приповерхностной температуры выявил связь интенсивности КДК и амплитуды годового хода температуры. При этом КДК температуры в целом ослабляются (даже срываются) при глобальном потеплении, сопровождающемся уменьшением в целом амплитуды годового хода приповерхностной температуры. Подобная тенденция достаточно четко проявляется при сравнении температурных спектров для многолетних подпериодов в течение последнего столетия с различными средними температурными режимами и относительно слабыми трендами (с большой квазистационарностью режимов). Выявлено, что КДК температуры тропосферы (стратосферы) в целом ослабляются (усиливаются) при приповерх-

ностном и тропосферном потеплении. Эти тенденции связаны с общей тенденцией уменьшения (увеличения) амплитуды годового хода температуры тропосферы (стратосферы) [6].

## 2. Используемые данные и методики

### 2.1 Японский реанализ JRA-55

Реанализ – это метеорологический и климатический проект ассимиляции данных, который направлен на ассимиляцию исторических данных наблюдений за атмосферой за длительный период с использованием единой последовательной схемы ассимиляции.

Чтобы понять изменение климата и нынешние экстремальные погодные явления, важно, чтобы наблюдения системы Земли производились как можно дальше во времени. Однако наблюдения всегда распределялись неравномерно и сопровождались ошибками. Даже в эпоху спутников одни только наблюдения не могут дать полную и точную картину состояния земной системы на земном шаре в данный момент времени. Реанализ заполняет пробелы в данных наблюдений, и они делают это согласованным во времени способом, тем самым сводя к минимуму любые ложные сигналы изменения.

Японское метеорологическое агентство (JMA) провело второй глобальный атмосферный реанализ, другими словами, Японский 55-летний реанализ (JRA-55). Это первый комплексный реанализ, охватывающий последние полвека с момента 45-летнего реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ERA-40), также в нем впервые применили четырехмерный вариационный анализ (4D-Var) к этому периоду [7].

Автора [8] в 2015 году в первом комплексном отчете по JRA-55 изложили общие спецификации и базовые характеристики этого продукта.

Они описали конфигурацию системы JRA-55, включая источники данных, контроль качества, выбор данных для наблюдений, систему ассимиляции данных (DAS) и модель прогноза. Кроме того, они описали два основных улучшения качества по сравнению с японским 25-летним реанализом

(JRA-25) [9]. Одно из улучшений - уменьшение смещения засухи в бассейне Амазонки, а другое – временная согласованность анализа температуры.

Реанализ широко используется для исследования механизмов климатической системы Земли, изучения предсказуемости и мониторинга климата.

Реанализ внес значительный вклад в исследования явлений синоптического и планетарного масштаба, таких как траектории штормов, колебания Мэддена-Джулиана, Эль-Ниньо - Южное колебание и КДК, а также проверку в воспроизводимости этих явлений в моделях прогнозов.

Постоянное улучшение результатов реанализа имеет решающее значение для продвижения исследований климата и улучшения климатического обслуживания [10].

Качество недавних реанализов заметно улучшилось, поскольку спасение и усреднение прошлых наблюдений и достижений в методах усвоения данных улучшилось. В Японии JRA-25 был проведен совместно Японским метеорологическим агентством (JMA) и Центральным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (CRIEPI).

Его представление о распределении осадков, тропических циклонах и слоисто-кучевых облаках вдоль западного побережья континентов было наилучшим из доступных в то время.

Однако он страдал от таких проблем, как холодная погрешность в нижних слоях стратосферы и сухая погрешность в бассейне Амазонки.

Его период реанализа, который вернулся только до 1979 г., был недостаточным для изучения многомесечной изменчивости и изменения климата.

Он также разделял проблемы, которые являются общими для реанализа, включая изменения качества, которые возникают в результате изменений систем наблюдений, и воспроизводимость потоков между климатическими подсистемами, такими как потоки атмосфера-океан и атмосфера-суша [11].

С момента создания системы ассимиляции данных JRA-25 оперативная система численных прогнозов погоды JMA улучшилась во многих аспектах, включая пересмотр схемы длинноволнового излучения и введение четырех-

мерного вариационного анализа (4D-Var) и коррекции вариационного смещения (VarBC) для спутникового излучения.

Эти улучшения позволили значительно снизить систематические ошибки модели, улучшить динамическую согласованность полей анализа и усовершенствовать обработку спутникового излучения.

Постоянные усилия по улучшению качества прошлого наблюдения включают гомогенизацию наблюдения за температурой радиозондом и обработка данных наблюдений в основных метеорологических спутниковых центрах [12].

Воспользовавшись этими улучшениями, JMA провела второй японский глобальный атмосферный реанализ, получивший название JRA-55.

Как упоминалось в промежуточном отчете, данные охватывают период с 1958 г., когда начались регулярные радиозондовые наблюдения в глобальном масштабе.

JRA-55 — это первый комплексный реанализ, охватывающий последние полвека после 45-летнего реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ERA-40), и первый, кто применил 4D-Var к этому периоду.

Его основные цели заключались в решении проблем, выявленных в ходе предыдущих реанализов, и в создании всеобъемлющего набора атмосферных данных, пригодного для исследований многолетней изменчивости и изменения климата.

## 2.2 Вейвлет-анализ

Теория вэйвлетов (всплесков) появилась сравнительно недавно (несколько десятилетий тому назад); к настоящему времени она завоевала прочные позиции в математике и нашла глубокие приложения в физике, астрономии, медицине, и, конечно, в инженерном деле, поскольку основной результат этой теории — эффективные алгоритмы обработки больших потоков информации. Под эффективностью в данном случае понимают экономное (с



точки зрения экономии ресурсов компьютера: памяти и времени обработки) разложение потока информации на составляющие.

Роль теории вэйвлетов (всплесков) состоит в том, что она дает предметному специалисту достаточно широкий арсенал средств, из которых он может выбрать то средство, которое ему подходит для обработки (для разложения на составляющие) интересующего его потока информации [13,14,15].

Вейвлет-анализ — это новая отрасль математики, широко применяемая в анализе сигналов, обработке изображений, численном анализе и т. д. Название вейвлеты означает маленькие волны (синусоиды, используемые в анализе Фурье, — это «большие волны»), и, вкратце, вейвлет — это колебания, которые быстро затухают.

Теория вейвлетов использовалась в последние десятилетия. Гроссманн и Морле, физик и инженер, впервые ввели слово вейвлет. Вейвлет означает небольшую волну. Итак, вейвлет-анализ — это анализ математической функции (в инженерии это сигнал) с короткими временными функциями с конечной энергией. Затем вейвлет-преобразования разлагают сигнал на набор частот, называемых масштабами, путем проецирования сигнала на элемент набора базисных функций. Эти базисные функции называются вейвлетами, различающимися растяжением и перемещением. В последнее десятилетие многие математики развили свои идеи в области математического мышления и применили эти идеи к прикладной математике, например, к поиску численных решений нескольких видов дифференциальных уравнений, их использованию в обработке сигналов, анализе изображений и многих других областях.

Вейвлеты используются для преобразования данной исследуемой математической функции (сигнала) в другое представление, более удобное для анализа. Это преобразование математической функции (сигнала) называется вейвлет-преобразованием.

В большинстве работ применяются вейвлеты Добеши. Эти вейвлеты ортогональны, достаточно гладкие и имеют компактную опору. Их недоста-

ток в том, что отсутствует явное выражение. Это препятствие очень усложняет дифференцирование и интегрирование этих вейвлетов. Среди семейств вейвлетов, которые определяются аналитическим выражением, особого внимания заслуживают вейвлеты Хаара.

В 1910 году Альфред Хаар ввел понятие вейвлетов. Его первоначальная теория недавно была расширена до самых разных приложений, но в первую очередь она позволяет представлять различные функции комбинацией ступенчатых функций и всплесков на заданной ширине интервала.

Самый старый и, вероятно, самый известный метод для этого - преобразование Фурье, разработанное в 1807 году Джозефом Фурье. Альтернативный метод с некоторыми привлекательными свойствами — это вейвлет-преобразование, впервые упомянутое Альфредом Хааром в 1909 году. С тех пор было выполнено множество исследований вейвлетов и вейвлет-преобразования. Однако функции тригонометрического анализа заменены вейвлет-функцией. Вейвлет — это короткая осциллирующая функция, которая содержит как функцию анализа, так и окно. Информация о времени получается путем сдвига вейвлета по сигналу.

Вейвлет-преобразование было, пожалуй, самой захватывающей разработкой за десятилетие, объединившей исследователей в нескольких различных областях, таких как обработка сигналов, квантовая механика, обработка изображений, коммуникации, информатика и математика - и это лишь некоторые из них.

В методах, основанных на Фурье, поскольку произведения базисных элементов также являются базисными элементами, процедура не вызывает никаких трудностей. Взаимодействие между вейвлетами и уравнением теплопроводности стало возможным благодаря сначала применению вейвлет-разложения к начальному состоянию, а затем исследованию эволюции каждого вейвлет-компонента. Еще один канал, который связывает уравнение теплопроводности и вейвлеты — это их общий вероятностный фон. Явление диффузии тепла тесно связано с гауссовским случайным процессом (через

функцию ядра). Точно так же основное уравнение в теории всплесков, уточняющее уравнение, также допускает вероятностные интерпретации. В результате мы можем рассматривать теплообменники или связанные с ними функции в рамках теории вероятностей.

Эта разреженность, в свою очередь, приводит к ряду полезных приложений, таких как сжатие данных, обнаружение особенностей в изображениях и удаление шума из временных рядов. Один из способов увидеть разницу частотно-временного разрешения между преобразованием Фурье и вейвлет-преобразованием — это посмотреть на покрытие базисной функцией плоскости время-частота.

Преимущество вейвлет-преобразований состоит в том, что окна меняются. Чтобы изолировать разрывы сигнала, хотелось бы иметь несколько очень коротких основных функций. В то же время, чтобы получить подробный частотный анализ, хотелось бы иметь несколько очень коротких базисных функций.

Способ добиться этого - иметь короткие высокочастотные базисные функции и длинные низкочастотные. Эта золотая середина - именно то, что вы получаете с вейвлет-преобразованиями. Следует помнить, что вейвлет-преобразования не имеют единого набора базисных функций, таких как преобразование Фурье, которое использует только функции синуса и косинуса.

Вместо этого вейвлет-преобразования имеют бесконечный набор возможных базисных функций. Таким образом, вейвлет-анализ обеспечивает немедленный доступ к информации, которая может быть скрыта другими частотно-временными методами, такими как анализ Фурье.

Некоторые методы, такие как вейвлет-Галеркина, вейвлет-коллокация, вейвлет Тейлора-Галеркина, были изучены как с теоретической, так и с вычислительной точек зрения. Анализ с несколькими разрешениями дает очень хорошее понимание структуры вейвлетов.

Вейвлет-анализ также является более гибким в том смысле, что можно выбрать конкретный вейвлет, соответствующий типу анализируемой функции.

Сегодня вейвлет — это не только рабочая область в компьютерной визуализации и анимации; они также используются для кодирования базы данных с миллионами отпечатков пальцев. В будущем ученые могут использовать вейвлет-анализ для диагностики рака груди, поиска аномалий сердца, прогнозирования погоды, обработки сигналов, сжатия данных, сглаживания и сжатия изображений, проверки отпечатков пальцев, анализа ДНК, анализа белков, артериального давления, частоты сердечных сокращений и анализа ЭКГ, финансах, описание интернет-трафика, распознавание речи и компьютерная графика [16].

Значимые события в истории развития вейвлетов:

- Джозеф Фурье (1807) разработал метод представления сигнала с помощью ряда коэффициентов, основанных на тригонометрических функциях.
- Альфред Хаар (1909) установил базисную функцию Хаара с компактным носителем (исчезают вне конечного интервала)
- В 1980 году Алекс Гроссманн (физик) и Жан Морле (инженер) разработали метод разложения сигнала на вейвлет-коэффициенты.
- Стефан Маллат (1985) разработал анализ с несколькими разрешениями с использованием вейвлетов.
- Ингрид Добешис (1988) использовала работу Маллата для построения своего собственного семейства вейвлетов.

### 3. Полученные результаты

В данной главе представлены 24 распределения амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для выбранных зим в условиях 4 фаз КДК (западной, восточной и двух переходных) на заданных широтах, а также выводы по ним. Для того, чтобы получить амплитуды двухдневной волны использовались данные японского реанализа JRA – 55. Третья гармоника меридионального ветра была получена с помощью вейвлет-анализа. Графики распределения были получены с использованием интерактивной системы визуализации гидрометеорологических данных GrADS.

Были введены следующие обозначения фаз КДК:

- 1 фаза КДК – переходная фаза КДК, когда направление среднезонального ветра меняется с восточного на западное направление;
- 2 фаза КДК – осредненный зональный ветер преимущественно западного направления;
- 3 фаза КДК – переходная фаза КДК, когда направление среднезонального ветра меняется с западного на восточное направление;
- 4 фаза КДК – осредненный зональный ветер преимущественно восточного направления.

Для анализа поведения двухдневной волны в экваториальной и тропической зонах Северного и Южного полушарий были распределения амплитуд двухдневной волны представлены на следующих широтах: 22.5° ю.ш.; 12.5° ю.ш.; 2.5° ю.ш.; 2.5° с.ш.; 12.5° с.ш. и 22.5° с.ш.

#### 3.1 Результаты полученные для 1 фазы КДК

Ниже представлены распределения амплитуд 3 гармоники меридиональной составляющей ветра для 1 фазы КДК на экваториальных и тропических широтах.

Для первой фазы КДК были отображены 4 зимних периода (декабрь – март): 1989 – 1990; 2003 – 2004; 2005 – 2006 и 2007 – 2008 года.

Для 22.5° ю.ш. (рис. 3) было построено распределение амплитуд только для 2 периодов наблюдения, т.к. не удалось успешно обработать данные для 2003 – 2004 и 2007 – 2008 годов.

Зимой 1989 – 1990 года амплитуда двухдневной волны на 22.5° ю.ш. изменялась в небольших пределах 0 – 0,4 м/с, максимумы наблюдались во второй половине января и марта (рис. 3а). В 2006 значительное изменение амплитуды двухдневной волны наблюдалось во второй половине марта и ее максимальное значение составляло 1,4 (рис. 3б).

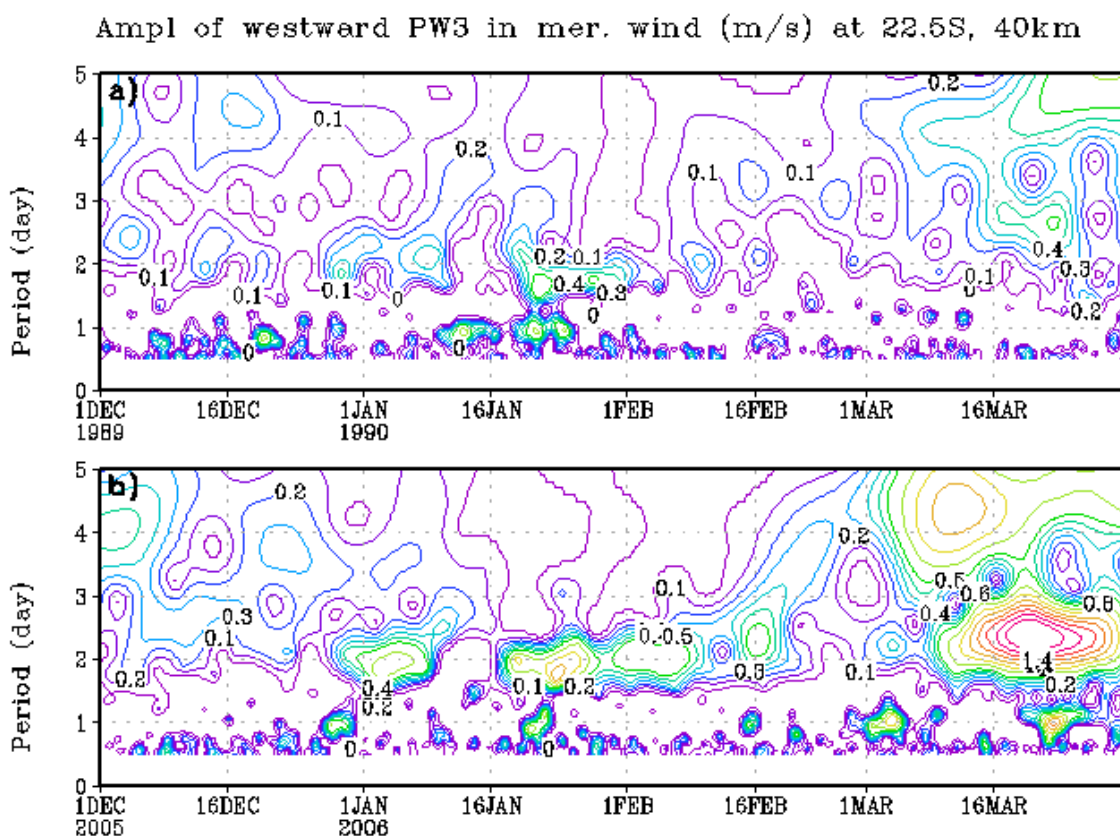


Рис. 3 – на рисунке представлены распределения амплитуд 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 2 зимних периодов: а) 1989-1990 года и б) 2005-2006 года на 22.5° с.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,1. По оси горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной соси – период волны в днях.

На  $12.5^{\circ}$  ю.ш. (рис. 4) самым интересным периодом оказалась зима 2005 – 2006 годов (рис. 4с). Здесь амплитуда двухдневной волны изменялась больше всего. Ее максимальное значение составило более 2,2 м/с во второй половине марта. Следует отметить, что данный год был годом Ла-Нинья, и максимально низкое значение индекса наблюдается в феврале-марте. В остальные же зимы изменение амплитуды двухдневной волны было не столь значительным. Зима 2007 – 2008 также проходила в условиях Ла-Нинья, максимальные амплитуды квази-двухдневной волны наблюдались в январе и феврале, максимальная амплитуда составила 1,4 м/с. Самые слабые амплитуды, не превышающие 0,8 м/с, в январе 1990 года в условиях нейтральной фазы ЭНЮК. Аналогично зимой 2003 – 2004 г.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5S, 40km

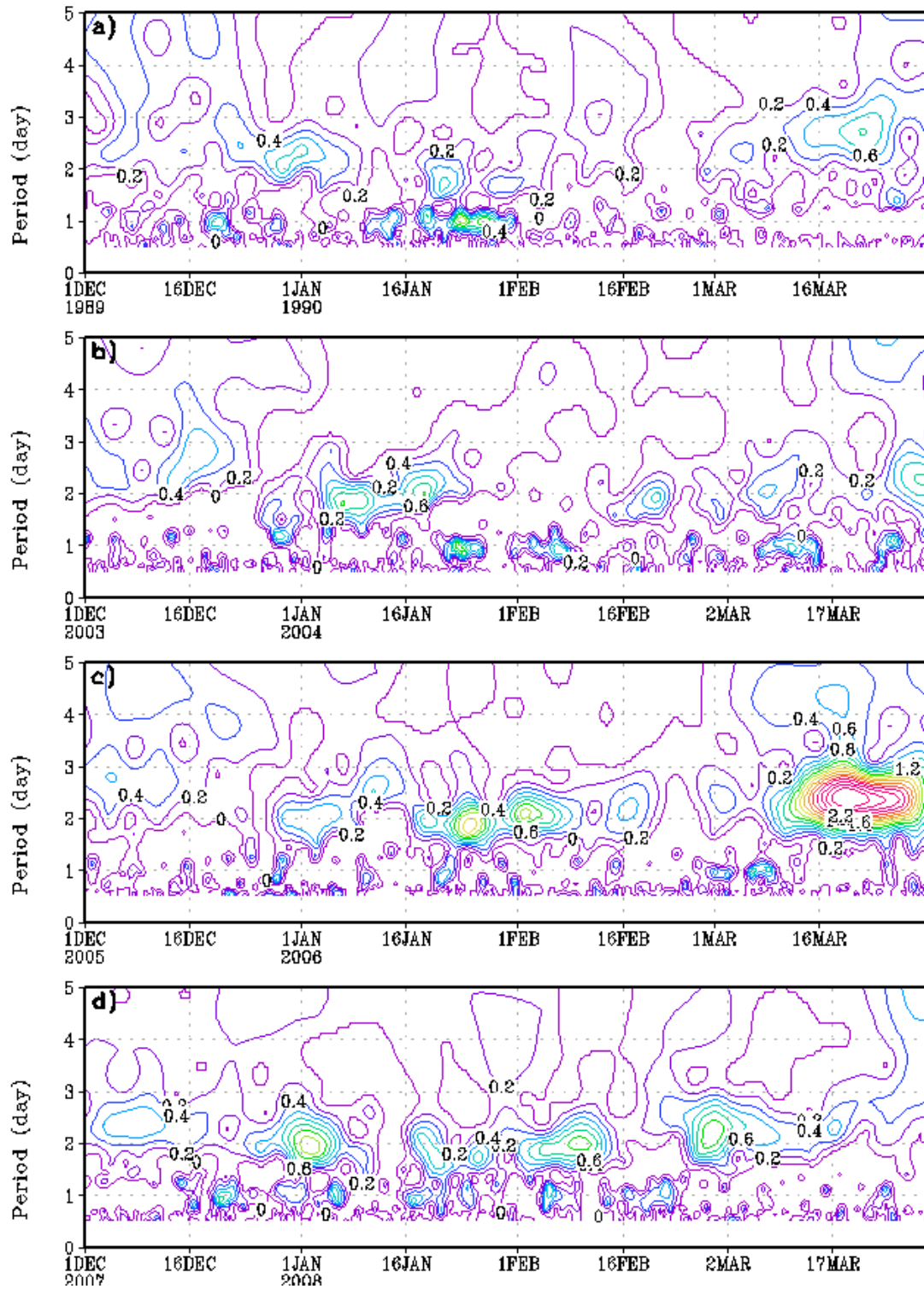


Рис. 4 – на рисунке представлены распределения амплитуд 3 гармонике меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 4 зимних периодов: а) 1989- 1990 года; б) 2003-2004 года; в) 2005-2006 года и д) 2007-2008 года на 12.5° ю.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,2. По горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной оси – период волны в днях.



На  $2.5^{\circ}$  ю.ш. (рис. 5) самое сильное изменение амплитуды двухдневной волны наблюдалось в зимний период 2005 – 2006 годов (рис. 5с). Здесь во второй половине марта значение амплитуды двухдневной волны составило более 2,7 м/с. Наименьшая активность наблюдалась зимой 1989 – 1990 годов (рис. 5а). Следует отметить, что зимой 2007 – 2008 г. максимальные амплитуды наблюдались и в январе, и в феврале и даже в начале марта, с максимумами до 2,7 м/с.

На  $2.5^{\circ}$  с.ш. (рис. 6) наименее активное изменение амплитуды двухдневной волны наблюдалось зимой 1989-1990 годов (рис.6а). Наибольшее значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось во второй половине марта 2006 года (рис. 6с), и оно составило 2,4 м/с. Также большое значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось в конце февраля – начале марта 2008 года и оно составляло 1,8 м/с (рис. 6с).

На  $12.5^{\circ}$  с.ш. (рис. 7) наиболее активным периодом оказалась зима 2007 – 2008 годов (рис. 7с). Здесь амплитуда двухдневной волны изменялась во время большей части наблюдений. Среднее значение амплитуды двухдневной волны в этот период составляло 2,4-2,7 м/с. Наибольшее значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось во второй половине января 2006 года (рис. 7b). Данные за зиму 1989 – 1990 получить не удалось.

Ampl of westward PWS in mer. wind (m/s) at 2.5S, 40km

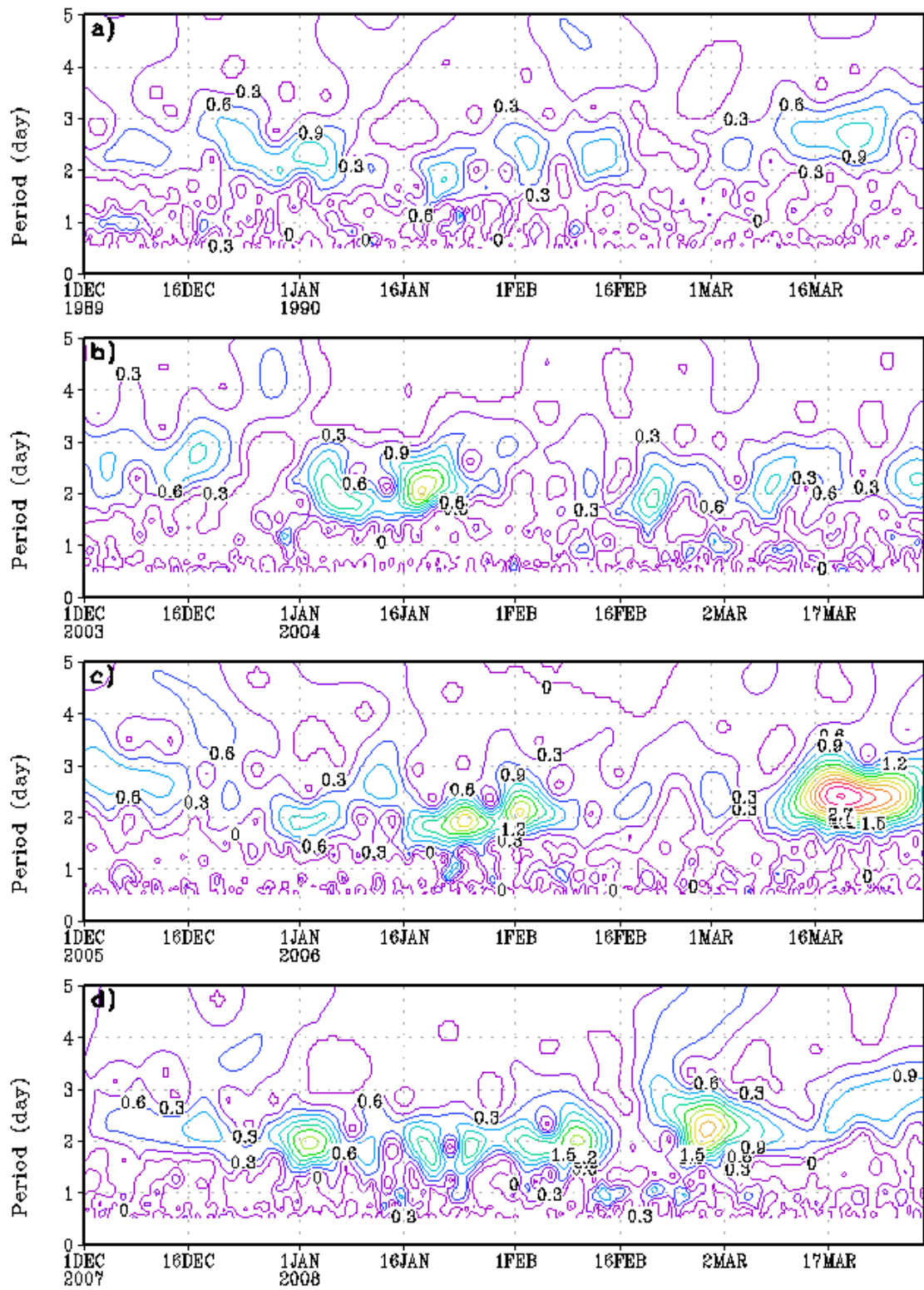


Рис. 5 – аналогично рисунку 4, но на 2.5° ю.ш. и изолинии проведены через 0,3

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5N, 40km

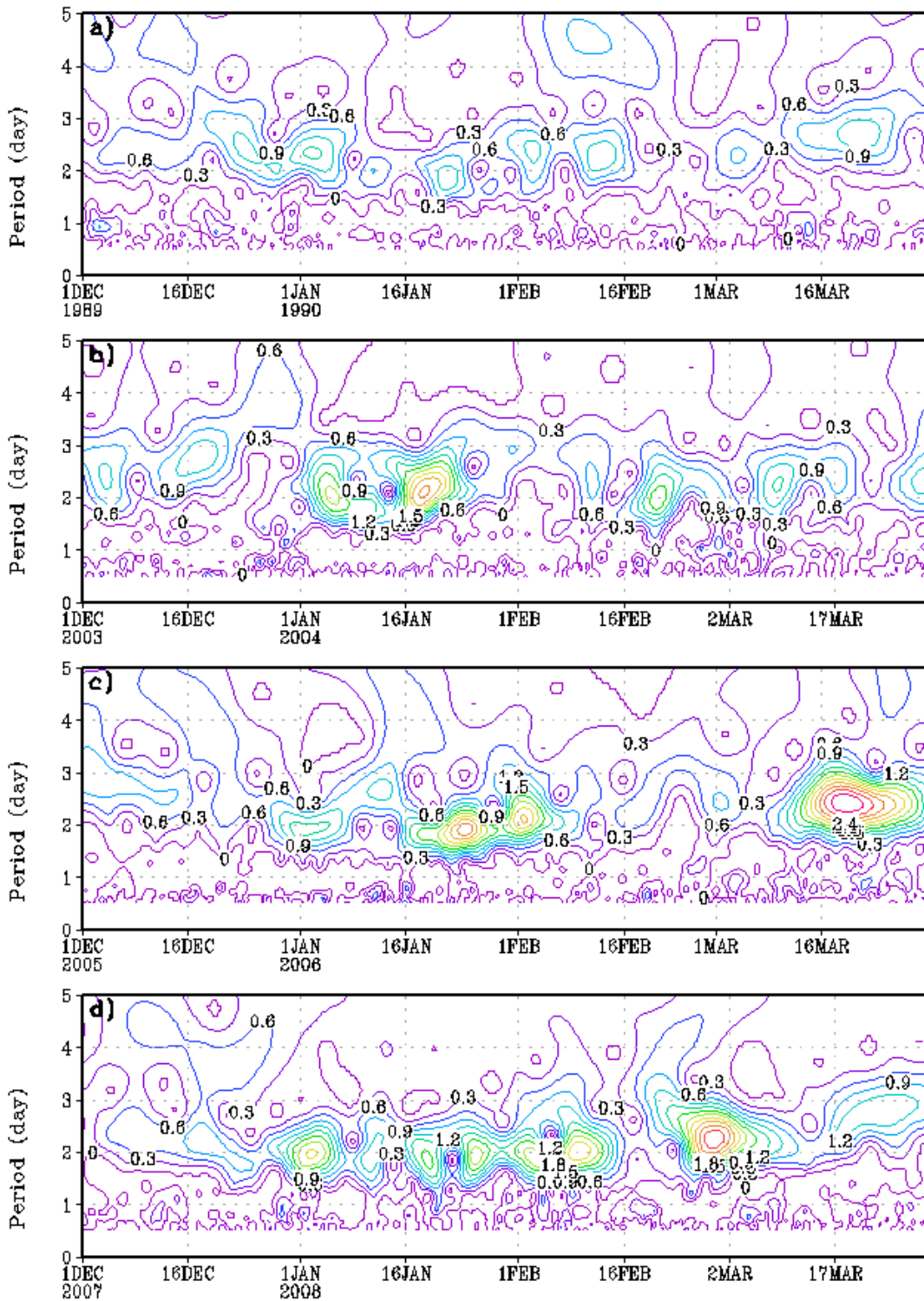


Рис. 6 – аналогично рисунку 5, но на 2.5° с.ш.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5N, 40km

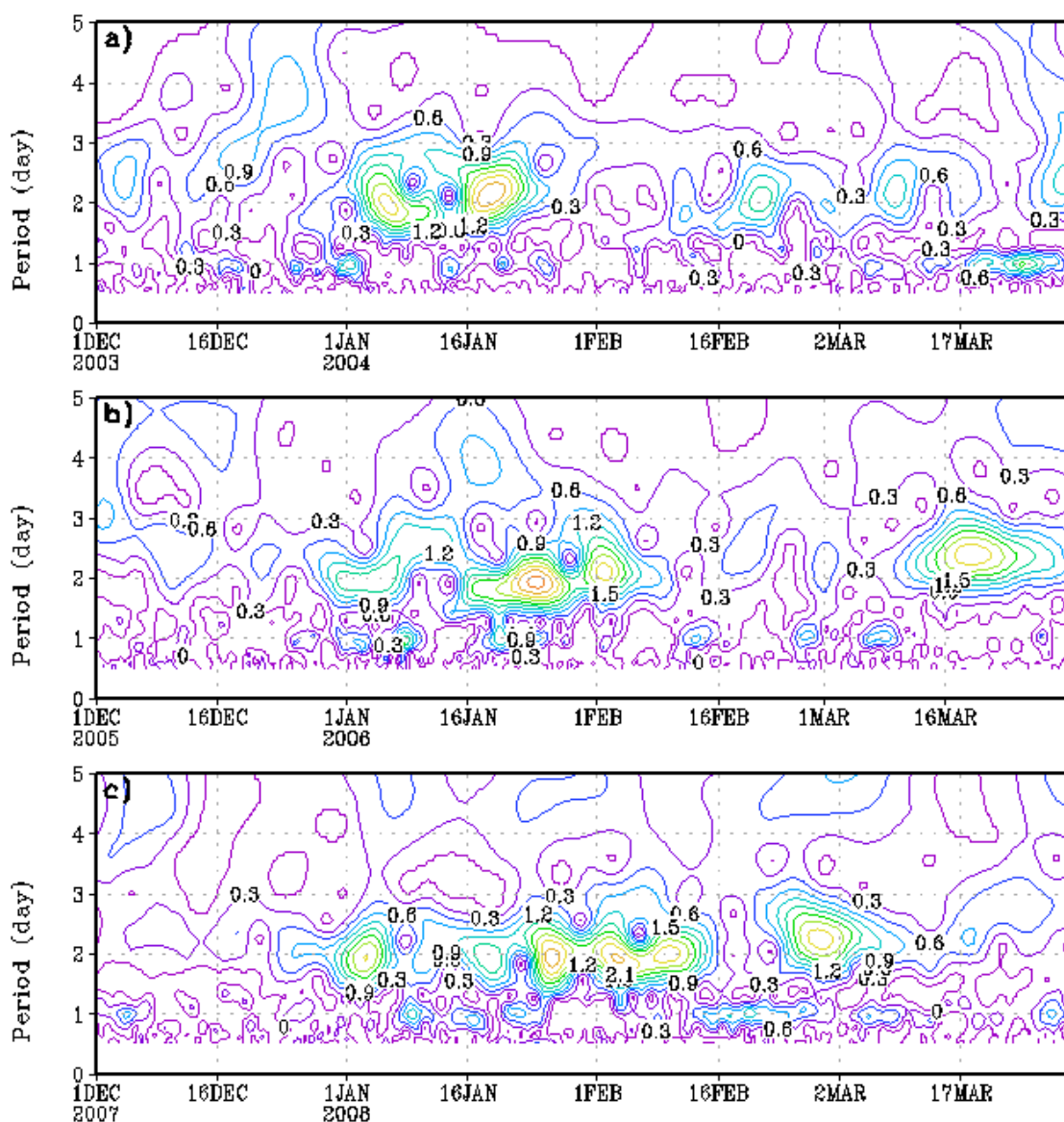


Рис. 7 – аналогично рисунку 6, но на 12.5° с.ш. и отсутствует зима 1989 – 1990 годов

На 22.5° с.ш. (рис. 8) наибольшее значение амплитуды двухдневной волны можно наблюдать зимой 2005 – 2006 годов (рис. 8с). Здесь амплитуда принимает значение 2,2 м/с. Наименее активной оказалась зима 1989 – 1990 годов. Здесь амплитуда почти не менялась за весь срок наблюдений и ее значение не превышало 0,4 м/с.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5N, 40km

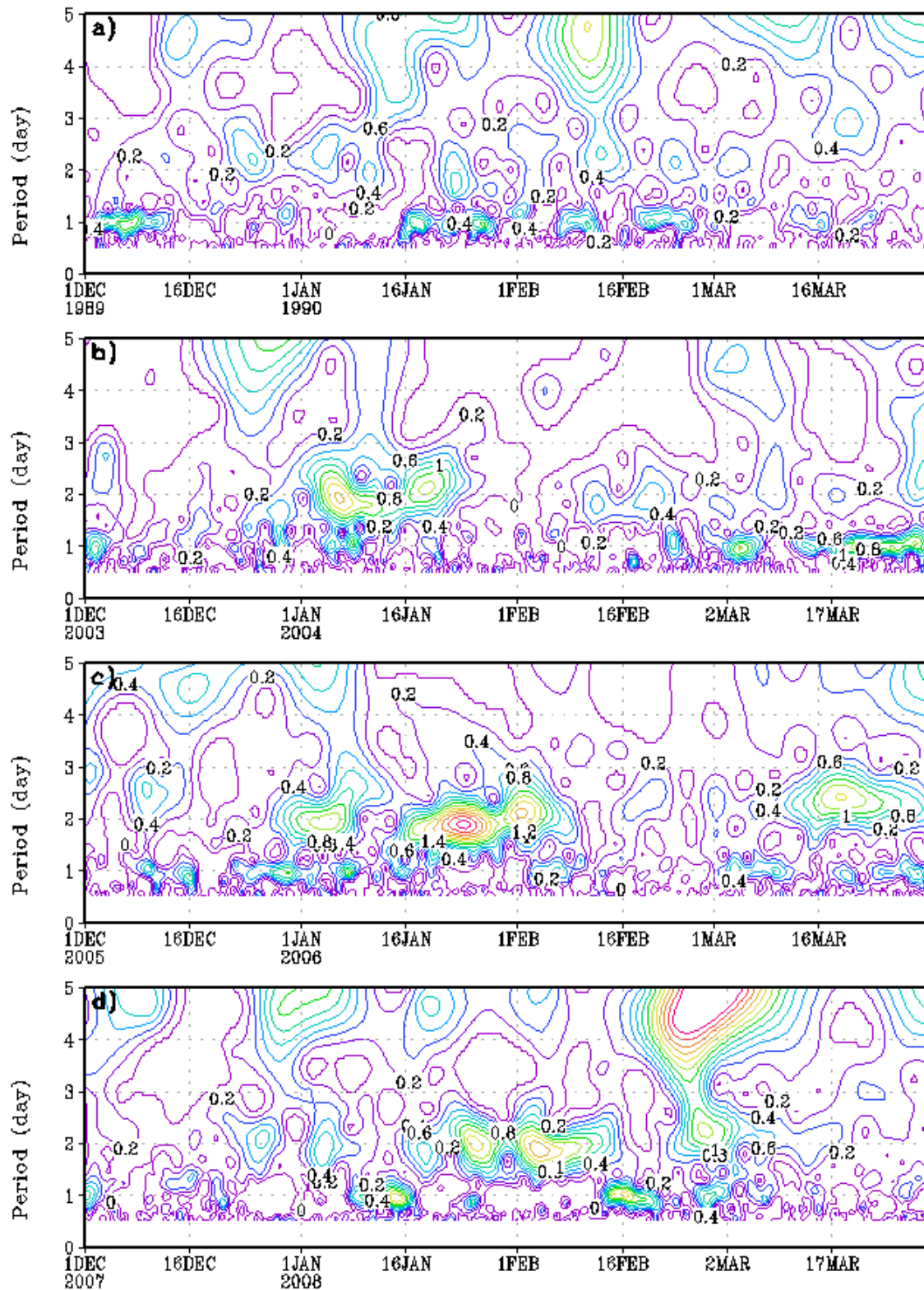


Рис. 8 – аналогично рисунку 6, но на 22.5° с.ш. и изолинии проведены через 0,2

На основе полученных распределений амплитуды 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны на заданных широтах и высоте 40 км для 1 фазы КДК можно сделать следующие выводы:

- Амплитуда 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны принимает максимальные значения преимущественно во второй половине января и второй половине марта;
- Наименее активное изменение амплитуды 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны обычно выпадает на декабрь и вторую половину февраля;
- Максимальная скорость изменения амплитуды 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны преимущественно наблюдаются с начала января до середины февраля и во второй половине марта;
- Все зимы, в которых максимальные значения амплитуд наблюдались более продолжительное время проходили в условиях отрицательной фазы ЭНЮК.

### 3.2 Результаты полученные для 2 фазы КДК

Ниже представлены распределения амплитуд 3 гармоника меридиональной составляющей ветра для 2 фазы КДК на экваториальных и тропических широтах.

Для второй фазы КДК Были отобраны 4 зимних периода (декабрь – март): 1977 – 1978; 1982 – 1983; 1987 – 1988 и 1992 – 1993 года. Все зимы, рассмотренные для 2 фазы КДК, проходили в условиях Эль-Ниньо.

На  $22.5^\circ$  ю.ш. наиболее активное изменение амплитуды двухдневной наблюдалось зимой 1977-1978 годов (рис. 9а). Здесь амплитуда в среднем принимала значение 1,2 м/с большую часть срока наблюдений. В начале января 1983 года наблюдалось наибольшее значение амплитуды двухдневной волны, и оно составляло 1,8 м/с.

На  $12.5^\circ$  ю.ш. максимум амплитуды был зафиксирован в 1978 году в первой половине февраля (рис.10а) и его значение составило 2,2 м/с. Интересным получился январь 1983 года (рис. 10b). Здесь амплитуда уменьшалась с начала января, достигла своего минимума равного 0,2 м/с в середине первой половины января и к середине второй половины января приняла исходное значение равное 1,4 м/с. Наименее активное изменение амплитуды двухдневной волны наблюдалось 1987 – 1988 (рис.10с).

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5S, 40km

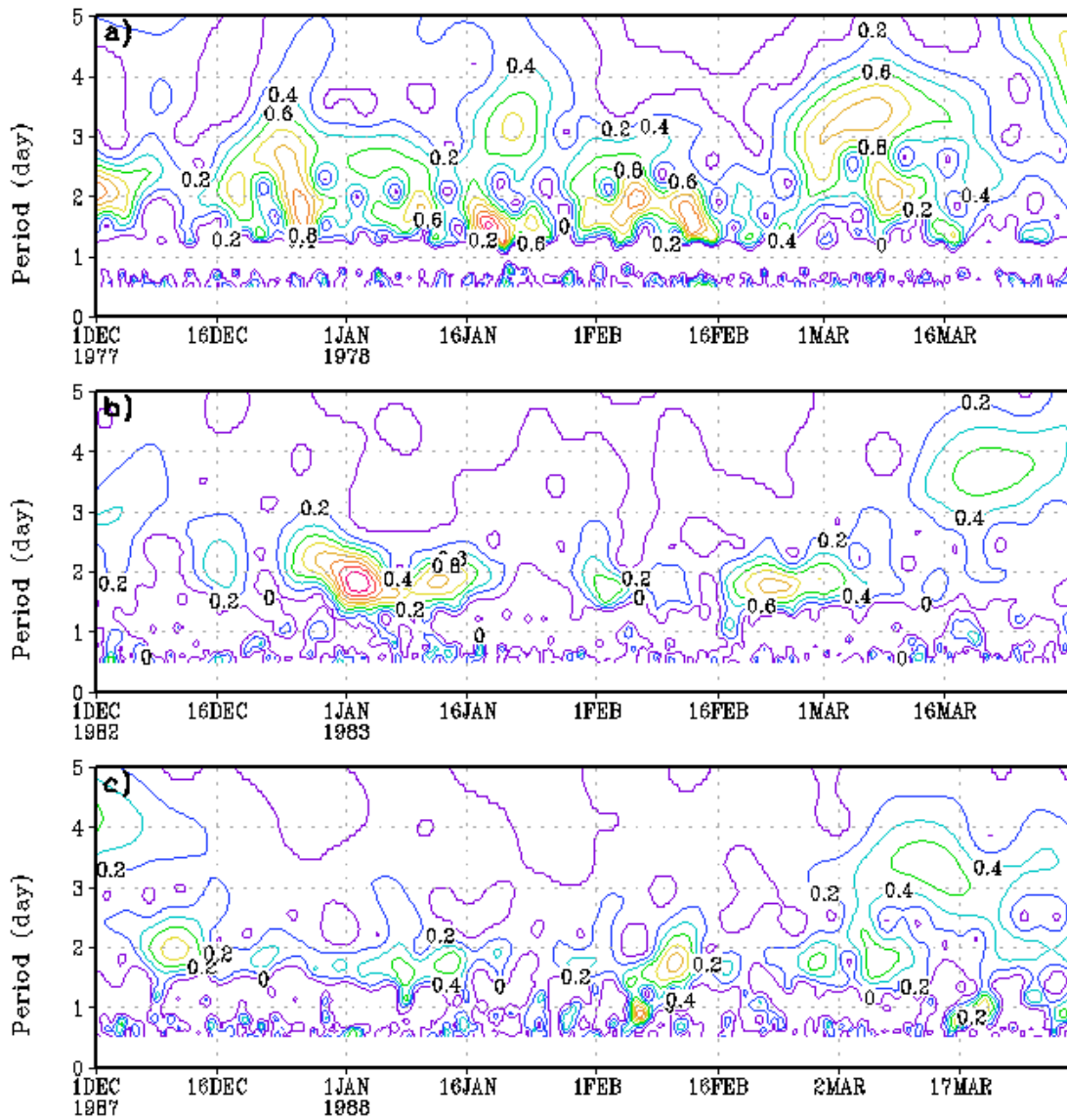


Рис. 9 – на рисунке представлены распределения амплитуд 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 3 зимних периодов: а) 1977-1978 года, б) 1982-1983 года, с) 1987 -1988 года на 22.5° ю.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,2. По оси горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной сosci – период волны в днях.



Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5S, 40km

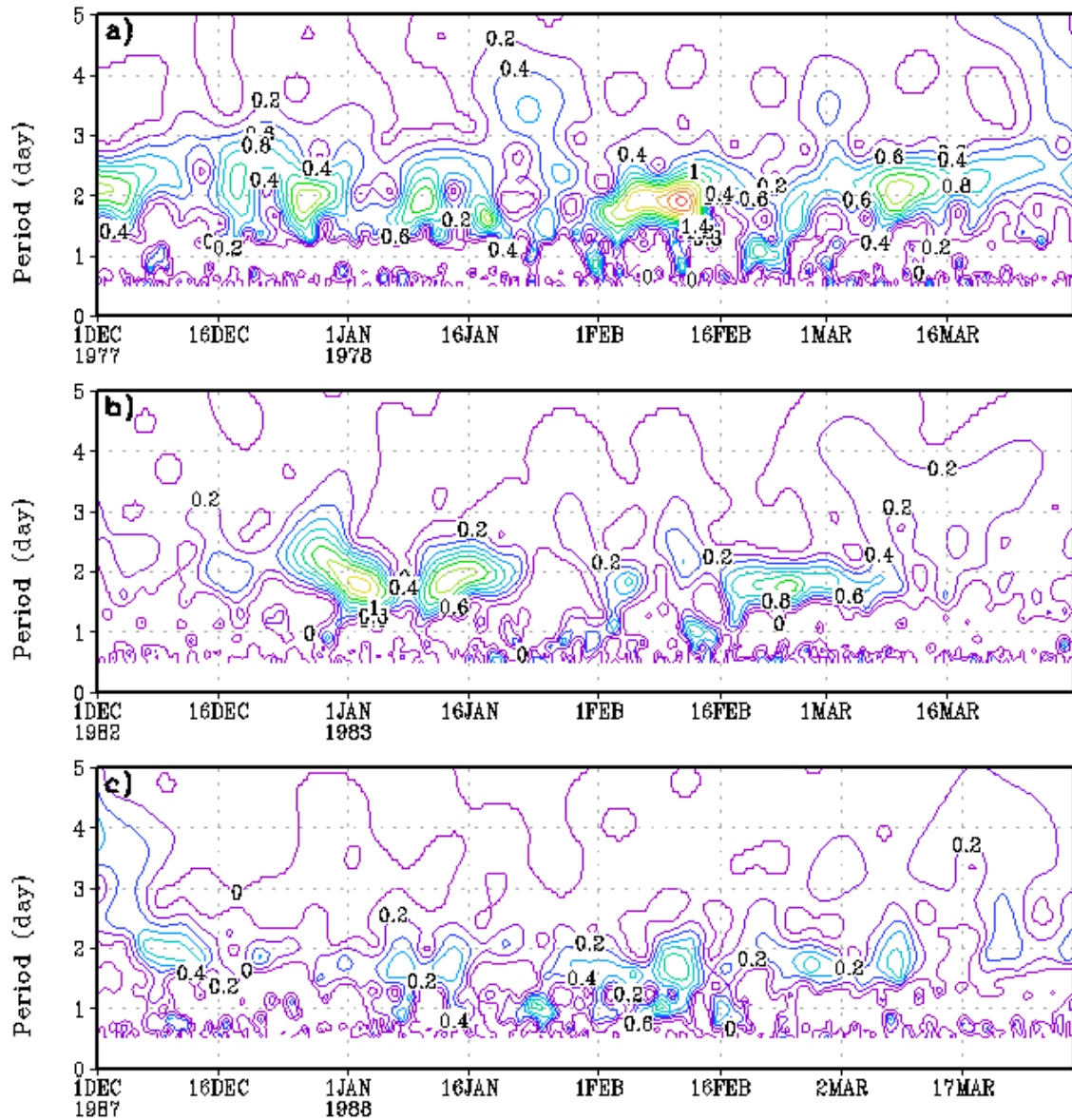


Рис. 10 – аналогично рисунку 9, но на 12.5° ю.ш.

На 2.5° ю.ш. (рис.11) амплитуда двухдневной волны изменялась достаточно активно во все периоды наблюдений. Наиболее яркими здесь стали зимы 1977 – 1978 года и 1982 – 1983 года (рис. 11а, б). Так в первой половине февраля 1978 года максимальное значение амплитуды двухдневной волны составило 3,0 м/с, а в середине января 1983 года значение амплитуды составляло 2,4 м/с.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5S, 40km

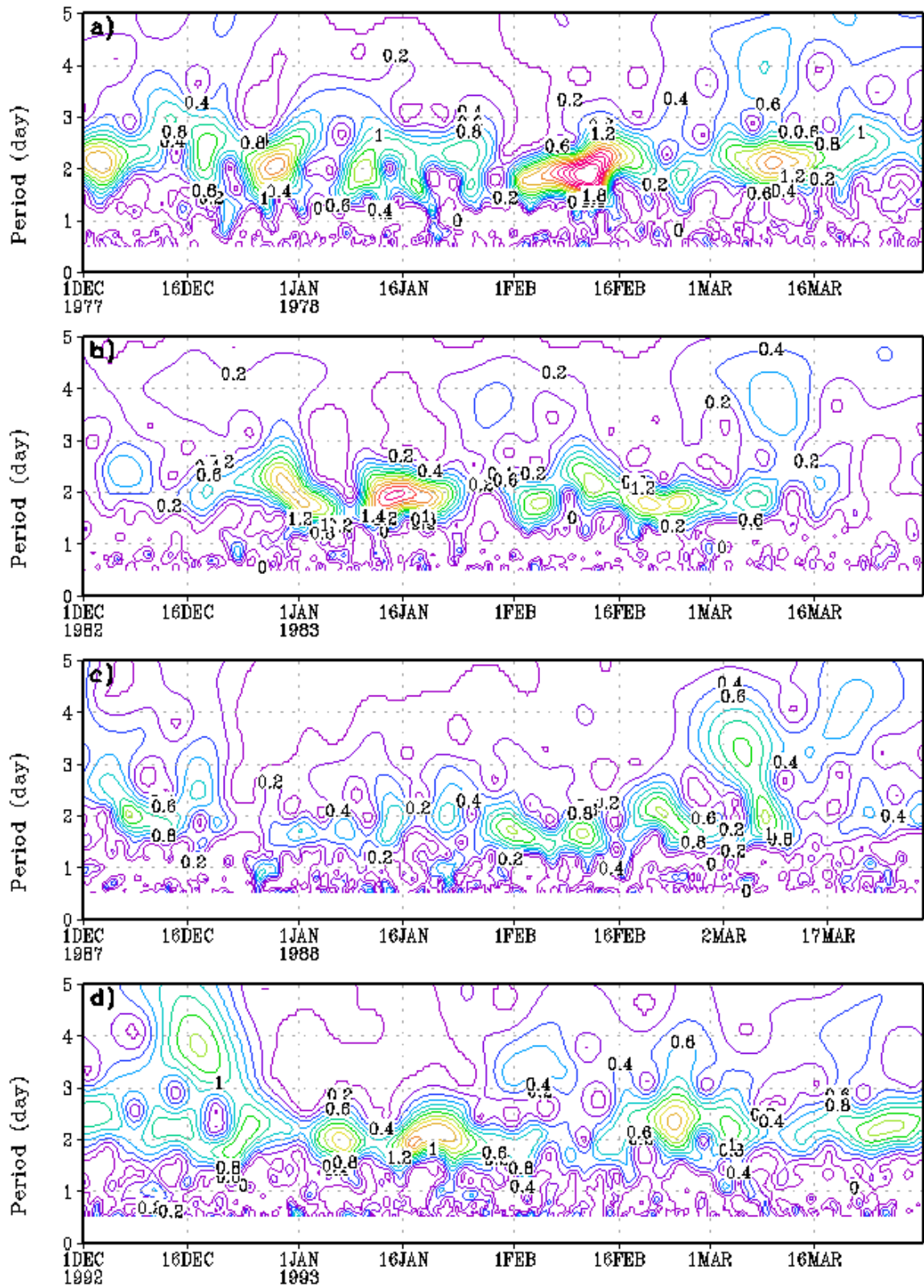


Рис. 11 – аналогично рисунку 9, но на 2.5° ю.ш.

На широте  $2.5^{\circ}$  с.ш. (рис. 12) наибольшее значение амплитуды двухдневной волны было зафиксировано в первой половине февраля 1978 года (рис. 12а), и оно составило 3,4 м/с. Наименее активным на данной широте является период наблюдений 1987 – 1988 годов. Зимы 1982 -1983 и 1992 -1993 (рис. 12b и рис. 12d) оказались приблизительно одинаковы. Амплитуда двухдневной волны в эти зимы равномерно изменялись в течении всего периода наблюдений и достигала своих максимумов в середине января и середине февраля.

На  $12.5^{\circ}$  с.ш. (рис. 13) из всех выбранных зим наименее активной оказалась зима 1987 – 1988 года (рис. 13с). Здесь активное изменение амплитуда двухдневной волны наблюдалось лишь с февраля 1988 года, тогда как остальные в зимы амплитуда активно изменялась на протяжении всего периода наблюдений. Наибольшее значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось в конце декабря 1982 года – начале января 1983 года и оно составило 2,4 м/с (рис. 13b).

На  $22.5^{\circ}$  с.ш. (рис.14) во всех 4 отобранных зимних периодах амплитуды двухдневной волны изменялась слабо. Максимумы значения амплитуды наблюдались в конце декабря 1982 – начале января 1983 годов (рис. 14b) и в первой половине декабря 1987 года (рис. 14с) и были равны 1,8 м/с. Наименьшей активностью отметилась зима 1982 – 1983 годов, несмотря на наличие максимума амплитуды, остальной период наблюдений можно охарактеризовать как наименее активный.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5N, 40km

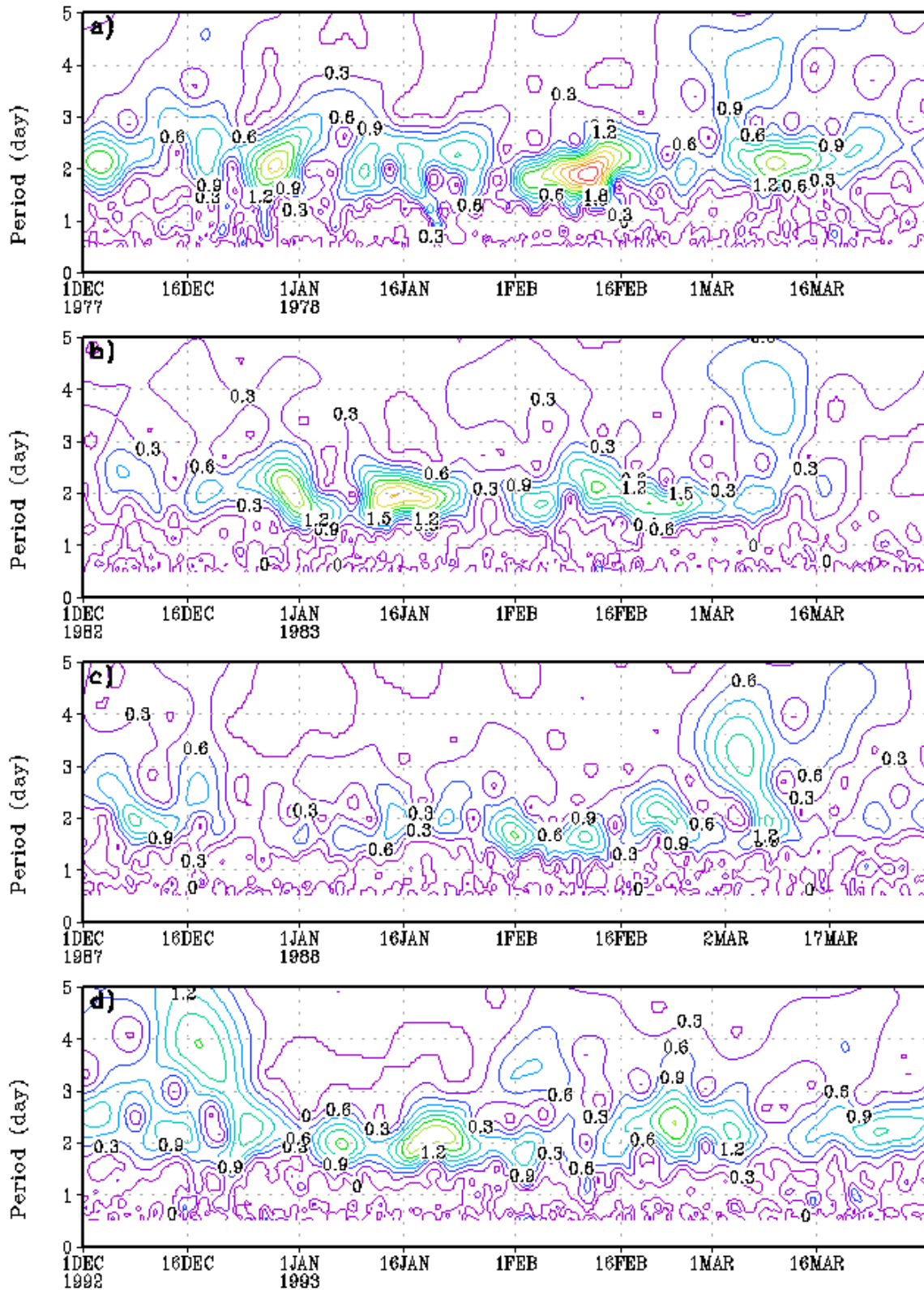


Рис. 12 – аналогично рисунку 9, но на 2.5° с.ш. изолинии проведены через 0,3.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5N 40km

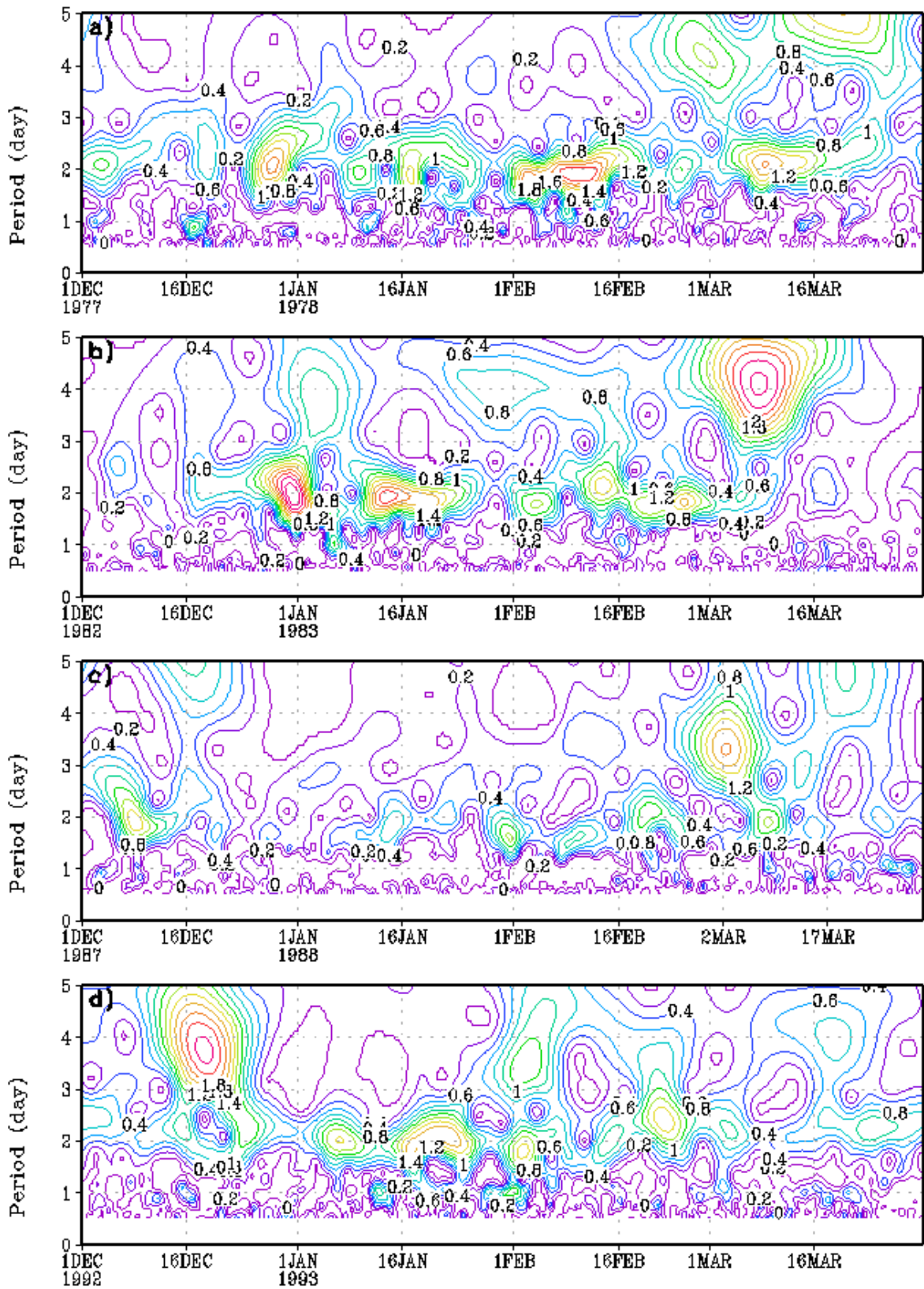


Рис. 13 – аналогично рисунку 9, но на 12.5° с.ш.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5N 40km

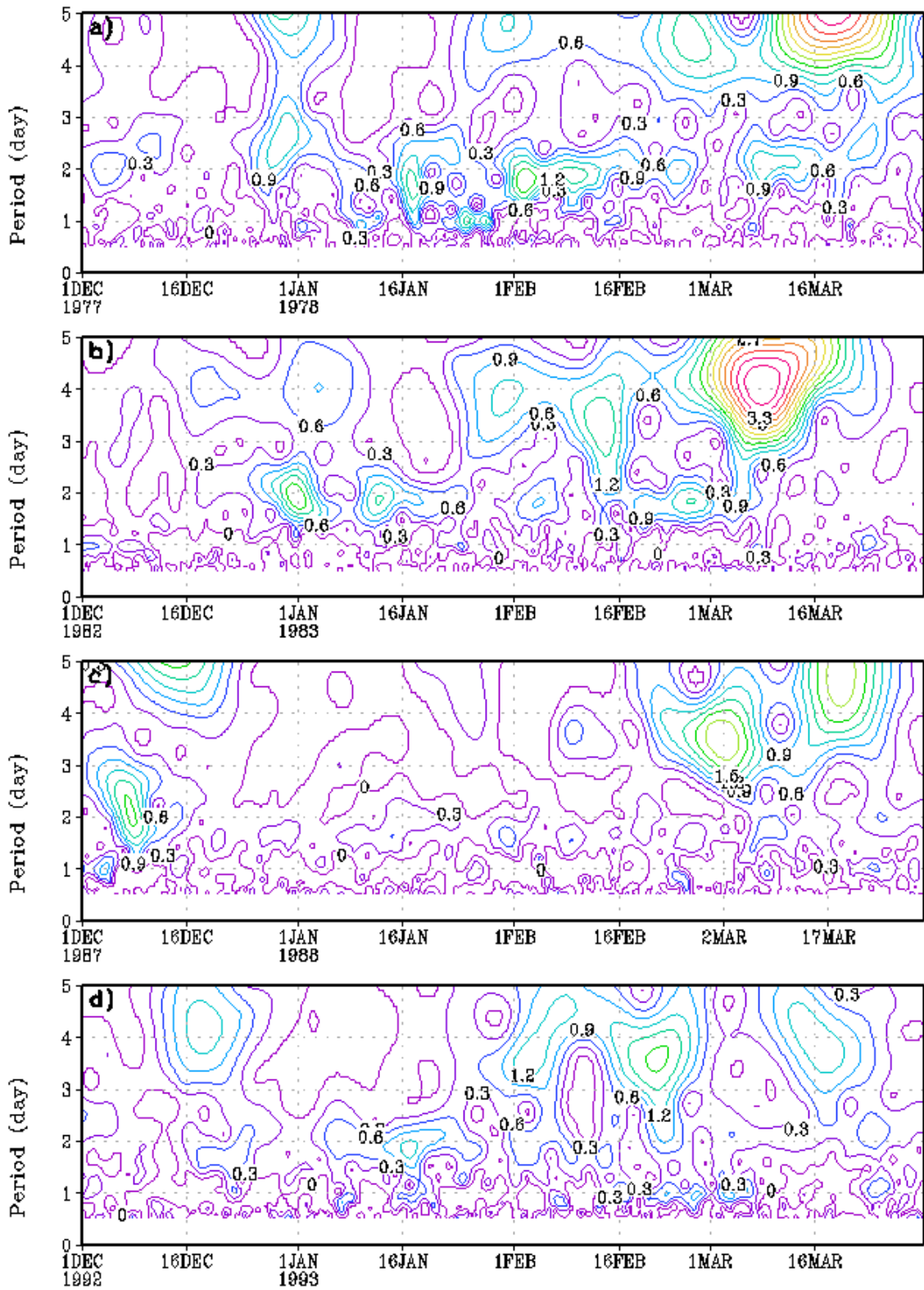


Рис. 14 – аналогично рисунку 9, но на 22.5° с.ш. и изолинии проведены через 0,3

На основе полученных графиков распределения амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны на заданных широтах и высоте 40 км для 2 фазы КДК можно сделать следующие выводы:

- Амплитуда 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны активно изменялась во всех отобранных для 2 фазы КДК зимних периодах;

- Наименее активно амплитуда 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны изменялась на  $22.5^{\circ}$  с.ш.;

- Максимальные значения амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны преимущественно наблюдались в январе и первой половине февраля в обоих полушариях;

- Наименее активно амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны изменялись в первой половине декабря и второй половине марта.

-

### 3.3 Результаты полученные для 3 фазы КДК

Ниже представлены распределения амплитуд 3 гармоника меридиональной составляющей ветра для 3 фазы КДК на экваториальных и тропических широтах.

Для третьей фазы КДК были отобраны 4 зимних периода (декабрь – март): 1985 – 1986; 1999 – 2000; 2006 – 2007 и 2008 – 2009 года.

На 22.5° ю.ш. (рис. 15) наибольшее значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось в середине февраля 2000 года (рис. 15а), и оно составляло 1,4 м/с. Наименее активное изменение амплитуды двухдневной волны наблюдалось зимой 2008 – 2009 года (рис. 15с). Здесь амплитуда активно изменялась только в период с середины января 2009 года по середину февраля 2009 года и ее максимальное значение составляло 1,0 м/с.

На 12.5° ю.ш. (рис. 16) наибольшая амплитуда двухдневной волны наблюдается во второй половине февраля 2000 года (рис. 16b) и ее значение составляет более 1,8 м/с. Также максимумы значения амплитуды наблюдаются во второй половине февраля 1986 года (рис. 16а) – 1,2 м/с, начале февраля 2000 года, второй половине января 2007 года (рис. 16с) – 1,3 м/с и в конце января 2008 года – начале февраля 2009 года (рис. 16d) – 1,3 м/с. Наиболее активное изменение амплитуды наблюдалось зимой 1999 – 2000 года.

Данные за зиму 1985 – 1986 получить не удалось. На представленных распределениях амплитуды для 2.5° ю.ш. (рис. 17) наибольшую амплитуду двухдневной волны можно наблюдать во второй половине января 2007 года (рис. 17b). Значение амплитуды здесь составляет 2,4 м/с. Также большое значение амплитуды двухдневной волны наблюдалось в середине февраля 2000 года (рис. 17а), оно составляло 2,0 м/с. Период с наиболее активным изменением амплитуды можно считать зиму 2006 – 2007 года.



Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5S, 40km

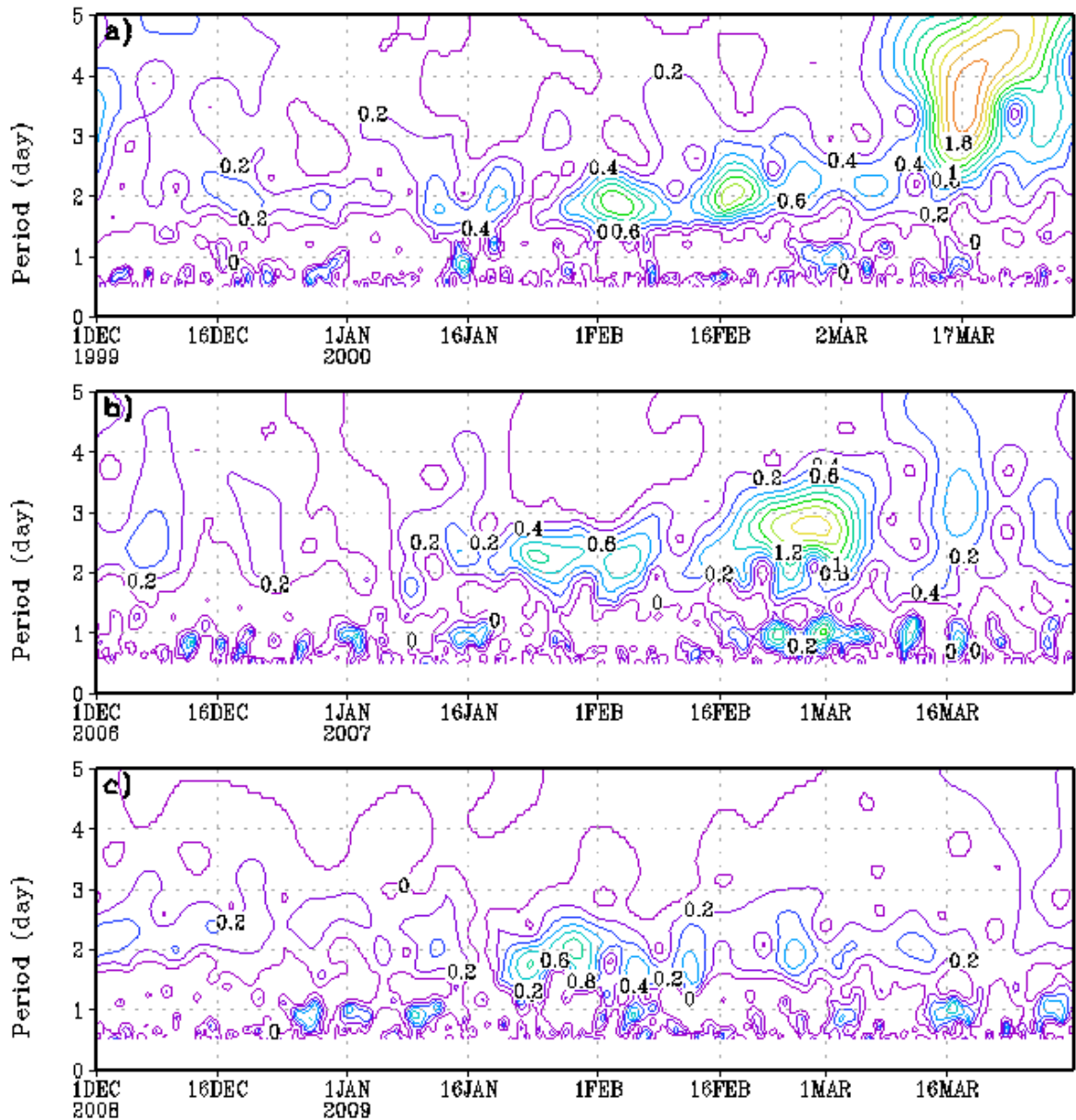


Рис. 15 – на рисунке представлено распределение амплитуды 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 3 зимних периодов: а) 1999-2000 года, б) 2006-2007 года, с) 2008 - 2009 года на 22.5° ю.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,2. По оси горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной оси – период волны в днях.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5S, 40km

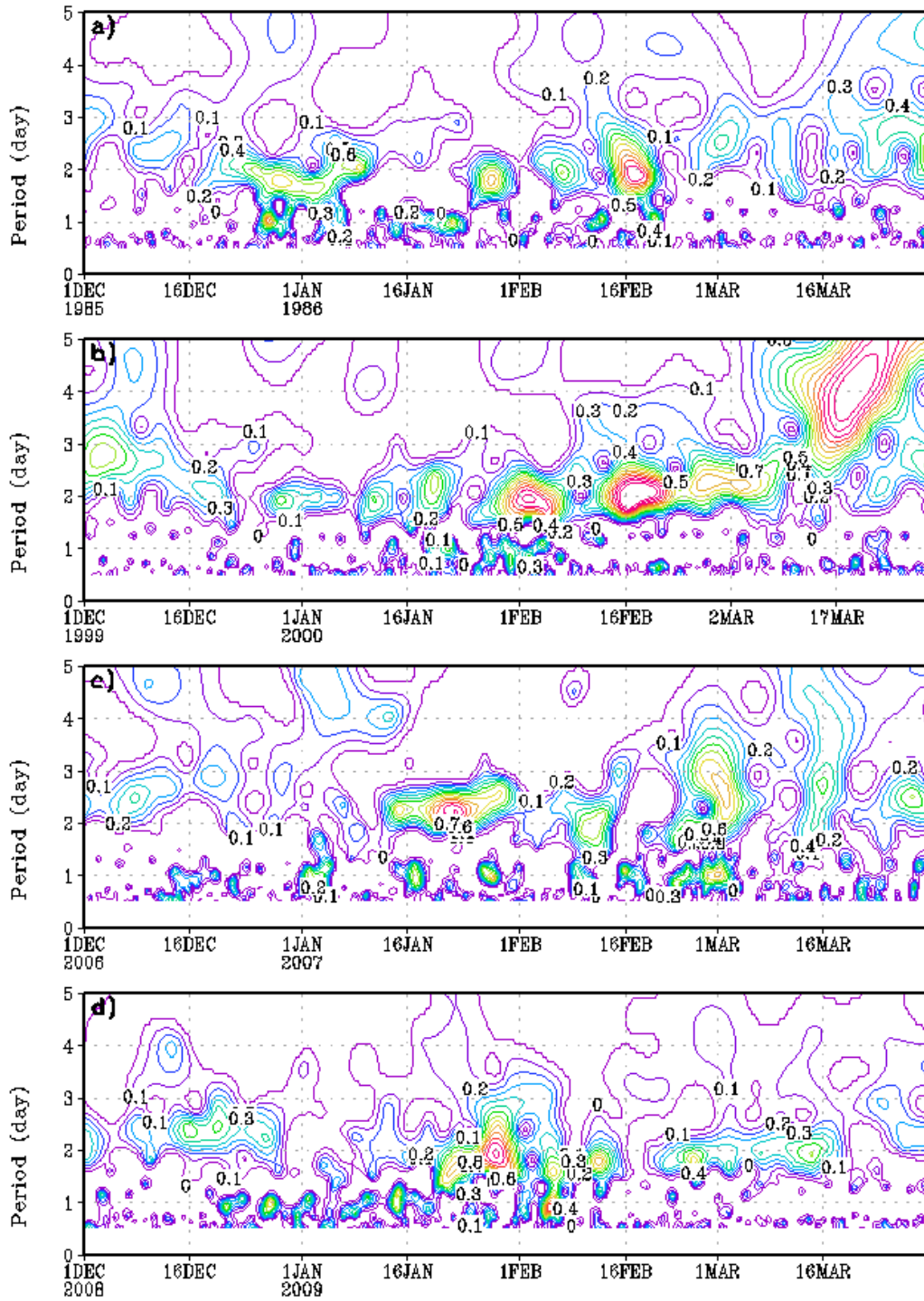


Рис. 16 – на рисунке представлено распределение амплитуды 3 гармонике меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 4 зимних периодов: а) 1985-1986 года, б) 1999-2000 года, в) 2006 – 2007 и д) 2008 – 2009 года на 12.5° ю.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,1. По оси горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной оси – период волны в днях.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5S, 40km

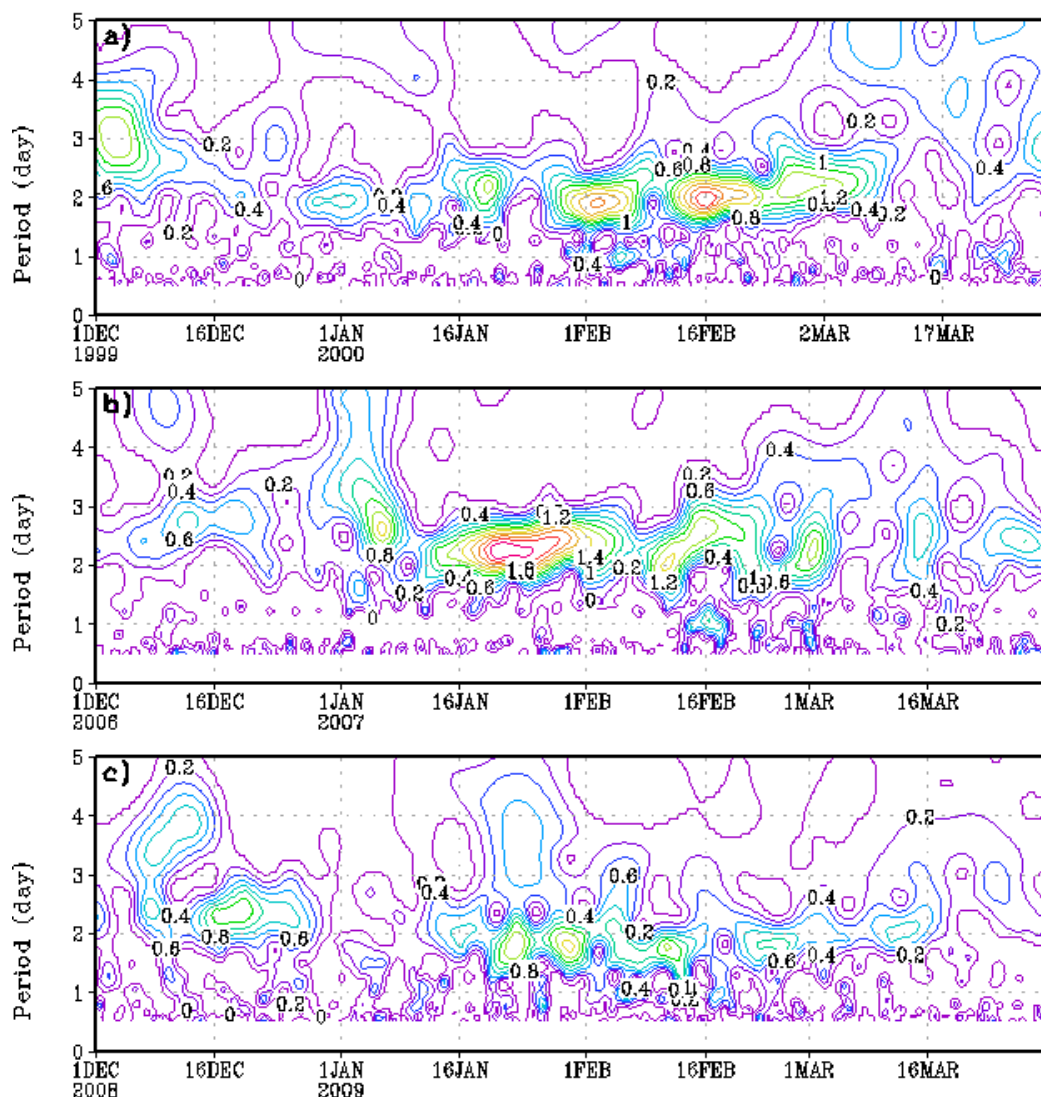


Рис. 17 – аналогично рис. 15, но на 2.5° ю.ш.

На графике распределения амплитуды двухдневной волны на 2.5° с.ш. (рис. 18) наибольшая амплитуда наблюдалась в период с середины января по начало февраля 2007 года (рис. 18с). Ее значение составляло 3,2 м/с. Наименее активным периодом оказалась зима 1985 – 1986 года (рис. 18а).

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5N, 40km

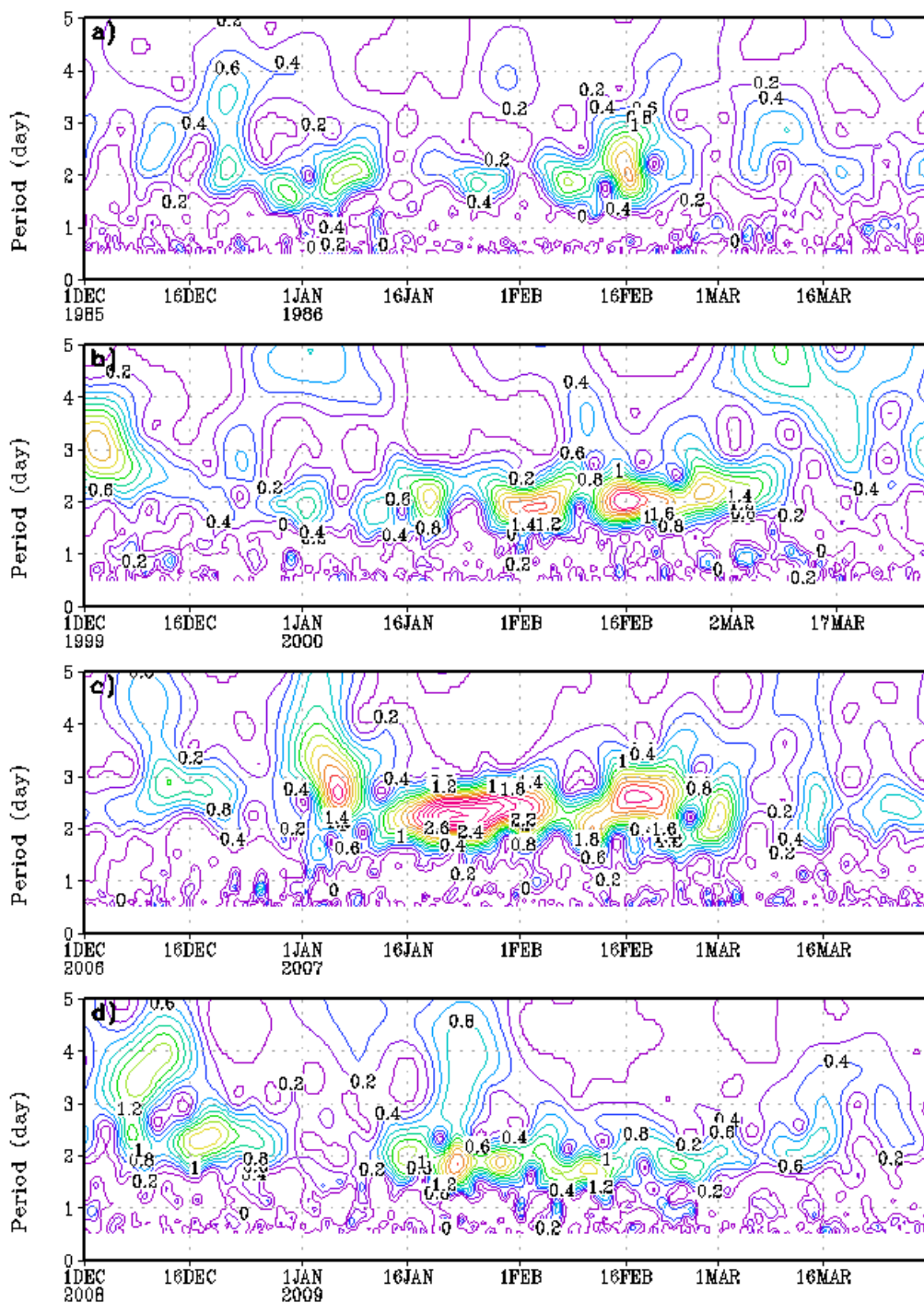


Рис. 18 – аналогично рис. 18, но на 2.5° с.ш. и изолинии проведены через 0,2

На графике распределения амплитуд двухдневных волн на 12.5° с.ш. (рис.19) видно, что наименее активное изменение амплитуды наблюдалось зимой 1985 – 1986 годов (рис. 19a). Максимум амплитуды здесь достигал значения 1,2 м/с. Наибольшее значение амплитуды наблюдалось во второй

половине января 2009 года (рис. 19d) и составляло 3,0 м/с. Также большое значение амплитуды наблюдалось во второй половине января 2007 года (рис.19с), и оно составляло 2,7 м/с.

На 22.5° с.ш. (рис.20) наименее активно амплитуда двухдневной волны изменялась зимой 1985 – 1986 годов (рис. 20а). В первой половине февраля 2000 года (рис. 20b) можно наблюдать 2 симметричных максимума амплитуды со значением 1,8 м/с. Наибольшее значение амплитуды наблюдалось во второй половине января 2009 года (рис. 20d), и оно составляло 2,1 м/с.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 12.5N, 40km

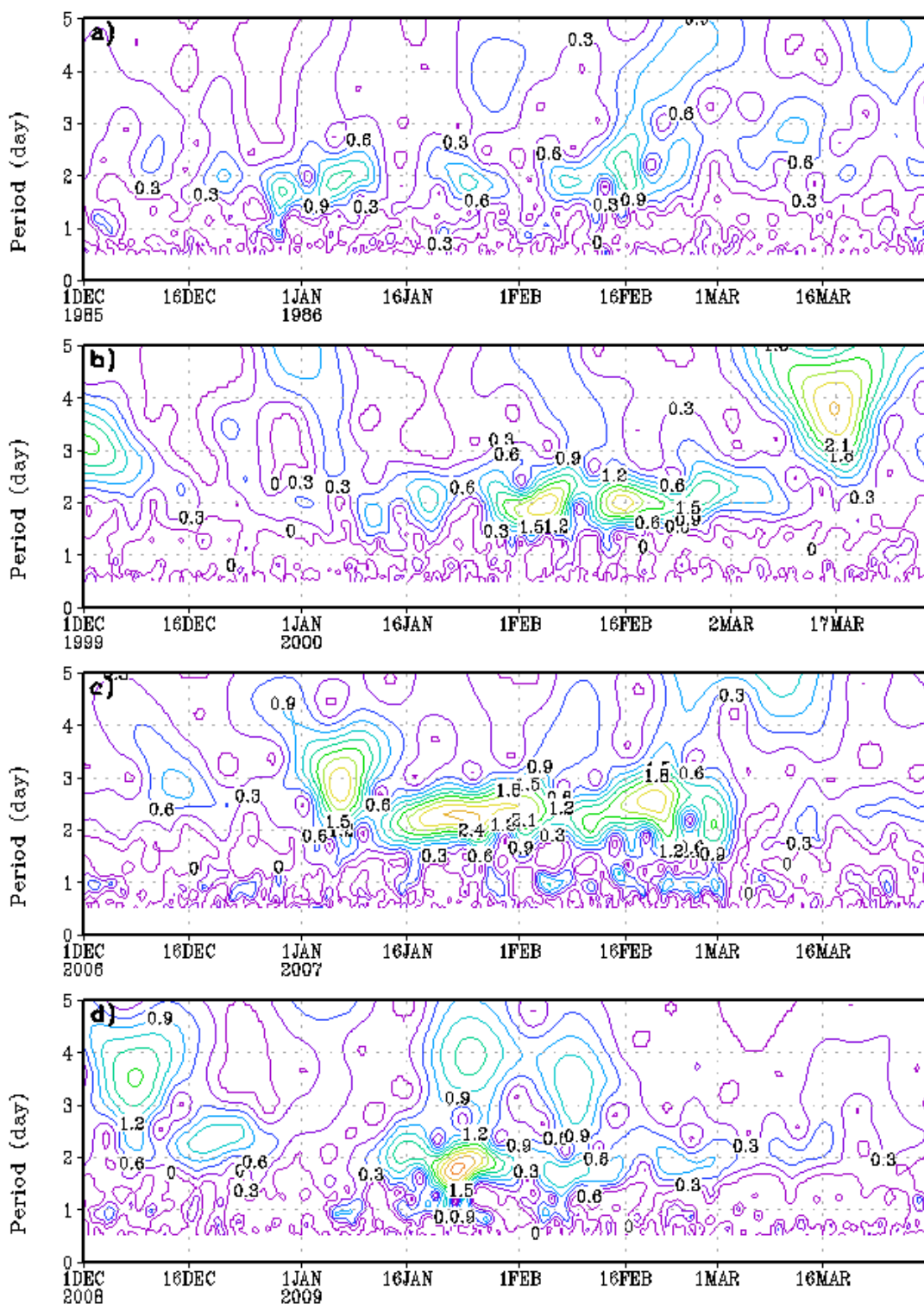


Рис. 19 – аналогично рис. 18, но на 12.5° с.ш. и изолинии проведены через 0,3

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5N, 40km

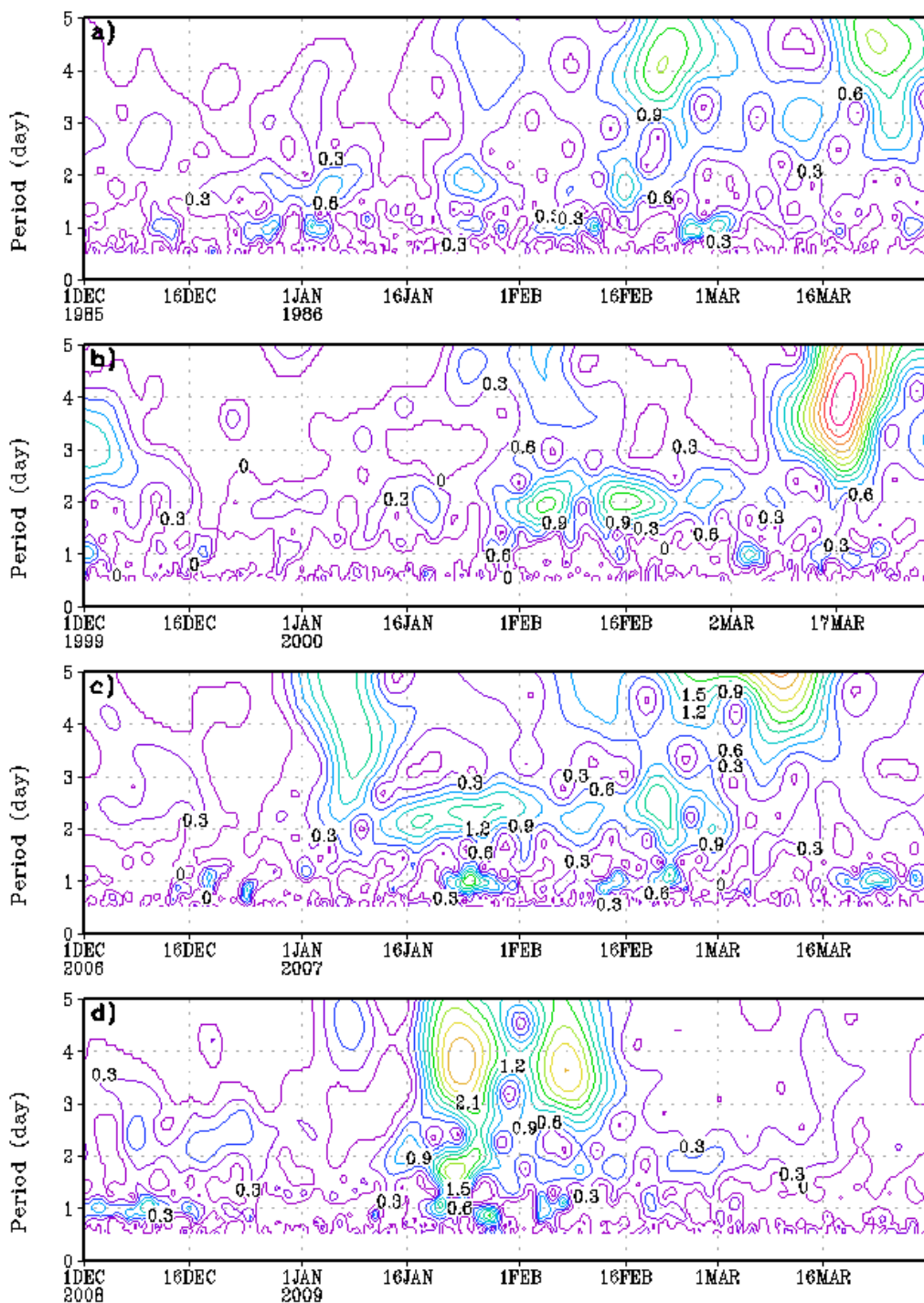


Рис. 20 – аналогично рис.18, но на 22.5° с.ш. и изолинии проведены через 0,3

На основе полученных картинок распределения амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны на заданных широтах и высоте 40 км для 3 фазы КДК можно сделать следующие выводы:

- Амплитуда 3 гармоники меридиональной составляющей ветра в двухдневной волне наиболее активно изменялась с начала января до начала марта во все периоды наблюдений и на всех широтах
- Наименее активно амплитуда 3 гармоники меридиональной составляющей ветра в двухдневной волне для 3 фазы КДК изменялась на 22.5° ю.ш.
- Самое активное изменение амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра в двухдневной волне происходило на 12.5° с.ш.
- Следует отметить, что в области экватора значения максимальных амплитуд примерно одинаково во все зимы, кроме зим в условиях нейтральной фазы. Однако при удалении от экватора отрицательная фаза ЭНЮК сильнее сказывается на амплитудах квазидвухдневной волны.



### 3.4 Результаты полученные для 4 фазы КДК

Ниже представлены распределения амплитуд 3 гармоника меридиональной составляющей ветра для 4 фазы КДК на экваториальных и тропических широтах.

Для третьей фазы КДК были отобраны 4 зимних периода (декабрь - март): 1981 – 1982; 1983 – 1984; 1986 – 1987 и 2011 – 2012 года.

На графике распределения амплитуд двухдневной волны на 22.5° ю.ш. (рис. 21) видно, что в выбранные годы на данной широте амплитуда изменялась не очень активно. Наименее активное изменение амплитуды из выбранных годов наблюдается зимой 1981 – 1982 (рис. 21а). Наиболее активно амплитуда двухдневной волны изменялась зимой 2011-2012 годов (рис. 21d). Максимальное значение амплитуды двухдневной волны среди выбранных для данной фазы КДК лет на заданной широте наблюдается в конце декабря 2011 – начале января 2012 года и составляет 1,4 м/с.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5S, 40km

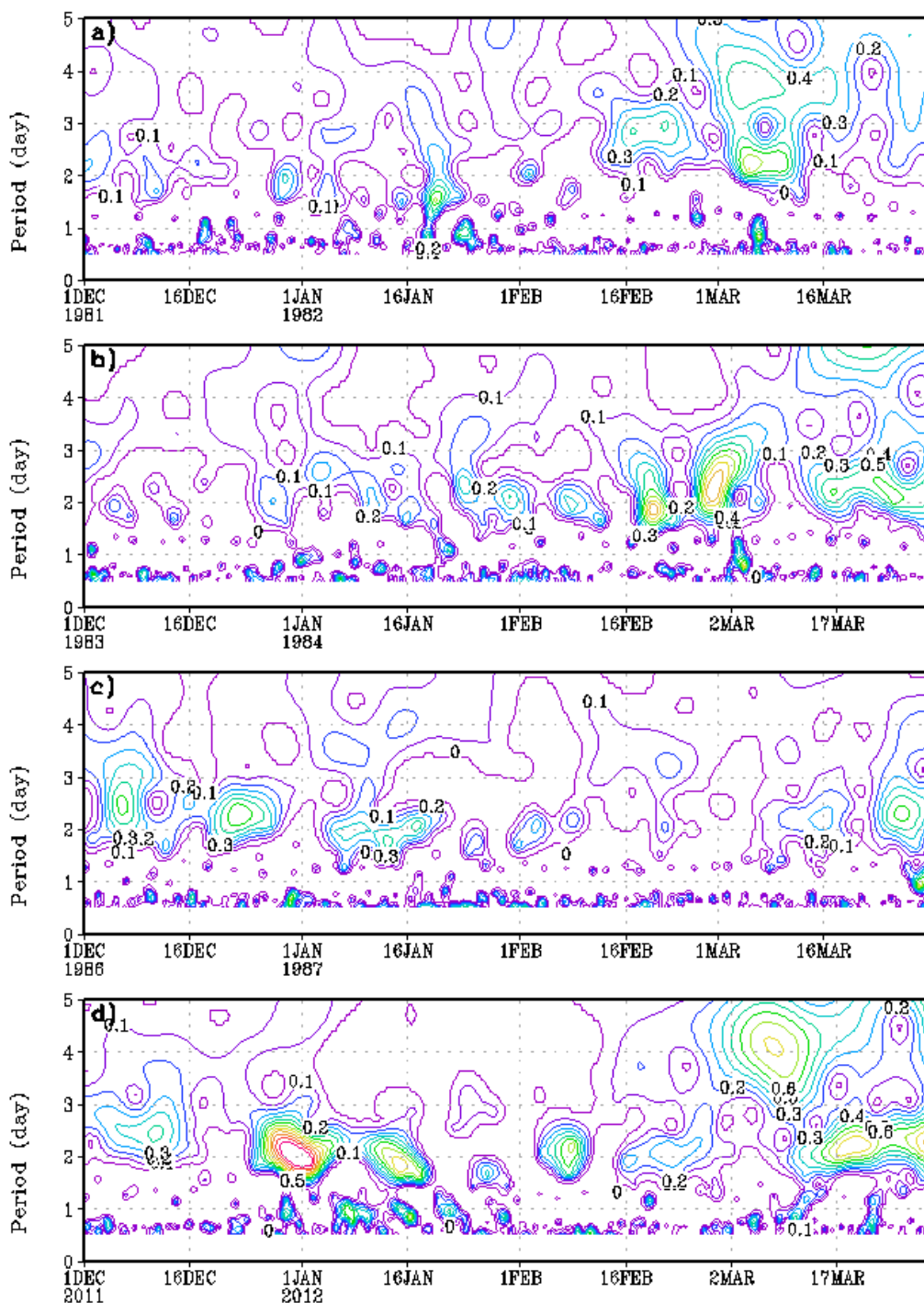


Рис. 21 – на рисунке представлено распределение амплитуды 3 гармоника меридиональной составляющей ветра двухдневной волны для 4 зимних периодов: а)1981-1982 года, б) 1983-1984 года, с) 1986 – 1987 и д) 2011 – 2012 года на 22.5° ю.ш. и высоте 40 км с частотой изолиний 0,1. По оси горизонтальной оси отложены даты, по вертикальной оси – период волны в днях.

Из графика распределения амплитуд двухдневной волны на  $12.5^{\circ}$  ю.ш. (рис. 22) видно, что наименее активно амплитуда двухдневной волны изменялась зимой 1981 – 1982 года (рис.22а). Максимум амплитуды наблюдался в 2011 – 2012 годах в январе и второй половине марта (рис. 22d) и значение максимумов амплитуд составляло 1,5 м/с и 1,0 м/с соответственно. Интересной оказалась зима 1983 – 1984 года (рис.22b), т.к. здесь можно наблюдать симметричный ход амплитуды. Здесь амплитуда уменьшалась с 1 февраля, достигла своего минимума 15 февраля и затем увеличивалась до 2 марта. Значения максимумов амплитуды здесь также совпадают, и они равны 0,9 м/с.

На  $2.5^{\circ}$  ю.ш. (рис. 23) распределение амплитуды происходило активно во всех выбранных зимних периодах. Наиболее активно амплитуда изменялась в зимний период 2011 – 2012 годов (рис. 23d). В этот же период наблюдалось наибольшее значение максимума амплитуды, оно составляет 1,8 м/с в первой половине января. Наименее активно из данных периодов наблюдения амплитуда изменялась в 1986 – 1987 (рис. 23с).

Ampl of westward PWS in mer. wind (m/s) at 12.5S, 40km

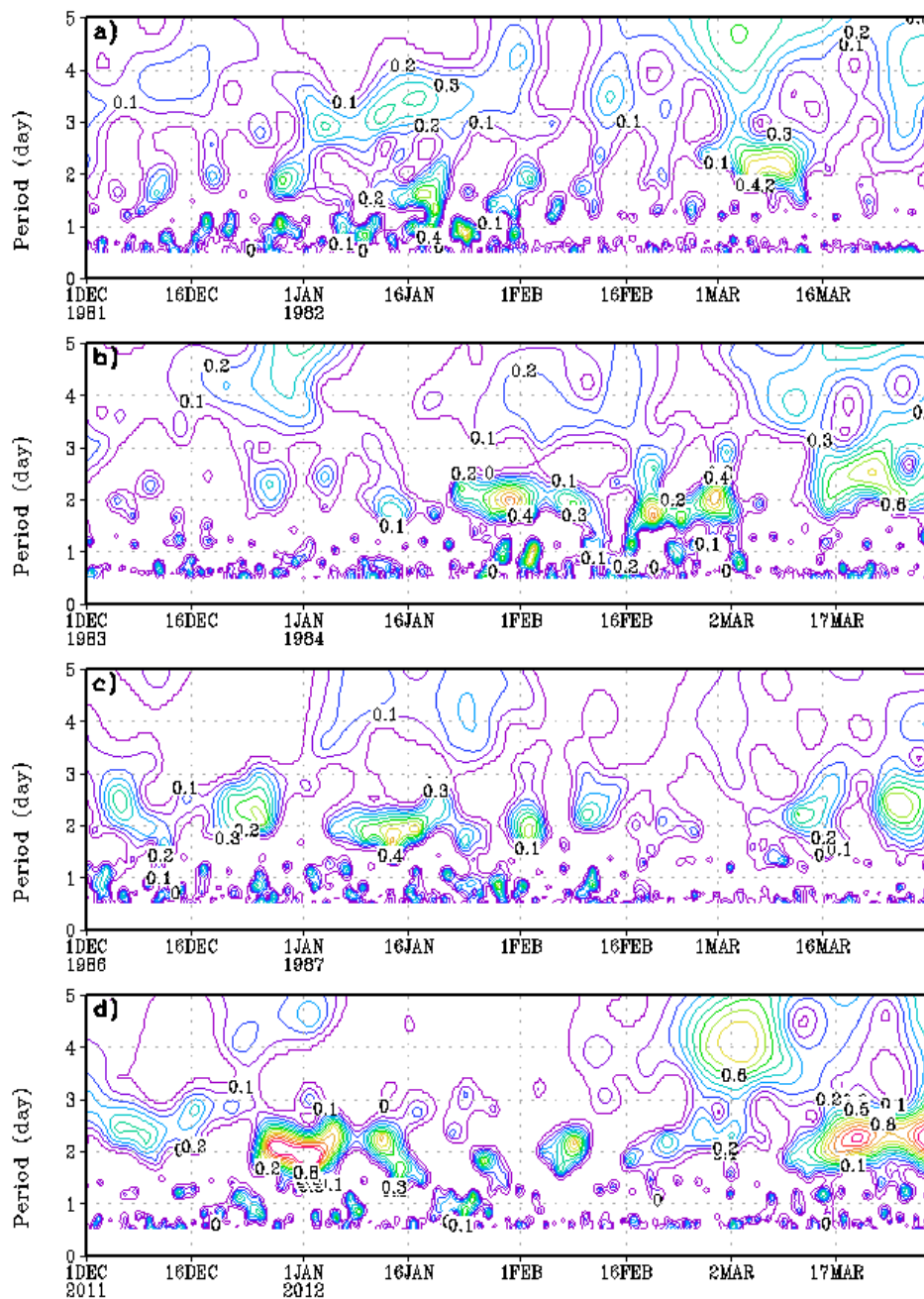


Рис.22 – аналогично рис. 21, но на 12.5° ю.ш.

Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 2.5S, 40km

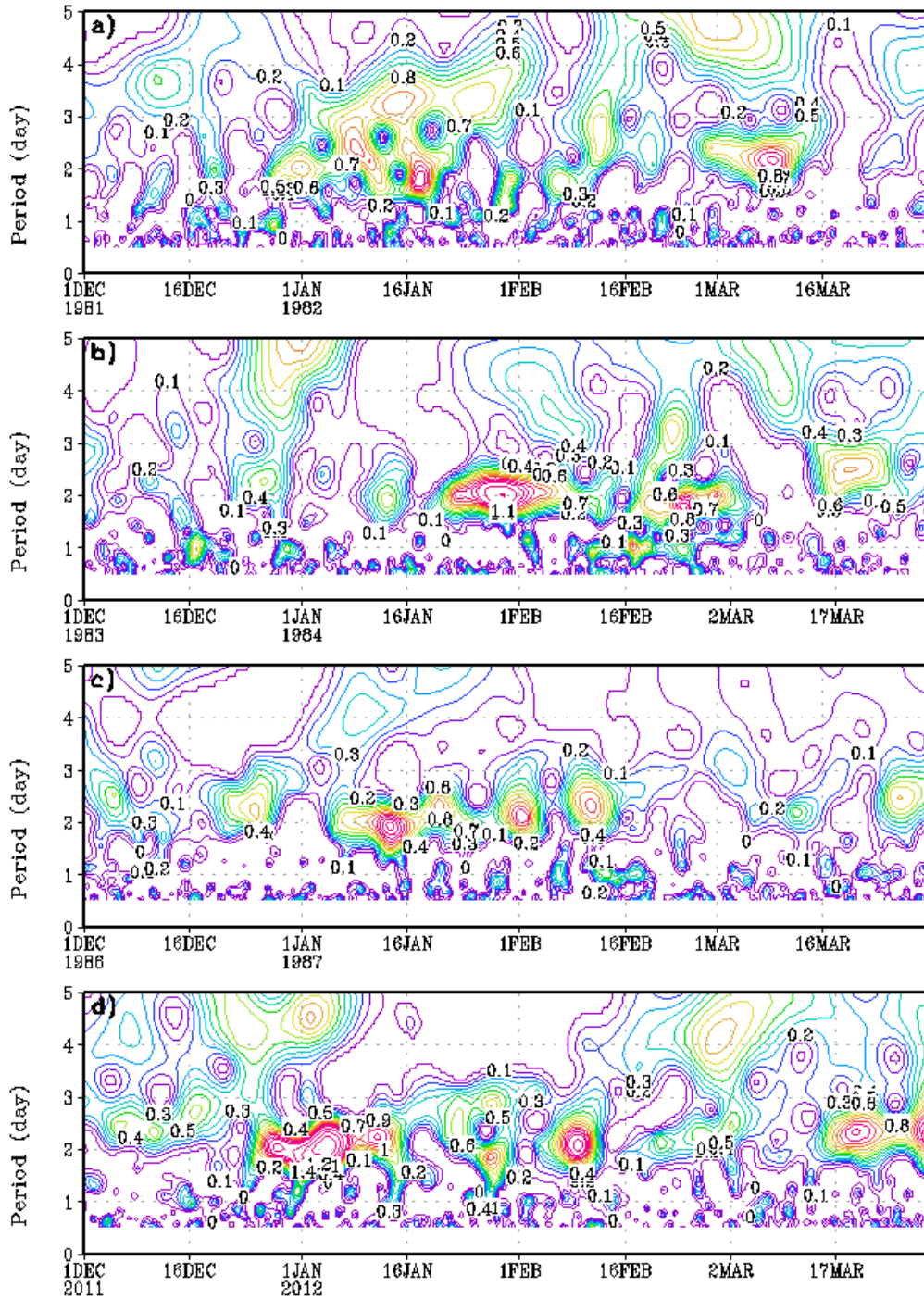


Рис. 23 – аналогично рис. 21, но на 2.5° ю.ш.

На 2.5° с.ш. (рис. 24) изменение амплитуды двухдневной волны во всех периодах наблюдения наблюдалось преимущественно с начала января до марта. Наибольшее значение амплитуды двухдневной волны было зарегистрировано в первой половине января 2012 года, оно составляло 2,6 м/с (рис. 24с). Меньше всего на данной широте амплитуда изменялась в период

наблюдения зима 1986 – 1987 годов (рис. 24с). Самым активным изменением амплитуды отличился зимний период 2011 – 2012 года.

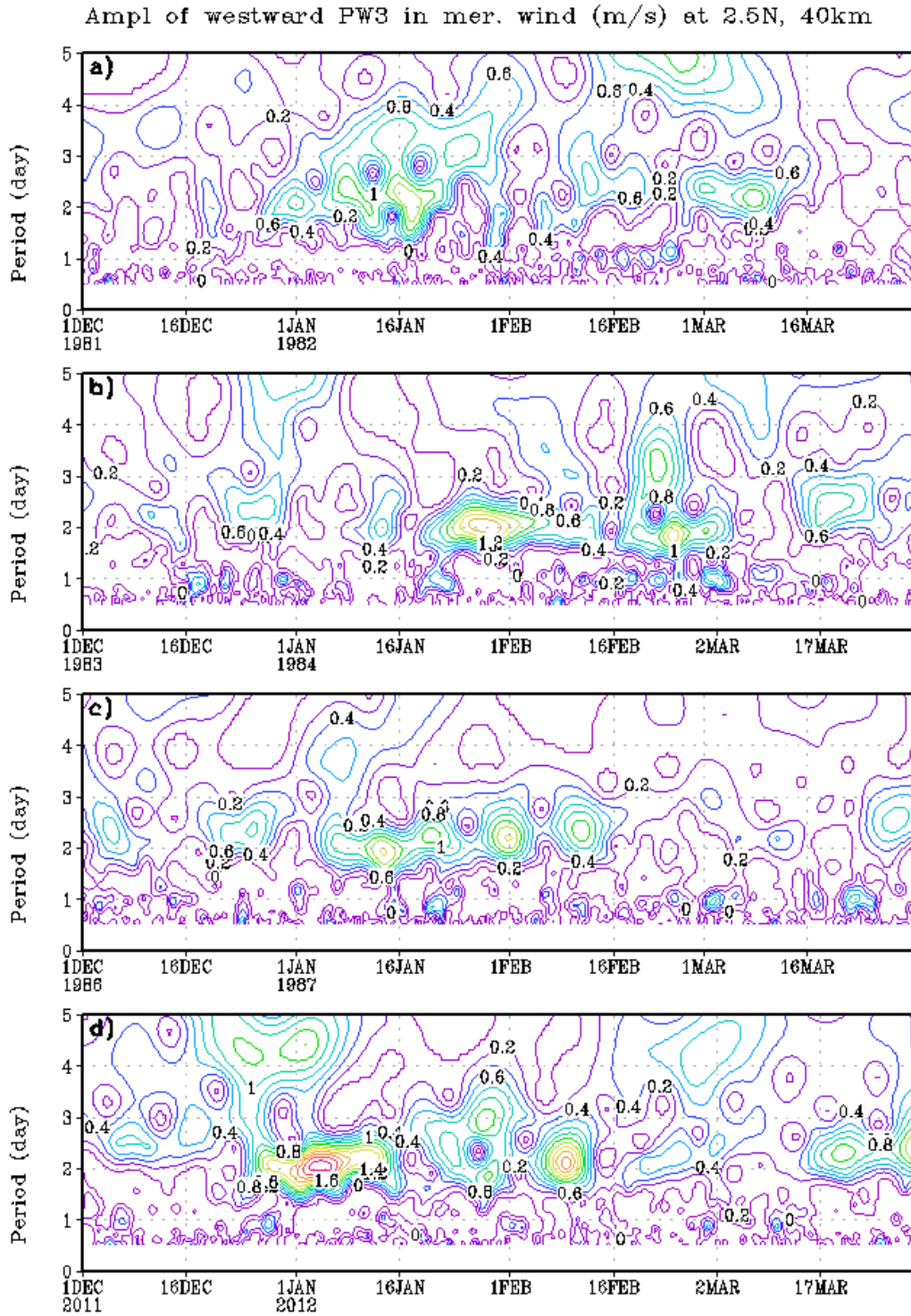


Рис. 24 – аналогично рис. 23, но на 2.5° с.ш.

На  $12.5^\circ$  с.ш. (рис. 25) видно, что наибольшее значение амплитуды было зарегистрировано в первой половине января 2012 (рис. 25d), оно составляло 1,8 м/с. Также в зимний период 2011 – 2012 года наблюдалось самое активное изменение амплитуды двухдневной волны. Наименее активно амплитуда изменялась в 1981 – 1982 годах (рис. 25a).

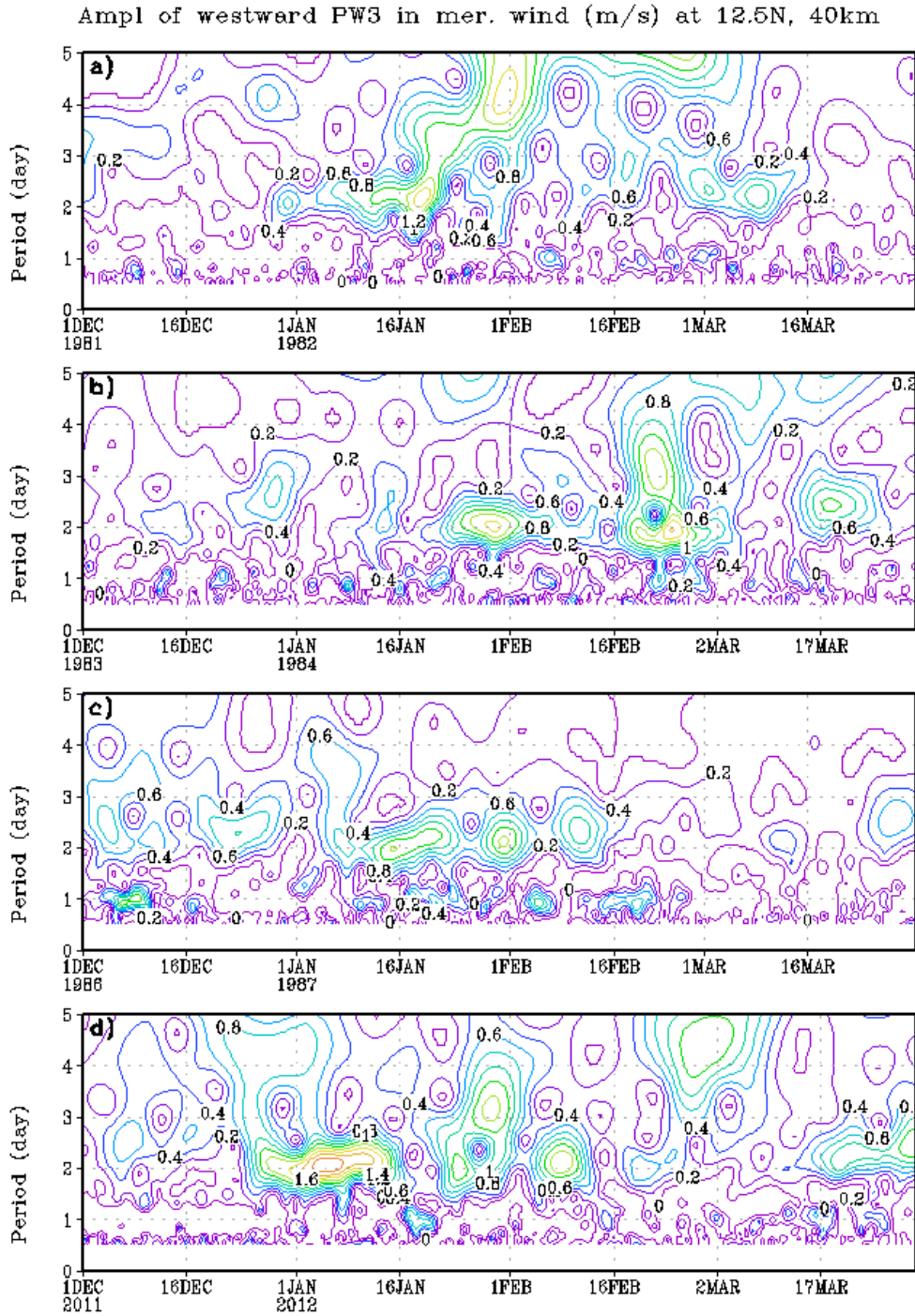


Рис. 25 – аналогично рис. 24, но на  $12.5^\circ$  с.ш.

На  $22.5^\circ$  с.ш. (рис. 26) наименее активно амплитуда изменялась в пери-

од 1986 – 1987 (рис. 26с). Наибольшее значение амплитуды на данной широте наблюдалось в 2011 – 2012 годах, оно составляло 1,6 м/с. Также зимой 2011 – 2012 годов наблюдалось наиболее активное изменение амплитуды двухдневной волны среди выбранных периодов наблюдения.



Ampl of westward PW3 in mer. wind (m/s) at 22.5N, 40km

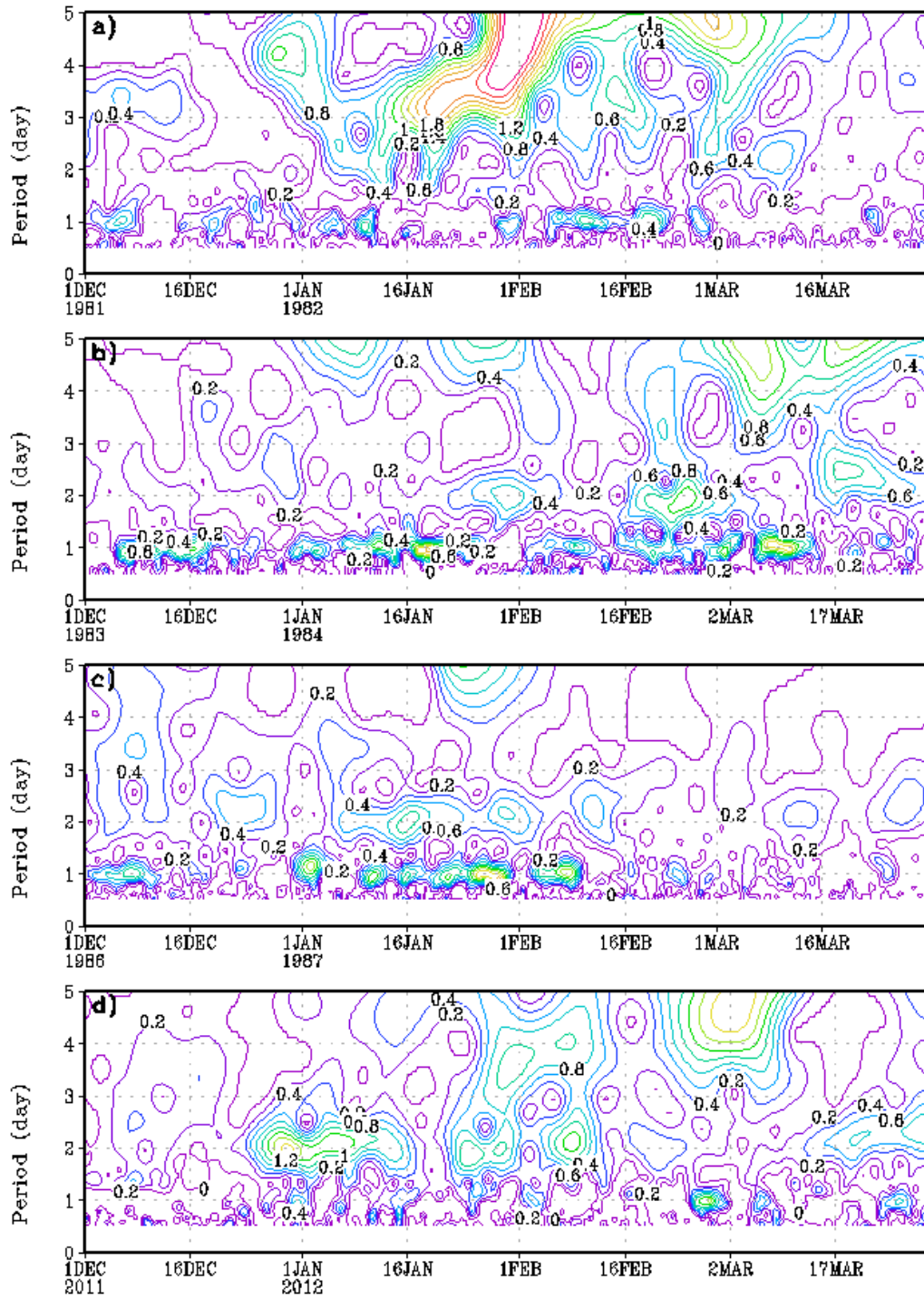


Рис. 26 – аналогично рис. 25, но на 22.5° с.ш.

На основе полученных картинок распределения амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра двухдневной волны на заданных широтах и высоте 40 км для 4 фазы КДК можно сделать следующие выводы:

- Наиболее активно амплитуда 3 гармоники меридиональной составляющей ветра для двухдневной волны изменялась на  $2.5^{\circ}$  ю.ш.
- Наибольшее значение амплитуды 3 гармоники меридиональной составляющей ветра для двухдневной волны было зарегистрировано на  $2.5^{\circ}$  с.ш., оно составляло 2,6 м/с.
- Самым устойчивым относительно амплитудной изменчивости среди выбранных зим оказался период наблюдения с декабря 1986 по март 1987. У данного периода амплитуда на всех выбранных широтах изменялась меньше всего.

## Закключение

По результатам анализа полученных данных за период с 1976 по 2012 годы можно сделать вывод о зависимости двухдневной волны от фазы КДК, так на основе построенных распределений амплитуд 3 гармоники меридиональной составляющей ветра для 6 заданных широт ( $22.5^\circ$  ю.ш.;  $12.5^\circ$  ю.ш.;  $2.5^\circ$  ю.ш.;  $2.5^\circ$  с.ш.;  $12.5^\circ$  с.ш.;  $22.5^\circ$  с.ш.) Северного и Южного полушарий можно утверждать, что:

Значения амплитуд двухдневной волны принимают наибольшие значения в экваториальных широтах и уменьшаются по мере отдаления от экватора. Так, например, в условиях 2 фазы (западной) КДК максимальные значения амплитуд на  $22.5^\circ$  ю.ш. и  $22.5^\circ$  с.ш. составляли 1,8 м/с и увеличивались в среднем на 0,4 м/с по мере приближения к экватору, достигая 3,0-3,4 м/с, и наблюдались в январе и феврале.

В целом для зим в условиях 4 фазы КДК максимумы значений амплитуд наблюдались преимущественно в январе и феврале и составили 1,5-1,8 м/с. Как и в других фазах КДК максимальные амплитуды наблюдались на  $2,5^\circ$  с.ш.

В зимы в условиях 1 и 3 фаз (переходные) КДК максимальные значения амплитуды двухдневной волны наблюдались преимущественно в январе и марте, но максимальная амплитуда в условиях 3 фазы (переходная фаза с западную на восточную) заметно больше, до 3,0-3,2 м/с, тогда как в противоположной фазе – 2,4-2,7 м/с.

Следует отметить, что зимы с наибольшими амплитудами волн, не зависимо от фазы КДК, всегда наблюдались в годы отрицательной фазы ЭНЮК. Это особенно заметно, на широтах:  $22.5^\circ$  ю.ш.,  $22.5^\circ$  с.ш.  $12.5^\circ$  ю.ш. и  $12.5^\circ$  с.ш. В районе экватора в условиях положительной фазы ЭНЮК так же присутствовали большие амплитуды. В условиях нейтральной фазы ЭНЮК амплитуды более сглаженные и меньше по значениям относительно других фаз.

## Список используемой литературы

1 Криволицкий А. А. ВОЛНЫ В АТМОСФЕРЕ // Большая российская энциклопедия. Том 5. Москва, 2006, стр. 649

2 Голямина И. П. АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ // Большая российская энциклопедия. Том 1. Москва, 2005, стр. 380

3 Huang, Y. Y., Zhang, S. D., Yi, F., Huang, C. M., Huang, K. M., Gan, Q., and Gong, Y.: Global climatological variability of quasi-two-day waves revealed by TIMED/SABER observations, *Ann. Geophys.*, 31, 1061–1075, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-1061-2013>, 2013.

4 T.J. Dunkerton, J.A. Anstey, L.J. Gray, MIDDLE ATMOSPHERE | Quasi-Biennial Oscillation, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, Academic Press, 2015, p. 18-25

5 Ракушина Е.В., Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А. И. Применение аппарата естественных ортогональных функций для анализа крупномасштабных динамических процессов в средней атмосфере. Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова № 591. Санкт-Петербург, 2018. 105-123 с.

6 Г. Р. Хайруллина, Н. М. Астафьева Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. ИКИ РАН, Москва, 2011

7 Harada, Y., H. Kamahori, S. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2016: The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 269-302

8 Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, S. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48.

9 Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369–432.

10 Ebita, A., S. Kobayashi, Y. Ota, M. Moriya, R. Kumabe, K. Onogi, Y. Harada, S. Yasui, K. Miyaoka, K. Takahashi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, M. Soma, Y. Oikawa, and T. Ishimizu, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis ‘JRA-55’: An Interim Report. *SOLA*, 7, 149-152. doi:10.2151/sola.2011-038

11 Bengtsson, L., P. Arkin, P. Berrisford, P. Bougeault, C. K. Folland, C. Gordon, K. Haines, K. I. Hodges, P. Jones, P. Kallberg, N. Rayner, A. J. Simmons, D. Stammer, P. W. Thorne, S. Uppala, and R. S. Vose, 2007: The need for a dynamical climate reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 495–501.

12 Haimberger, L., C. Tavalato, and S. Sperka, 2008: Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records--Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. *J. Climate*, 21, 4587–4606.

13 Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Москва-Ижевск: РХД, 2001. 464 с.

14 Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. 2-е изд. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 400 с.

15 И. Я. Новиков, С. Б. Стечкин. Основы теории всплесков // УМН. — 1998. — Т. 53, вып. 6(324). — С. 53–128.

16 G. Hariharan *Wavelet Solutions for Reaction–Diffusion Problems in Science and Engineering* Singapore: Springer, 2019. 196 p.