



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: «Связь индекса осцилляции Маддена-Джулиана с
фазой квазидвухлетнего колебания»

Исполнитель Щинова Раиса Павловна ПМ-Б17-2-3

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

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)

« 8 » июня 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Основные теоретические сведения.....	5
1.1. Понятие осцилляции Маддена-Джулиана	5
1.2. Понятие квазидвухлетней цикличности	8
1.3. Выявление связей между ОМД и КДК	10
1.4. Остаточная меридиональная циркуляция.....	14
Глава 2. Исходные данные и используемые методы.....	18
2.1. Используемые данные	18
2.2. Используемые методы	19
Глава 3. Анализ графических представлений полученных распределений метеорологических данных.....	22
3.1. Соотношение зим по фазам КДК и по индексу ОМД	22
3.2. Построение амплитуд волн с периодом до 20 дней	28
3.3. Построение амплитуд волн с периодом до 2 дней	47
3.4. Построение остаточной меридиональной циркуляции	48
Заключение	51
Список использованных источников	52

Введение

Изучение взаимодействия между тропосферой и стратосферой является актуальной задачей на сегодняшний день. Важно уделять внимание изучению связей между экваториальными явлениями. Учет влияния стратосферных процессов в моделях может улучшить качество долгосрочных прогнозов, что также необходимо.

В данной работе ставится цель изучить влияние индекса осцилляции Маддена-Джулиана на фазу квазидвухлетнего колебания.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить литературные источники по исследуемой теме;
2. Анализ индекса ОМД и фазы КДК в зимние месяцы в Северном полушарии;
3. Выделить зимы с самым большим и самым маленьким индексами ОМД и проанализировать поведение амплитуд стационарных, бегущих на запад и на восток волн с периодом до 20 дней на следующих широтах: 2.5° с.ш., 27.5° с.ш., 62.5° с.ш.;
4. Аналогичная задача ставится для атмосферных мигрирующих приливов;
5. Построить остаточную меридиональную циркуляцию в выбранные ранее годы и определить, характерные особенности переноса в условиях высокого и низкого индекса ОМД и разных фаз КДК;
6. Сделать выводы о связи ОМД и КДК.

Выпускная квалификационная работа состоит из трех глав, 1 таблицы и 44 рисунков.

В первой главе описываются основные сведения об осцилляции Маддена-Джулиана и о квазидвухлетних колебаниях, а также теоретическая основа их взаимосвязи. Также в первой главе приведены сведения об остаточной меридиональной циркуляции.

Во второй главе описываются используемые методы и данные.

В третьей главе представлены результаты по исследованию и их анализ.

Глава 1. Основные теоретические сведения

1.1. Понятие осцилляции Маддена-Джулиана

Осцилляция Маддена – Джулиана (ОМД) является одним из доминирующих колебаний в тропической области атмосферы, которое определяет внутрисезонную изменчивость атмосферных процессов. В современном понимании ОМД – тропическое экваториальное колебание, проявляющееся в возникновении кучевой облачности и в перемещении ее в восточном направлении со средней скоростью около 5 м/с, периодом в 30-60 дней.

ОМД состоит из двух частей, или фаз: одна – с большим количеством осадков (или конвективная), а другая – с малым количеством осадков. Сильная активность ОМД часто рассекает планету на две половины: одну половину в фазе усиленной конвекции и другую половину в фазе подавленной конвекции. Эти две фазы производят противоположные изменения в облаках и осадках и вся эта система (имея два главных противоположных центра действия) распространяется на восток. Расположение конвективных фаз часто группируется в географически обоснованные стадии, которых климатологи выделяют с первой по восьмую, как показано на рис.1.1

Ученые Мадден и Джулиан [1,2] обнаружили наиболее выраженный тропический внутрисезонный режим изменчивости, который сейчас называется осцилляция Маддена-Джулиана (ОМД). ОМД сильно влияет на возникновение многих видов экстремальных погодных условий в тропических и средних широтах, включая наводнения, засухи, сильные снегопады, волны холода и тепла, ураганы и тропические штормы, лесные пожары, аэрозоли, торнадо и т.д. [3,4].

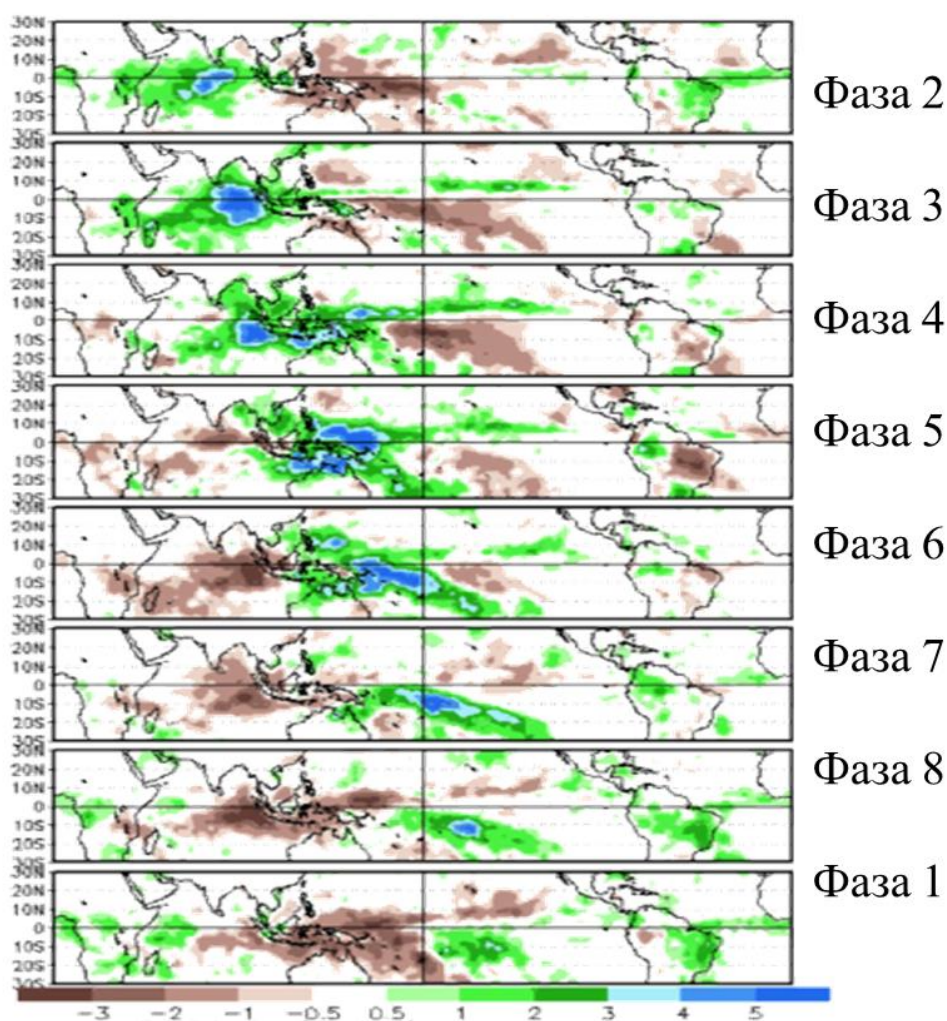


Рис. 1.1. Разница со средним количеством осадков для всех событий ОМД за период 1979-2012 годов за ноябрь-март для восьми фаз, описанных в тексте. Зеленое затенение обозначает количество осадков выше среднего, а коричневое-количество осадков ниже среднего. В первом порядке зеленые области затенения соответствуют степени усиленной конвективной фазы ОМД, а коричневые области затенения соответствуют степени подавленной конвективной фазы ОМД. Обратите внимание на смещение затененных областей на восток с каждой последующей пронумерованной фазой, когда вы смотрите на фигуру сверху вниз.<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-mjo-and-why-do-we-care>

Успешное прогнозирование распространения ОМД жизненно важно для внутрисезонного прогнозирования тропических циклонов, экстремальных погодных явлений, муссонов и Эль-Ниньо южной осцилляции [5]. Преобладающее распространение на восток является наиболее важной особенностью ОМД, но при этом остается большой

проблемой в численном моделировании и прогнозировании для последних трех десятилетий [6].

Одна из трудностей в численном моделировании и прогнозировании ОМД возникает из-за сложного поведения распространения конвективной составляющей ОМД, которая включает в себя другие сложные маломасштабные активности. Как показывает статистический анализ, конвективная масса по средним данным ОМД движется со средней скоростью от ~ 4 м/с до 5 м/с по теплому бассейну Индийского и Тихого океана. Распространение, амплитуда и время жизни конвективных кластеров отдельных ОМД значительно отличается от события к событию.

Крупномасштабные внутрисезонные конвективные аномалии (измеряемые исходящей длинноволновой радиацией (ИДР) и представляющие конвективную оболочку ОМД) демонстрируют различные формы распространения вдоль экваториального пояса; колебания в диапазоне от стационарного состояния до систематического распространения с различными скоростями.

Разнообразие ОМД можно также увидеть из траектории ОМД на диаграмме фазового пространства (рис. 1.2), построенной двумя эмпирическими ортогональными функциями, которые отражают амплитудные фазы и фазы распространения ОМД [7].

Более глубокое понимание причин различий от события к событию имеет решающее значение для изучения моделирования и прогнозирования ОМД в глобальных климатических моделях (ГКМ), для точного прогнозирования будущих изменений ОМД.

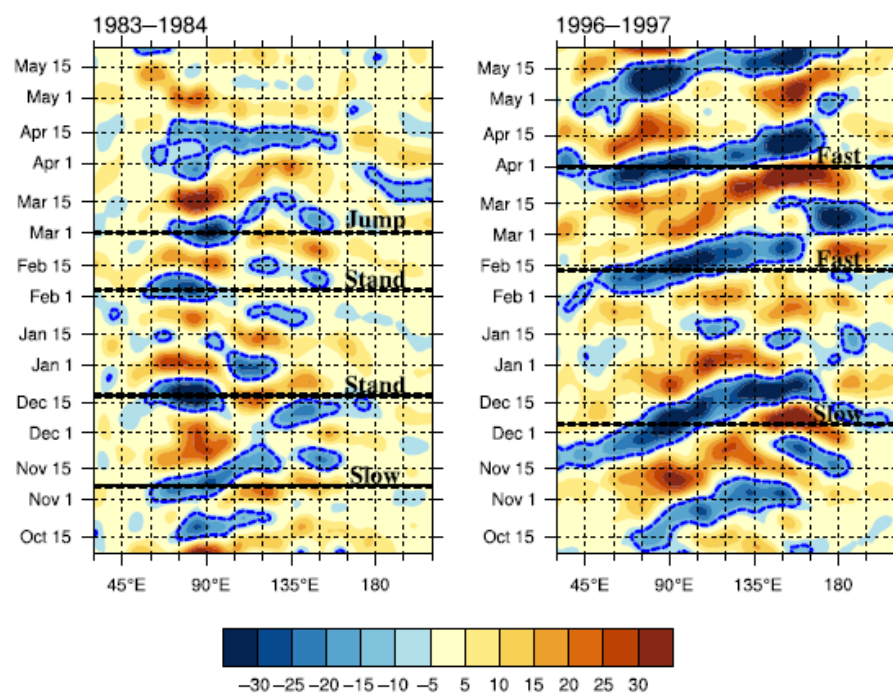


Рис. 1.2. Пример различных моделей распространения ОМД

1.2. Понятие квазидвухлетней цикличности

Квазидвухлетнее колебание (КДК) преобладает в изменчивости экваториальной стратосферы (16-50 км) и легко воспринимается как нисходящий, распространяющийся на восток и на запад ветровой режим, с переменным периодом в среднем около 28 месяцев. По термодинамике, КДК является интересным примером когерентного, колеблющегося среднего потока, который движется распространяющимися волнами с периодами, не связанными с результирующими колебаниями. Хотя КДК является тропическим явлением, оно влияет на стратосферный поток от полюса к полюсу, модулируя эффекты внетропических волн.

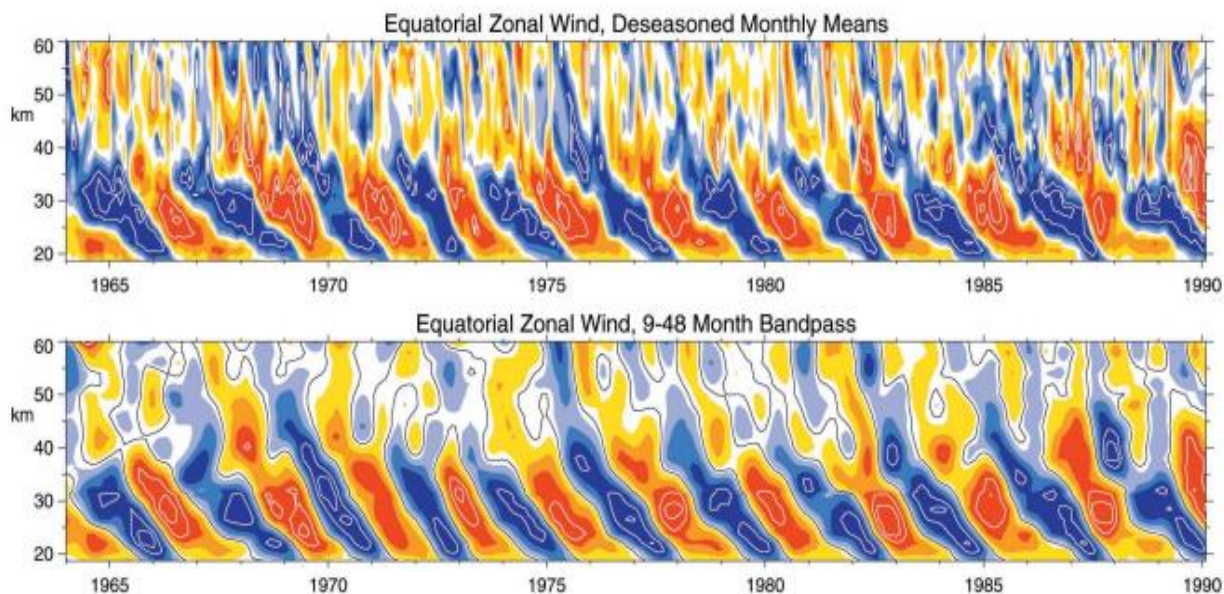


Рис. 1.3. (вверху) Разрез высоты по времени среднемесячной зональной компоненты ветра (м с^{-1}) с удалением сезонного цикла за 1964-1990 годы. Ниже 31 км используются данные экваториальных радиозондов с острова Кантон ($2,8^{\circ}\text{с.ш.}$, январь 1964 года-август 1967 года), островов Ган/Мальдив ($0,7^{\circ}\text{ю.ш.}$, сентябрь 1967 года-декабрь 1975 года) и Сингапура ($1,4^{\circ}\text{с.ш.}$, январь 1976 года-февраль 1990 года). Выше 31 км показаны данные о ракетах с Кваджалейна ($8,7^{\circ}\text{с.ш.}$) и острова Вознесения ($8,0^{\circ}\text{ю.ш.}$). Красный цвет символизирует положительные (западные) ветры.

КДК в поле скорости зонального ветра в стратосфере тропических широт вносит вклад в развитие конвективной облачности тропиков. В некоторых публикациях [16;17] было выявлено, что возмущения меридиональной циркуляции, возникающие во время западной фазы КДК, приводят к уменьшению высоты тропопаузы и ее нагреву, а во внетропических широтах к увеличению высоты тропопаузы и ее охлаждению, обратное происходит во время восточной фазы КДК. Исходя из этого, предполагают, что при восточной фазе КДК в тропической области развивается мощная кучевая облачность, а во время западной фазы КДК слабая облачность [18; 19].

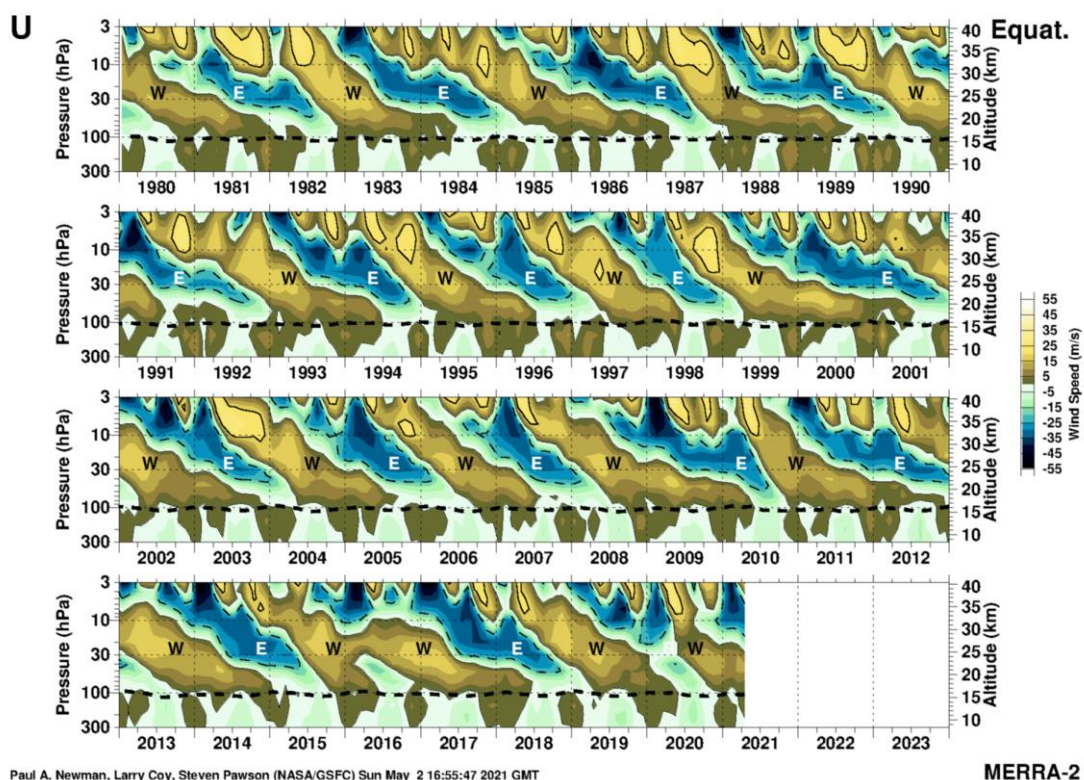


Рис. 1.4. Среднемесячный зональный ветер, Толстая пунктирная линия показывает тропопазу, рассчитанную по скорости теплового затухания. Отмеченные восточная и западная фазы получены из сингапурского зонда выше. https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html

1.3. Выявление связей между ОМД и КДК

До настоящего времени большая часть диагностического анализа ОМД была сосредоточена на некотором усреднении, с использованием различных статистических инструментов [8]. Различные мезомасштабные структуры и активность экваториальных волн, входящих в зону влияния ОМД, были задокументированы в предыдущих публикациях [9,10], однако сложные формы и причины разнообразия ОМД с точки зрения конвективной составляющей ОМД не рассматривались систематически. Раскрытие разнообразия ОМД требует тщательного изучения большого числа

отдельных событий и рассмотрения ОМД как конвективно-связанной динамической системы.

Отслеживая внутрисезонные аномалии на последовательных пяти картах аномалий исходящей длинноволновой радиацией (ИДР), связанных с конвекцией ОМД, авторы работы [11] обнаруживают различные пути распространения, которые меняются в зависимости от сезона. В последнее время в некоторых исследованиях [12,14] были сопоставлены характеристики распространения и не распространения ОМД. В других исследованиях было отмечено, что распространение ОМД происходит с различной скоростью [13,15]. Однако систематическое и объективное разграничение разнообразия ОМД с точки зрения характера распространения, интенсивности и связанных с этим дальних связей и средств воздействия пока не установлено.

Крупномасштабная тропическая конвекция играет важнейшую роль в регуляции не только тропической гидрологии и климата, но также влияет на погоду и климат вне тропиков через дальние связи. Например, межсезонные и сезонные вариации организованной конвекции через экваториальную западную часть Тихого океана часто вызывает волны Россби, которые распространяются от северной субтропической части Тихого океана до Аляски, а далее и к Флориде, влияя на осадки и температуру воздуха по всей Северной Америке и северной части Тихого океана. Такие взаимосвязи особенно хорошо определены во время бореальных зим (Декабрь – Февраль) получая возможность прогнозировать погодные условия и климат на более долгий период.

Тропическая конвекция, особенно вокруг Юго-Восточной Азии, не статична, и сильно различается по времени и локации. В сезонных временных рамках, межсезонная конвекция в основном модулируется Эль-Ниньо Южным колебанием (ЭНЮК), которая является главной причиной сезонной вариативности в тропической тропосфере и океане. Например, в зиму в условиях Ла-Нинья, межсезонная тропическая конвекция на территории всей Юго-Восточной Азии становятся сильнее, пока в то же

время она же слабее в центральных и восточных частях Тихого океана. Всё это из-за усиления циркуляций Уолкера в ответ на усиленный градиент температуры поверхности моря между востоком и западом в тропической части Тихого океана. Обратное возможно только во время зим в условиях Эль-Ниньо. Несмотря на свою относительно незначительную и менее устойчивую величину, документально подтверждено, что среднесезонная конвекция тропической зоны также подвержена влиянию стратосферных квазидвухлетних колебаний (КДК), которые являются ведущей частью межгодовых колебаний в тропической стратосфере. Как исследования в области наблюдений, так и исследования в области моделирования показали наличие связанных с КДК сезонных изменений в конвекции и осадках.

ЭНЮК и КДК регулируют не только межсезонные тропические конвекции, но также внесезонные конвективные активности, такие как осцилляция Маддена-Джулиана, во время бореальной зимы. Пространственная структура и амплитуда ОМД меняются из года в год в зависимости от ЭНЮК и КДК. Эти изменения могут потом модифицировать тропические и внетропические связи. Однако, в отличие от ЭНЮК, влияние КДК на активность ОМД и относящиеся к нему дальние связи не были точно задокументированы до недавнего времени.

Внутрисезонная и межсезонная вариативность была проанализирована. Выявили, что межгодовые вариации внутрисезонной конвекции, особенно в экваториальной части Тихого океана, в основном контролируются ЭНЮК с небольшим вкладом КДК. С точки зрения линейной связи, ЭНЮК объясняет около 50%-70% межгодовой амплитуды ИДР в среднем во время бореальных зим по периметру Юго-Восточной Азии и западной части Тихого Океана.

Таблица 1.

Корреляции внутрисезонной ИДР, усредненные по всей Юго-Восточной Азии (15° ю.ш.- 5° с.ш., 110° - 140° в.д.), с амплитудой ОМД.

		OLR (Maritime Continent)				MJO amplitude			
		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
ENSO	Niño-3	0.84*	0.47*	0.70*	0.83*	-0.08	-0.19	0.04	-0.14
	Niño-3.4	0.85*	0.64*	0.83*	0.86*	-0.01	0.00	0.20	-0.15
	Niño-4	0.74*	0.69*	0.79*	0.81*	0.11	0.26	0.24	-0.08
QBO	U10	0.02	0.15	0.11	-0.03	0.63*	0.20	-0.01	-0.18
	U20	-0.04	0.09	0.20	0.23	0.33	0.22	-0.17	-0.18
	U30	0.04	0.02	0.10	0.32	-0.16	0.19	-0.23	-0.03
	U50	0.18	-0.04	-0.05	0.18	-0.57*	-0.09	-0.09	0.10

ЭНЮК также влияет на пространственное распределение межсезонной конвекции, например, ОМД. Активность ОМД, как правило, распространяется дальше в центральный Тихий Океан во время зим Эль-Ниньо и обратно во время зим Ла-Нинья. Однако ЭНЮК не изменяет на систематической основе общую амплитуду ОМД. Амплитуда ОМД вместо этого сильно модулируется КДК. С точки зрения линейной связи, КДК объясняет около 30%-40% межгодовой вариации амплитуды ИДР ОМД. Такая связь между КДК и ОМД также встречается в других свойствах ОМД (например, большая амплитуда, медленное распространение и более длительный период ОМД во время зимы восточной фазы КДК). Вынужденные дальние связи ОМД также более распространены во время зимы восточной фазы КДК. Хотя динамический и физический механизм неясен, это взаимодействие КДК-ОМД согласуется с изменением температурной стратификации в верхней тропосфере. Однако большое значение могут иметь и другие процессы, такие, как инерционная неустойчивость, процессы фазовых переходов влаги и изменения в обратных радиационных процессах.

Для определения точного механизма(ов) необходимы дальнейшие исследования с использованием как наблюдений, так и с помощью численного моделирования. Выводы некоторых исследователей указывают

на то, что для лучшего понимания и прогнозирования ОМД следует принимать во внимание не только тропосферную, но и стратосферную циркуляцию. Кроме того, предполагается, что межсезонное прогнозирование ОМД и связанных с ним процессов может быть чувствительным к среднему стратосферному состоянию. Предварительный результат действительно показал, что ОМД лучше прогнозируется во время зимы в условиях восточной фазы КДК, чем зимы в условиях западной фазы КДК. Учитывая тот факт, что КДК высоко предсказуем, этот результат также открывает новые возможности сезонного и межгодового прогнозирования ОМД.

1.4. Остаточная меридиональная циркуляция

В стратосфере остаточная меридиональная циркуляция не отличается от циркуляции Брюэра-Добсона. Циркуляция Брюэра-Добсона относится к общей схеме атмосферной циркуляции тропического воздуха в тропосфере, поднимающегося в стратосферу и затем движущегося к полюсу по мере опускания. Основы циркуляции были впервые предложены Гордоном Добсоном и Аланом Брюэром. Термин «Циркуляция Брюэра-Добсона» был впервые введен в 1963 году.

Циркуляционный перенос газовых примесей между средней атмосферой и тропосферой оказывает влияние на общее распределение озона и других атмосферных газовых составляющих. Делается предположение, что общая циркуляция атмосферы (ОЦА) является главнейшим механизмом глобального переноса газовых примесей в атмосфере. На данный момент времени хорошо известно, что при применении подхода в рамках обычной эйлеровской средней меридиональной циркуляции, т.е. при зональном осреднении меридионального и высотного циркуляционных потоков, в условиях стационарности и горизонтальной однородности рассматриваемых

полей, в уравнениях динамики исчезают волновые источники импульса и тепла за счет адвективных потоков импульса и тепла.

Компенсация волновых и средних течений при эйлеровском подходе происходит и в уравнении неразрывности для долго остающихся в атмосфере газовых составляющих, и, таким образом, применение эйлеровской средней меридиональной циркуляции неэффективно для вычисления такого рода переноса. Чтобы преодолеть указанный недостаток, можно использовать другой подход к анализу зонально осредненной циркуляции, который обеспечивает более эффективную диагностику волнового воздействия на средний поток, а также возможность расчета процессов переноса газовых примесей в меридиональной плоскости. Этот подход представляет собой формулировку преобразованной эйлеровской средней циркуляции. В основании метода лежит тот факт, что поскольку некоторый рассматриваемый объем воздуха поднимется до большей высоты равновесного состояния только тогда, когда его потенциальная температура возрастает при неадиабатическом нагреве, то остаточная меридиональная циркуляция, связанная с неадиабатическими процессами, напрямую связана со средним потоком меридиональной массы. Рассчитанная при помощи такого подхода остаточная циркуляция позволяет оценить именно ту часть среднего потока, вклад которой в адиабатическое изменение температуры воздуха не компенсируется дивергенцией индуцированного волной потока тепла.

Остаточная циркуляция представляется как преобразование эйлеровской средней циркуляции. Меридиональную и вертикальную компоненты остаточной средней циркуляции можно получить по формулам:

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \rho^{-1} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \right)$$

$$\overline{w^*} = \overline{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\cos \varphi \overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \right)$$

где:

черта сверху обозначает зонально осредненные величины,

штрихи — отклонения величин от зонально осредненных значений;

v и w — меридиональный и вертикальный ветер;

ρ — плотность атмосферы;

z — вертикальная координата;

θ — потенциальная температура;

φ — широта;

a — радиус Земли.

$$\overline{v^*} = \overline{v} - \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\frac{\overline{v' \theta'}}{H} + \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right)$$

$$\overline{w^*} = \overline{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\sin \varphi \overline{v' \theta'} + \cos \varphi \left(\frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial \varphi} - \frac{\overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z \partial \varphi} \right) \right)$$

В отличие от обычной средней эйлеровской циркуляции остаточная вертикальная скорость для осредненных по времени условий пропорциональна скорости неадиабатического нагрева. Она приблизительно представляет собой неадиабатическую циркуляцию в меридиональной плоскости, то есть циркуляцию, при которой происходит неадиабатический нагрев поднимающегося объема воздуха и неадиабатическое охлаждение опускающегося и при этом их потенциальная температура приспособливается к локальной среде. Таким образом, осредненная по

времени остаточная меридиональная циркуляция аппроксимирует среднее движение воздушных масс и, следовательно, в отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции представляет собой аппроксимацию среднего адвективного перемещения газовых составляющих.

Глава 2. Исходные данные и используемые методы

2.1. Используемые данные

В работе для определения амплитуды волн с периодом до 2 и до 20 дней использовались массивы с данными ре-анализа JRA-55 (ре-анализ Японского метеорологического агентства). Это второй ре-анализ Японского метеорологического агентства, в котором устранены неточности его предыдущего ре-анализа JRA-25. Для устранения ошибок была использована новая радиационная схема, увеличено пространственное разрешение, концентрация парниковых газов учитывалась с изменением по времени. Данные ре-анализа JRA-55 доступны с 1958 года, с момента проведения регулярных запусков радиозондов по всему миру, по настоящее время. JRA-55 является первым комплексным ре-анализом, охватывающим вторую половину прошлого века после ре-анализа ERA-40 [20], и первым ре-анализом, предоставляющим данные с 1958 года полученные с помощью четырехмерного вариационного анализа данных. Данные ассимилированы на регулярную широтно-долготную сетку с шагом по широте и долготе 1,25 градуса, по времени шаг составляет 6 часов.

В работе для определения остаточной меридиональной циркуляции использовались массивы с данными ре-анализа MERRA (Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications) [21] – проект Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (США, НАСА). Архив данных MERRA получен с помощью современных систем наблюдения. Для определения массивов данных ре-анализа MERRA применяется современная система усвоения данных GEOS-5 (Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5) и ассимиляционная система GSI (Gridpoint Statistical Interpolation). Большое количество параметров ре-анализа интегрированных в массив MERRA,

обеспечивают надежную базу для изучения климатической и внутрисезонной изменчивости климата. Данные MERRA схожи с другими глобальными массивами ре-анализа, но с некоторыми отличиями, такими как: более высокое разрешение по времени, более высокое разрешение по пространству. Данные ассимилированы в широтно-долготную сетку с разрешением 1,25 на 1,25 градуса по широте и долготе, с шагом по времени 3 часа.

2.2. Используемые методы

Были взяты рассчитанные в диссертации Кандиевой К.К. индексы осцилляции ОМД зим с 1979 по 2016 года, рассчитанные с помощью аппарата естественных ортогональных функций по формуле:

$$\text{Амплитуда} = \left[\sqrt{KP1^2 + KP2^2} \right]$$

$$\text{Фаза} = \left[\tan^{-1} \left(\frac{KP2}{KP1} \right) \right]$$

где:

KP1 и KP2 – коэффициенты разложения (первые два коэффициента, отражающие индекс ОМД). Коэффициенты разложения вычисляются по усредненным в области тропических широт данным о скорости зонального ветра в верхней и нижней тропосфере (200 гПа и 850 гПа) и данным о УДР путем проецирования ежедневных значений на собственные векторы. Собственные векторы (их также называют ЕОФ) вычисляются для ковариационной матрицы, сформированной из ежедневных значений полей скорости ветра и УДР.

Фазы КДК также рассчитаны ранее с помощью аппарата естественных ортогональных функций в зимы с 1979 по 2016 гг. 8 фаз, полученных с помощью ЕОФ, сгруппировали в 4 фазы:

1. 2-3 западная
2. 4-5 переходная с западной на восточную
3. 6-7 восточная
4. 8-1 переходная с восточной на западную

Для получения амплитуд стоячих, бегущих на запад и бегущих на восток волн с периодом до 2 и до 20 дней, использовали вейвлет-анализ. Вейвлет-анализ выявляет два характерных масштаба, периодичность следования ячеек смены знака указывает на периодический характер сигналов, их пространственное распределение показывает специфику каждого из сигналов.

Вейвлет-преобразование (ВП) широко используется для анализа сигналов. ВП одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a).

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Множитель $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы функций от временного масштаба (a). Для заданных значений параметров a и b функция $\psi_{ab}(t)$ и есть вейвлет, порождаемый материнским вейвлетом $\psi(t)$.

За счет изменения масштаба (увеличение a приводит к сужению фурье-спектра функции $\psi_{ab}(t)$), вейвлеты способны выявлять различие в характеристиках на разных шкалах (частотах), а за счет сдвига – проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем исследуемом интервале. Поэтому, при анализе нестационарных сигналов, за счет свойства локальности вейвлетов, получают существенное преимущество перед преобразованием Фурье, которое дает только глобальные сведения о частотах (масштабах) анализируемого сигнала, так как используемая при этом система функций (комплексная экспонента или синусы и косинусы) определена на бесконечном интервале.

Для построения широтно-высотного распределения остаточной меридиональной циркуляции использовались формулы из работы А. В. Коваля по расчету остаточной меридиональной циркуляции по данным модели средней и верхней атмосферы, которые были указаны в первой главе.

Глава 3. Анализ графических представлений полученных распределений метеорологических данных

3.1. Соотношение зим по фазам КДК и по индексу ОМД

Определялось, сколько зим, и с какими индексами было в ту или иную фазу КДК. Например, на рисунке 3.1 представлены зимы, в которых во все зимние месяцы наблюдалась только западная фаза КДК (верхняя панель), на нижней панели рисунка зимы в условиях, когда происходила смена фазы с западной на переходную (с западной на восточную).

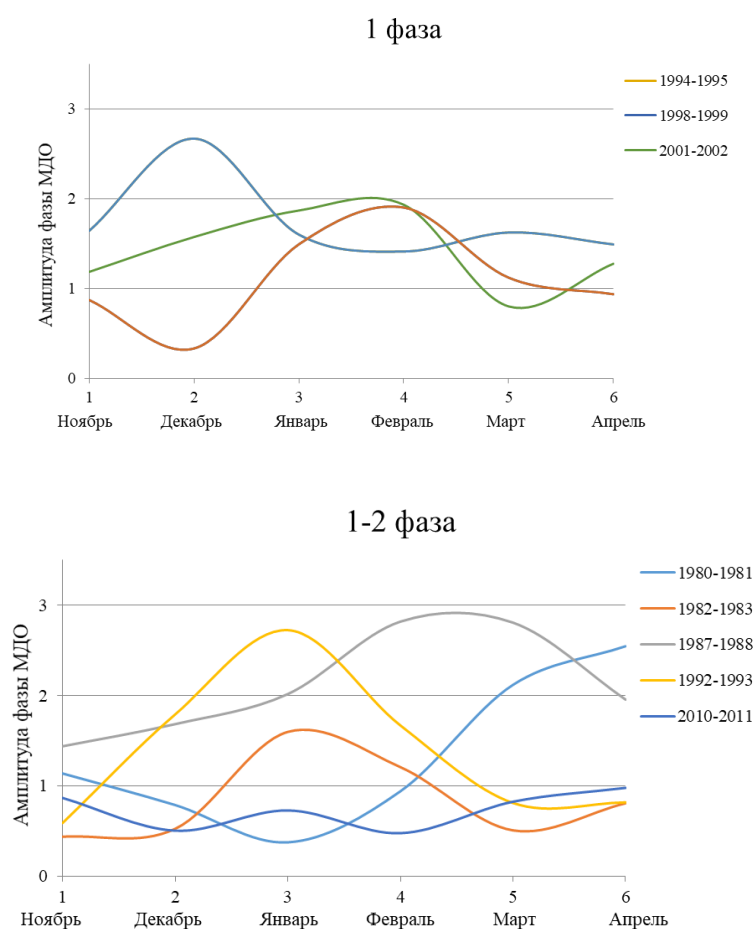


Рис. 3.1. Года, попадающие в западную (1) фазу, и года, в которые присутствует западная фаза (1) и переходная с западной на восточную фазу (2)

По полученным графикам ясно, что исключительно к первой фазе КДК можно отнести всего несколько лет, определенных зависимостей в изменении индекса ОМД из-за небольшого количества лет не прослеживается. Больше лет относится к первой и переходной на восточную фазу цикличности, но также определенных закономерностей не прослеживается, индекс был высокий в феврале 1988 года и в январе 1993 года.

Аналогичные графики были получены для зим в условиях только второй фазы КДК (переходной с западной на восточную) и для зим в условиях, когда эта переходная фаза сменилась классической – восточной (рисунок 3.2). Такие же распределения представлены на рисунках 3.3 и 3.4, но уже для зим в условиях других фаз КДК.

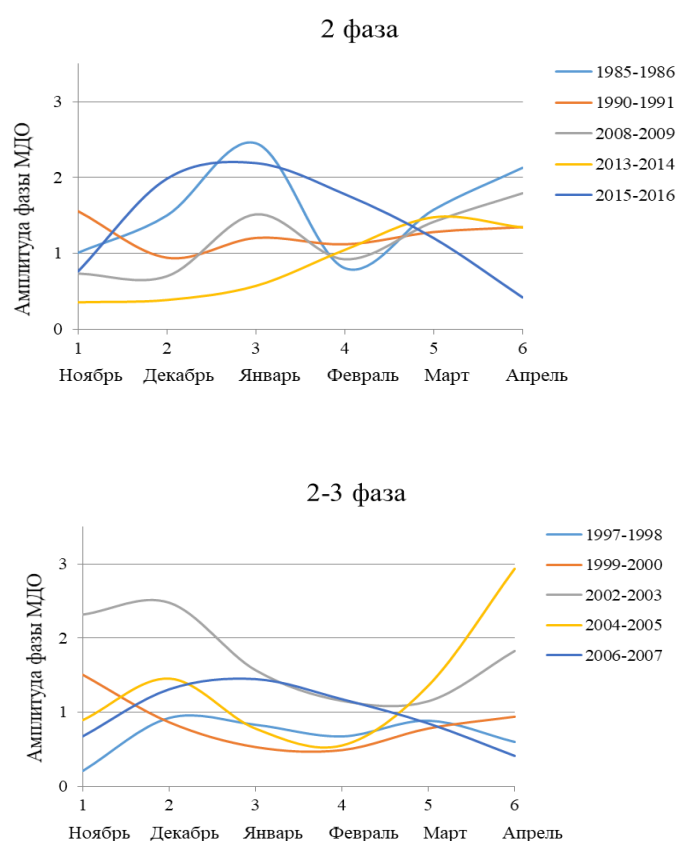


Рис. 3.2. Года, попадающие в переходную с западной на восточную фазу (2), и года, в которые присутствует переходная с западной на восточную фазу (2) и восточная (3) фаза

По полученным кривым с рис. 3.2 можно заметить, что в зимы только с переходной фазой индекс осцилляции ОМД почти всегда небольшой, при этом прослеживается определенный минимум в феврале, но не во все годы, из-за небольшого количества лет нет возможности сделать какие-либо выводы относительно этого минимума. В годы, которые относятся к переходной и восточной фазе КДК, также прослеживается некий минимум индекса ОМД, при этом индекс остается относительно небольшим.

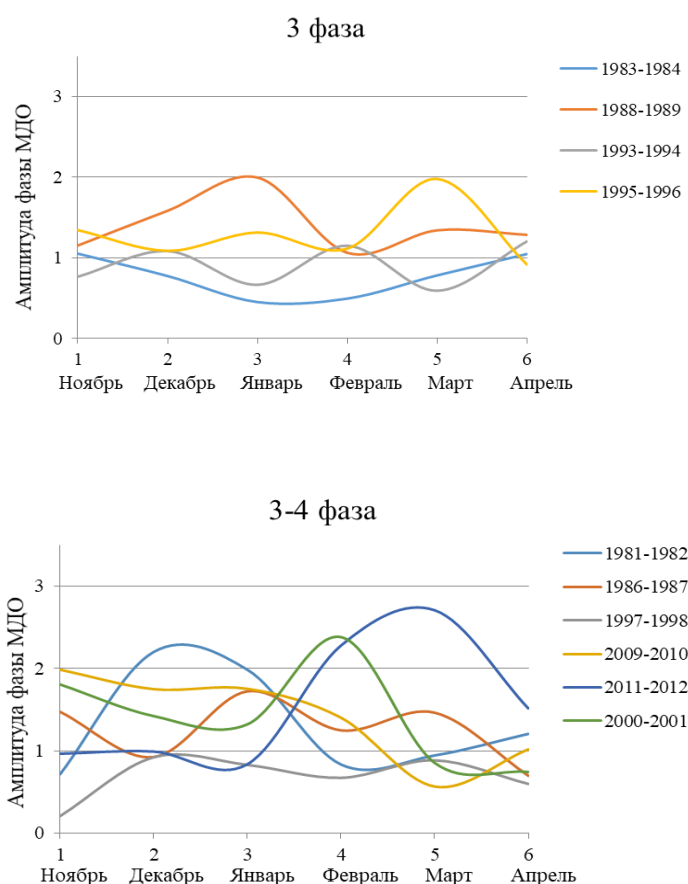


Рис. 3.3. Зимы, в которые присутствует только восточная фаза(3) и зимы, в которые присутствует восточная (3) и переходная с восточной на западную (4) фаза КДК

По графику с только восточной фазой можно также заметить сходимость значений индекса в феврале, но также не во все годы. Также

видно, что мало лет попадает исключительно в восточную фазу КДК. Однако, в зимы с 3 и 4 фазой, попадает больше лет, определенных минимумов и максимумов не прослеживается, есть зимы как с высоким индексом ОМД, так и с низким.

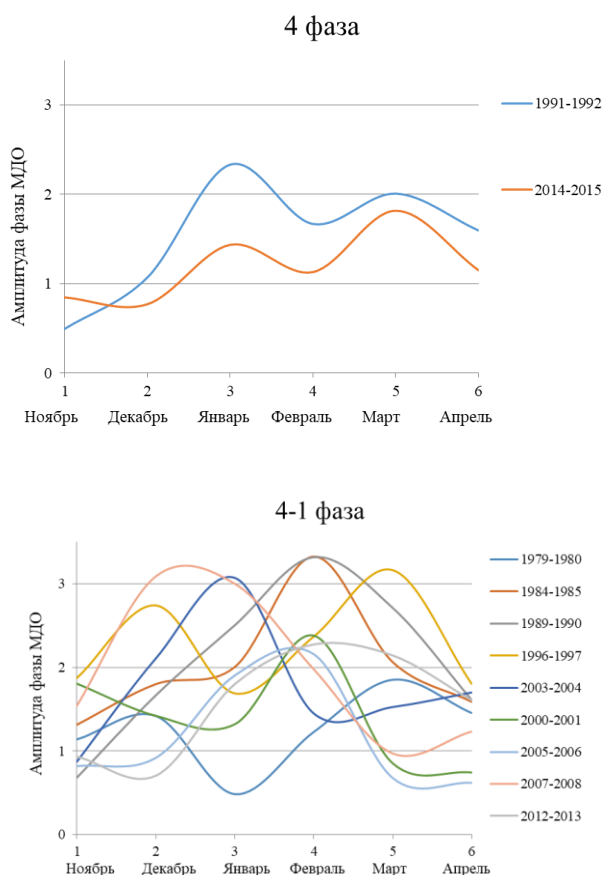


Рис. 3.4. Зимы, в которые присутствует только переходная к западной фаза (4) и зимы, в которые присутствует переходная с восточной на западную (4) и западная (1) фазы КДК

К зимам с присутствием только 4 фазы относится очень мало лет, определенных зависимостей не прослеживается. К зимам, в которые присутствует переходная и западная фаза КДК, напротив, относится наибольшее количество лет. Самые максимальные значения индекса ОМД наблюдались именно в эти периоды, хотя минимумы и максимумы ОМД в целом у всех лет разные.

Было рассчитано количество месяцев с высокой амплитудой ОМД в каждую фазу. К высоким индексам отнесли все месяцы, в которые амплитуда была больше 1.81 и 2.51, получили результат, представленный на рис. 3.5.

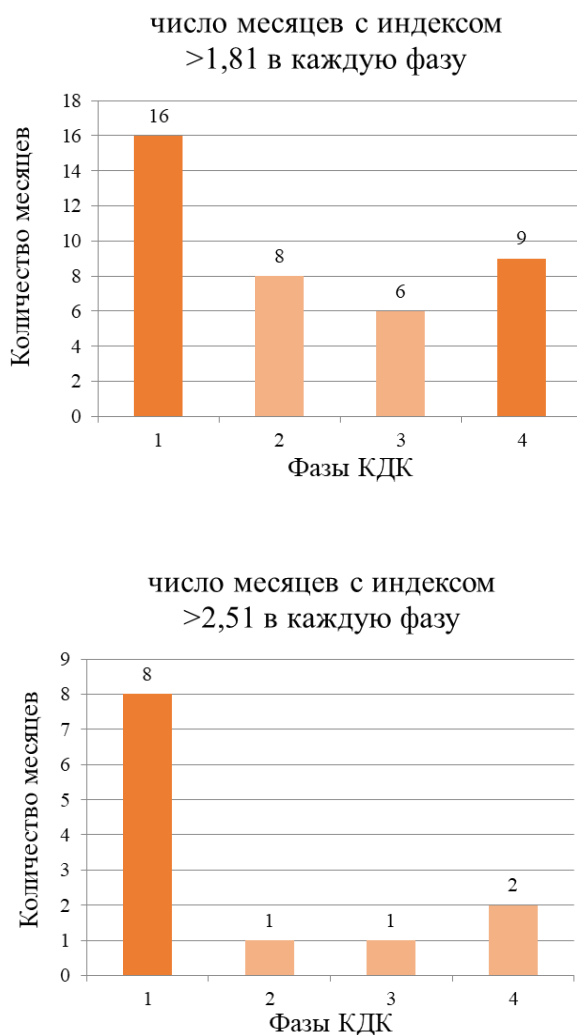


Рис. 3.5. Количество месяцев с индексом, превышающим 1.81 и 2.51 в каждую фазу КДК

По данным диаграммы видно, что наибольшее число месяцев с высоким индексом приходится на западную фазу КДК, при этом общее распределение с индексом больше 2.5 отличается от распределения с индексом больше 1.81.

Также было рассчитано количество месяцев с низкой амплитудой ОМД в каждую фазу квазидвухлетнего колебания. К низким значениям

отнесли все месяцы, когда индекс был меньше 1.21 и 0.61, получили результат, представленный на рис. 3.6.

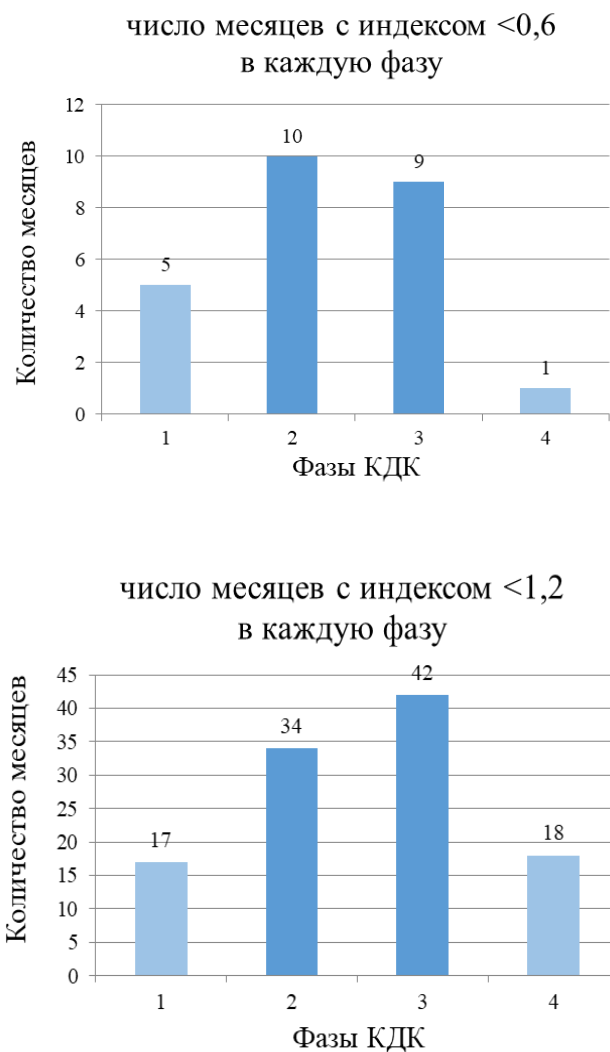


Рис. 3.6. Количество месяцев с индексом, ниже 1.2 и 0.6 в каждую фазу КДК

По данным гистограммы видно, что наибольшее число месяцев с низким индексом ОМД приходится на переходную с западной на восточную (2) и восточную (3) фазы КДК. При этом общее распределение также различно: в месяцы с индексом меньше 1.2 наибольшее число случаев приходится на восточную фазу, а в месяцы с индексом меньше 0.6

наибольшее число случаев приходится на переходную с западной на восточную фазу КДК.

Исходя из полученных результатов, выбрали зимы с наибольшим числом месяцев с высоким и низким индексами. К зимам с высоким индексом ОМД отнесли следующие периоды:

1. 1980-1981 гг.
2. 1984-1985 гг.
3. 1987-1988 гг.
4. 1989-1990 гг.
5. 1996-1997 гг.
6. 2003-2004 гг.
7. 2007-2008 гг.

К зимам с низким индексом отнесли:

1. 1991-1992 гг.
2. 1997-1998 гг.
3. 2013-2014 гг.

3.2. Построение амплитуд волн с периодом до 20 дней

Для выбранных ранее зим построили амплитуды волн с периодом до 20 дней для стоячей, бегущих на запад и на восток волн. Для анализа решили рассматривать широты 2.5°с.ш. , 27.5°с.ш. и 62.5°с.ш.

Построено изменение индекса ОМД (левая шкала) и фазы КДК (правая шкала) в течение одного зимнего периода для всех выбранных зим с высоким индексом (рис. 3.7, рис 3.10, рис 3.13, рис 3.16, рис 3.19, рис 3.22, рис 3.25) и с низким индексом (рис 3.28, рис 3.31, рис 3.34).

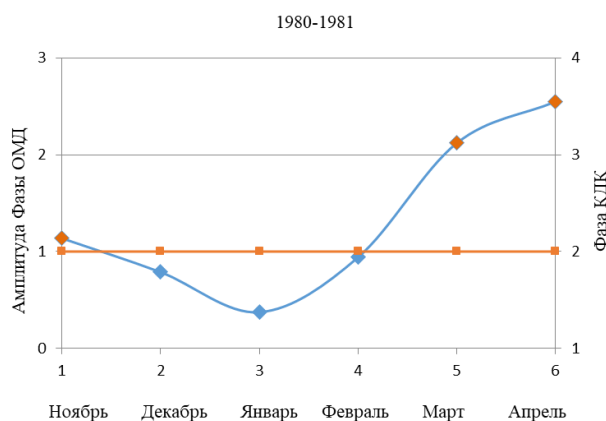


Рис. 3.7. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1980-1981 гг.

В первый выбранный зимний период, где был высокий индекс ОМД, фаза КДК не меняется, при этом значения индекса ОМД меняются значительно, от 0,5 и до 2,5.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.8) амплитуда стоячей волны максимальна в феврале и марте, в бегущей на запад волне амплитуда максимальна в марте, а в бегущей на восток волне значения амплитуд слишком малы.

На 27.5° с.ш. (рис. 3.9 левая панель) амплитуды стоячей и бегущей на восток волн слишком малы, в бегущей на запад волне максимум значений приходится на март. На 62.5° с.ш. (рис. 3.9 правая панель) максимальные значения наблюдаются в феврале. В бегущих на запад и на восток волнах значения амплитуд не столь высоки.

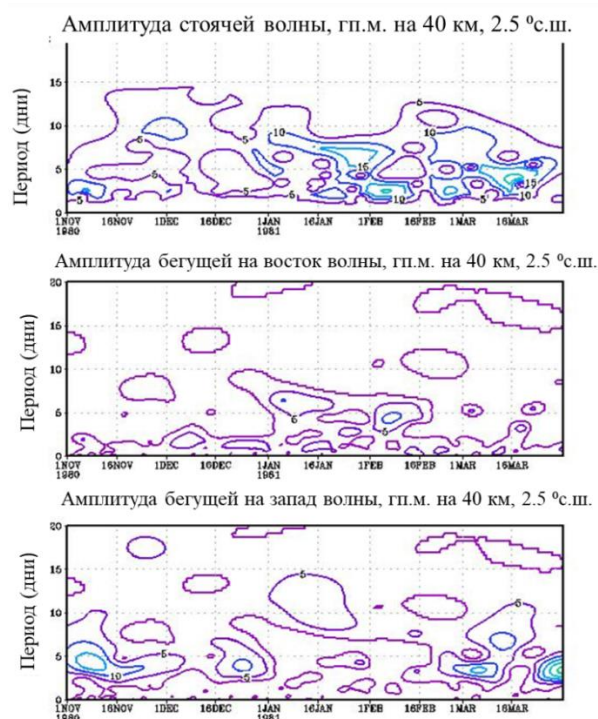


Рис. 3.8. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5°с.ш. в зимний период 1980-1981 гг.

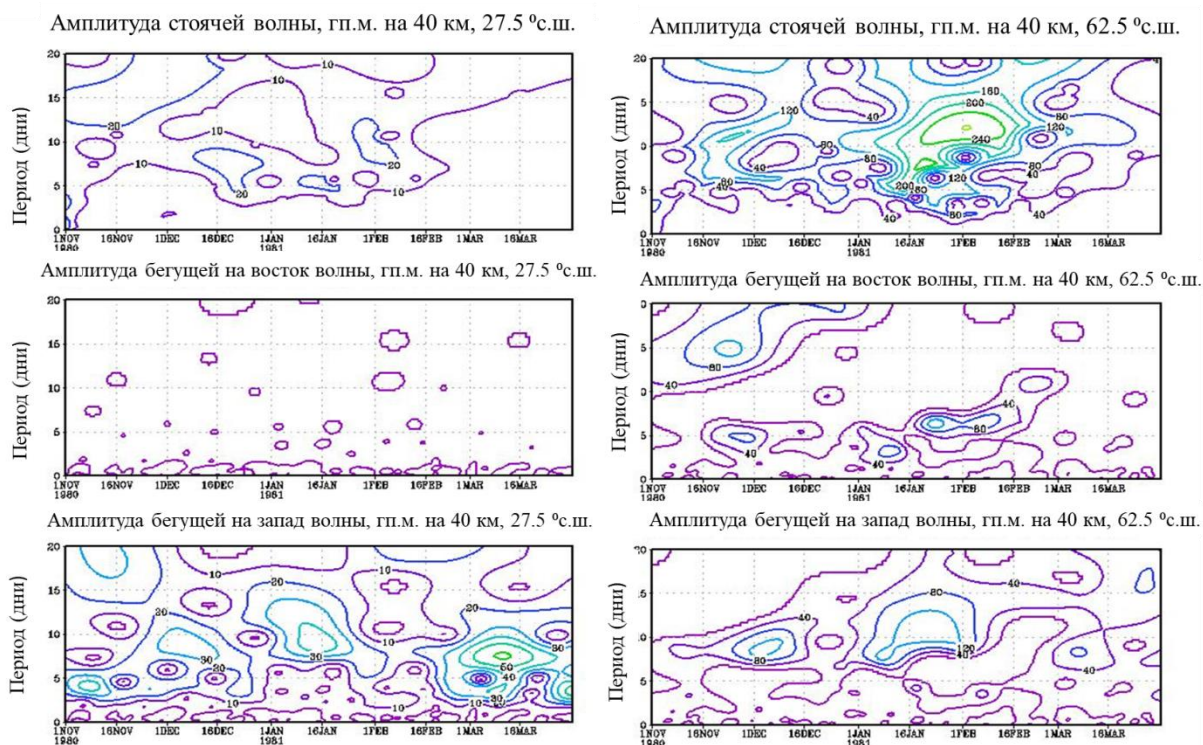


Рис. 3.9. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5°с.ш. (слева) и на 62.5°с.ш. (справа) в зимний период 1980-1981 гг.

В следующую зиму 1984-1985 с большим индексом ОМД (рис. 3.10.) фаза КДК меняется в декабре с переходной с восточной на западную фазы (4) на «классическую» западную (1). Амплитуда ОМД максимальна в феврале.

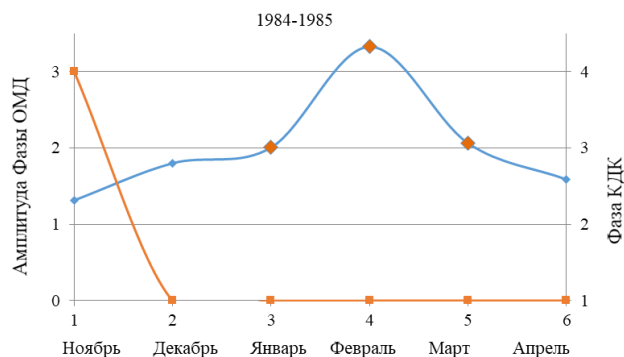


Рис. 3.10. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1984-1985 гг.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.11) амплитуда стоячей волны не имеет четкого максимума, в бегущих на запад и на восток волнах значения амплитуд небольшие, 5-10 м.

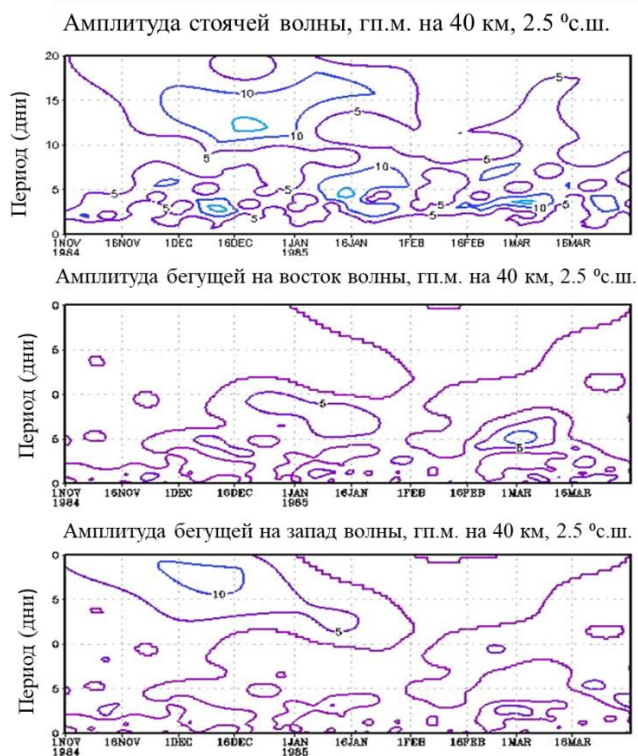


Рис. 3.11. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5° с.ш. в зимний период 1984-1985 гг.

На 27.5° с.ш. (рис. 3.12 левая панель) амплитуды всех волн слишком малы. На 62.5° с.ш. (рис. 3.12 правая панель) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в декабре и в бегущей на запад волнах в январе. Амплитуды в бегущей на восток волне небольшие 40-80 м.

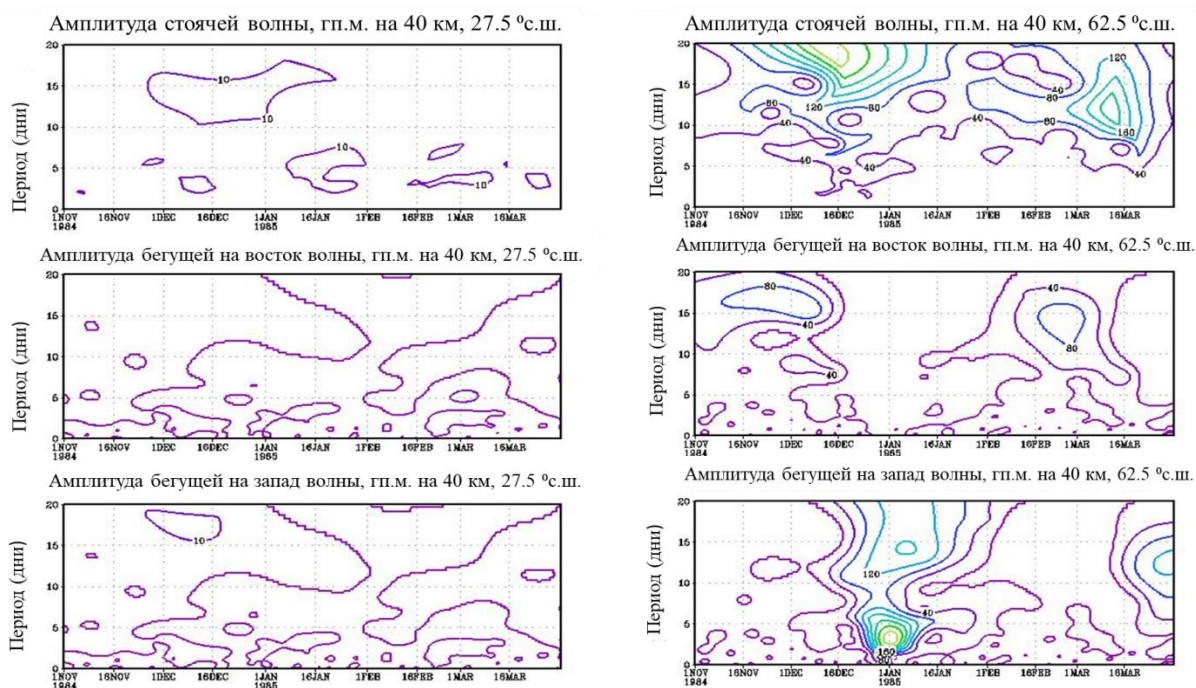


Рис. 3.12. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5° с.ш. (слева) и на 62.5° с.ш. (справа) в зимний период 1984-1985 гг.

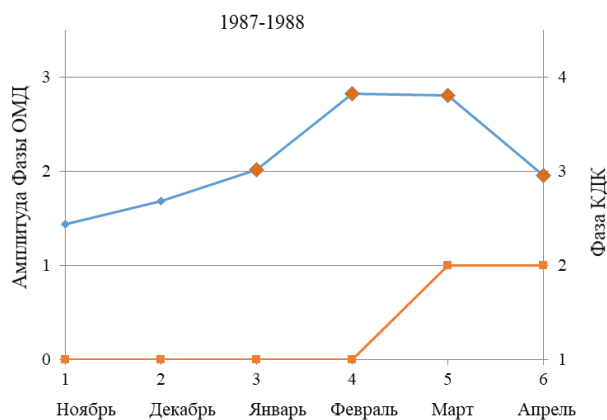


Рис. 3.13. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1987-1988 гг.

В зимний период 1987-1988 гг. фаза КДК меняется с западной на переходную (с западной на восточную) в марте, при этом амплитуда ОМД высокая на всем временном интервале с максимумом в феврале.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.14) амплитуда стоячей волны имеет максимум в марте, в бегущей на восток волне присутствует увеличение в январе и феврале, в бегущей на запад волне амплитуды небольшие. По рис. 3.15 на 27.5° с.ш. (слева) амплитуда стоячей волны имеет максимум в феврале, в бегущей на запад волне максимум амплитуд в декабре. На 62.5° с.ш. (справа) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в ноябре и в бегущей на запад волне в декабре и феврале.

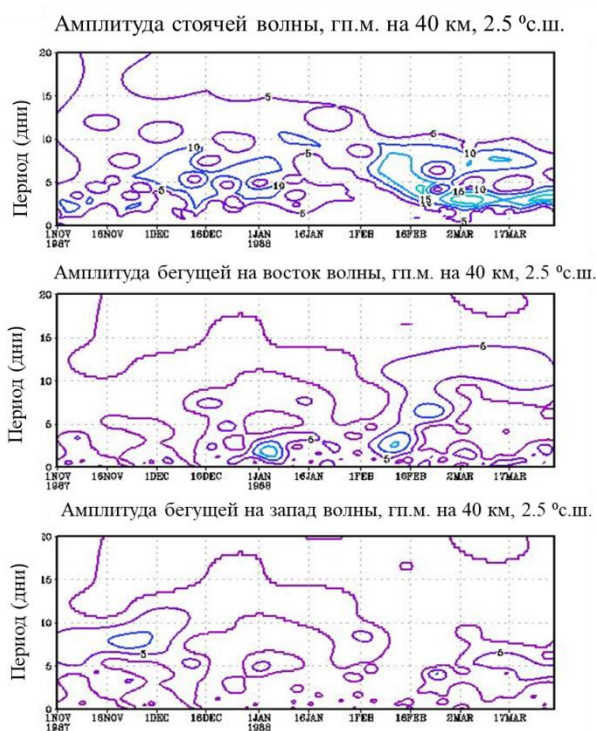


Рис. 3.14. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5° с.ш. в зимний период 1987-1988 гг.

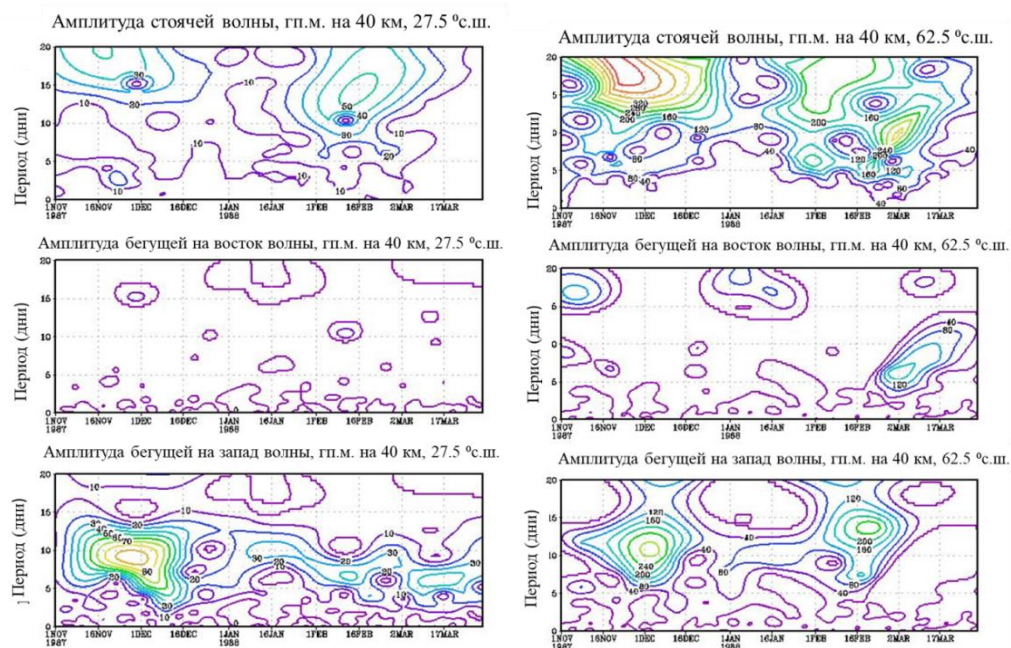


Рис. 3.15. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5⁰с.ш. и на 62.5⁰с.ш. в зимний период 1987-1988 гг.

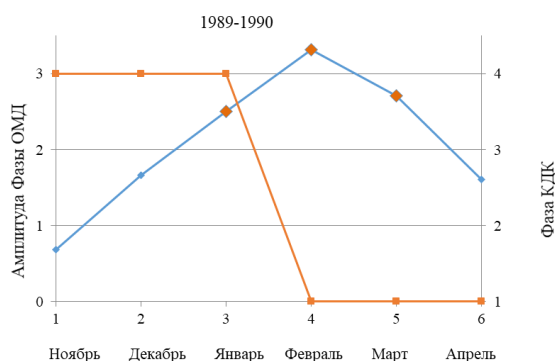


Рис. 3.16. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1989-1990 гг.

В зимний период 1989-1990 гг. фаза КДК меняется с переходной с восточной на западную фазы (4) на западную в феврале, при этом амплитуда ОМД меняется значительно с максимумом в феврале.

На 2.5⁰с.ш. (рис. 3.17) амплитуда стоячей волны имеет максимум в феврале, в бегущих на восток и на запад волнах амплитуды небольшие.

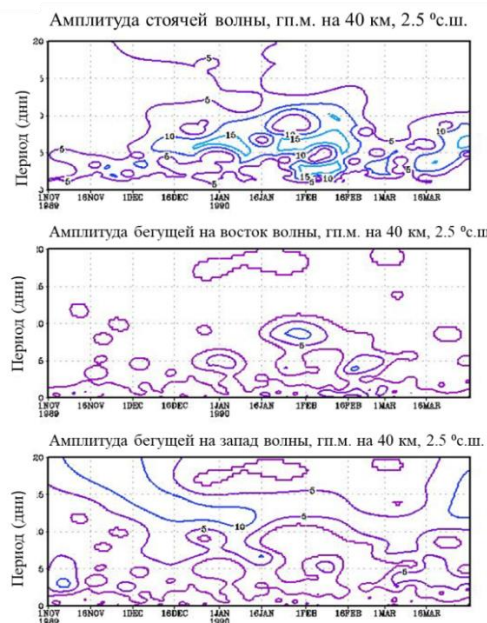


Рис. 3.17. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5°с.ш. в зимний период 1989-1990 гг.

Амплитуды на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. представлены на рис. 3.18.

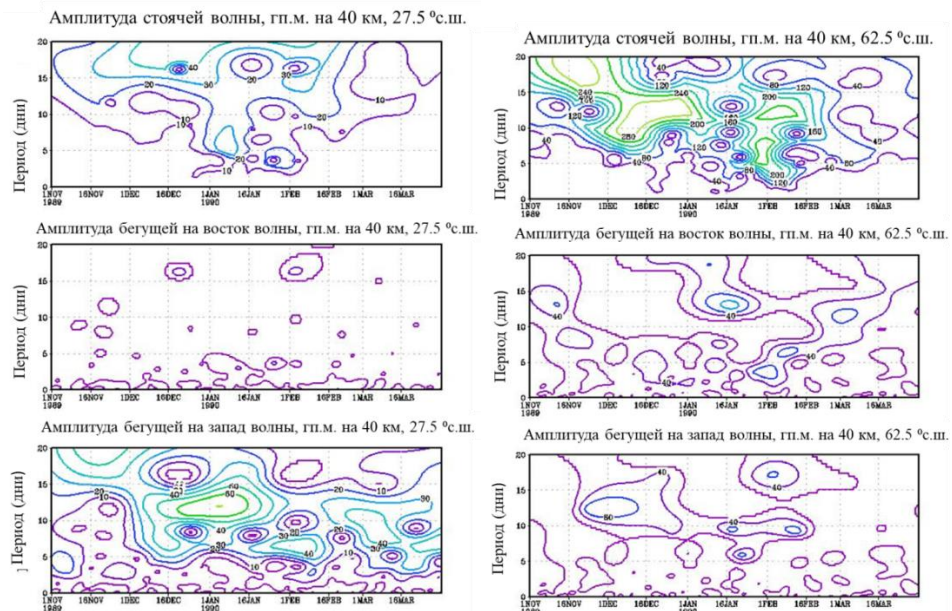


Рис. 3.18. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. в зимний период 1989-1990 гг.

На 27.5° с.ш. амплитуда стоячей волны не имеет определенного максимума, в бегущей на запад волне максимум амплитуд в январе. На 62.5° с.ш. максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в ноябре и декабре, в бегущих на запад и на восток волнах амплитуды небольшие.

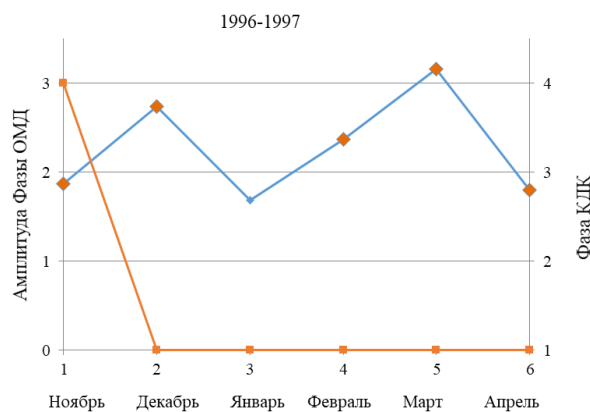


Рис. 3.19. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1996-1997 гг.

В зимний период 1996-1997 гг. фаза КДК меняется с переходной на западную в декабре, при этом амплитуда фазы ОМД остается высокой на всем промежутке с максимумом в марте.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.20) амплитуда стоячей волны имеет максимум в декабре, в бегущих на восток и на запад волнах амплитуды небольшие.

На 27.5° с.ш. (рис. 3.21 левая панель) амплитуда стоячей волны максимальна в феврале, но при этом небольшая, в бегущей на запад волне максимум амплитуд в марте. На 62.5° с.ш. (рис. 3.21 правая панель) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в январе, в бегущих на запад и на восток волнах максимум значений в феврале.

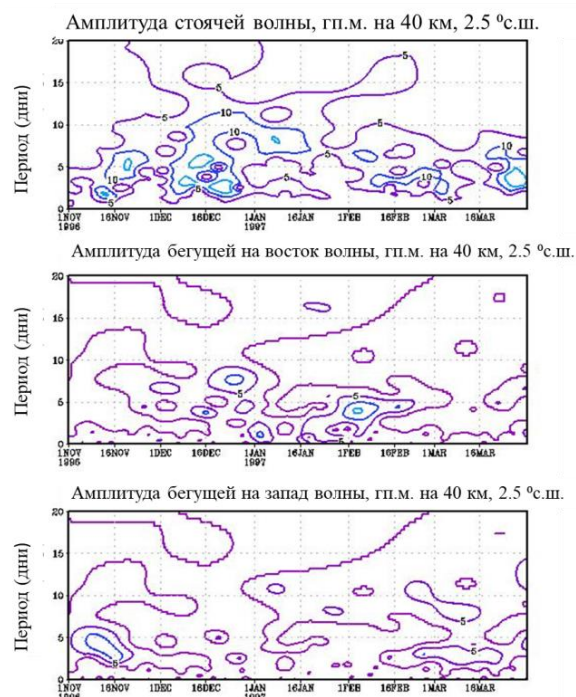


Рис. 3.20. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5⁰с.ш. в зимний период 1996-1997 гг.

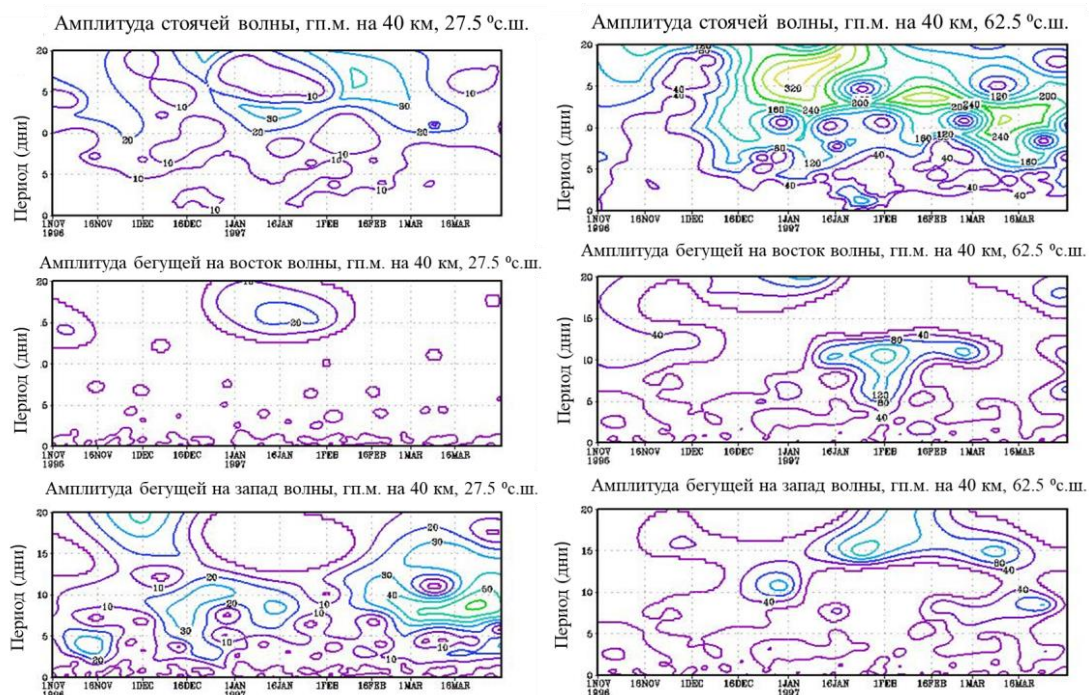


Рис. 3.21. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5⁰с.ш. и на 62.5⁰с.ш. в зимний период 1996-1997 гг.

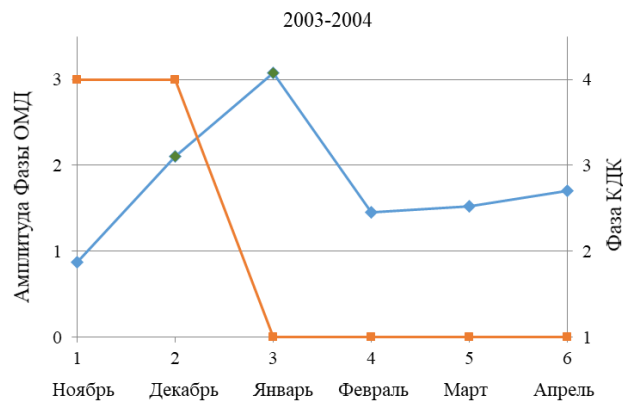


Рис. 3.22. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 2003-2004 гг.

В зимний период 2003-2004 гг. фаза КДК меняется с переходной на западную в январе. Индекс ОМД также имеет максимум в январе и остается высоким почти на всем промежутке.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.23) амплитуда стоячей волны имеет максимум в феврале, в бегущих на восток и на запад волнах амплитуды небольшие.

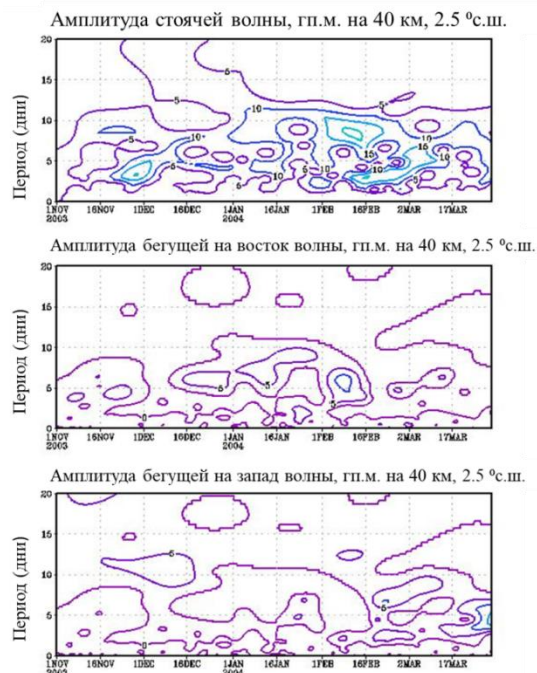


Рис. 3.23. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5° с.ш. в зимний период 2003-2004 гг.

По рис. 3.24 на 27.5°с.ш. (слева) амплитуда стоячей волны максимальна в декабре, но при этом небольшая, в бегущей на запад волне максимум амплитуд в марте; на 62.5°с.ш. (справа) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в ноябре, в бегущей на запад волне максимальные значения в декабре, а в бегущей на восток – в марте, но при этом значения амплитуд небольшие.

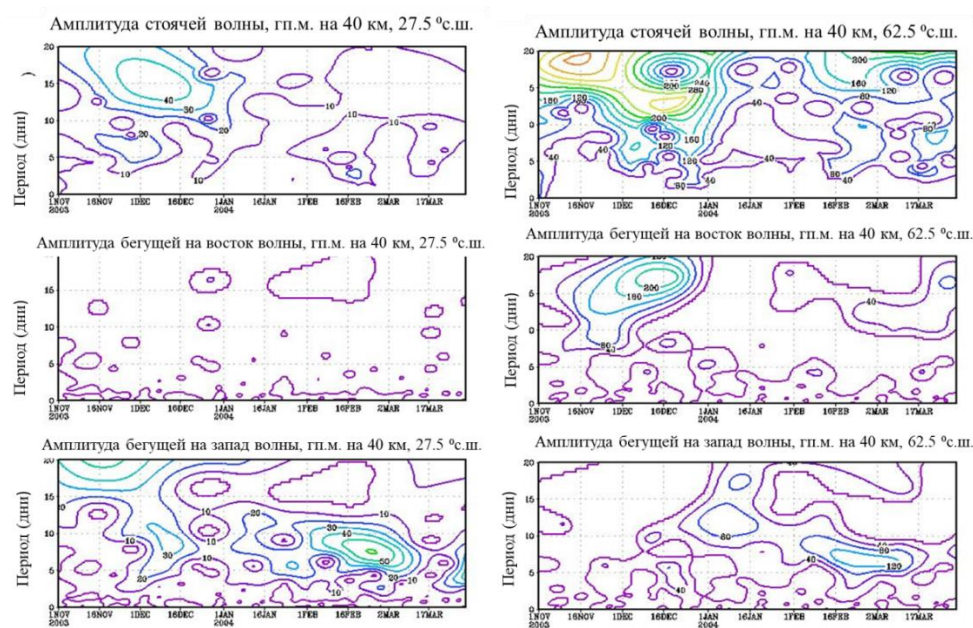


Рис. 3.24. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. в зимний период 2003-2004 гг.

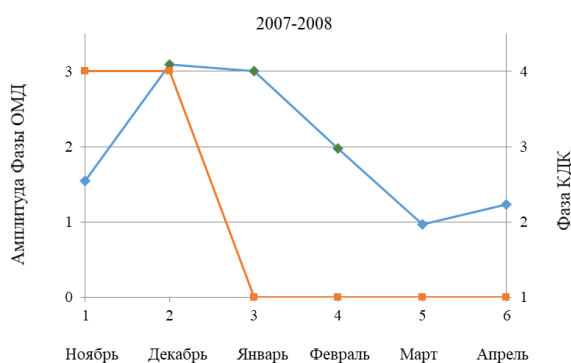


Рис. 3.25. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 2007-2008 гг.

В зимний период 2007-2008 гг. фаза КДК меняется с переходной на западную в январе, при этом амплитуда фазы ОМД остается относительно высокой на всем промежутке с максимумом в декабре.

На 2.5° с.ш. (рис. 3.26) амплитуда стоячей волны имеет максимум в феврале и марте, в бегущих на восток и на запад волнах амплитуды небольшие. По рис. 3.27 (слева) на 27.5° с.ш. амплитуда стоячей волны максимальна в январе, но при этом небольшая, в бегущей на запад волне максимум амплитуд в декабре. На 62.5° с.ш. (справа) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в феврале, в бегущей на запад волне максимум в январе, а в бегущей на восток – в марте.

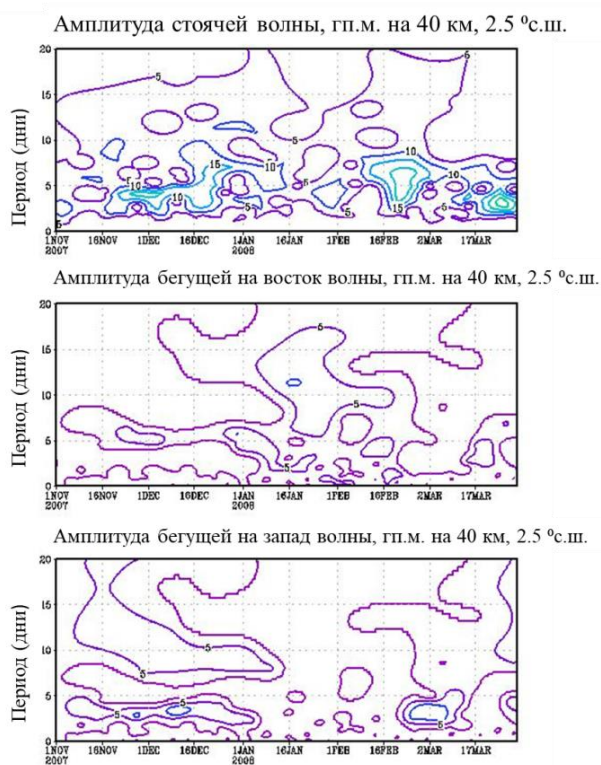


Рис. 3.26. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5° с.ш. в зимний период 2007-2008 гг.

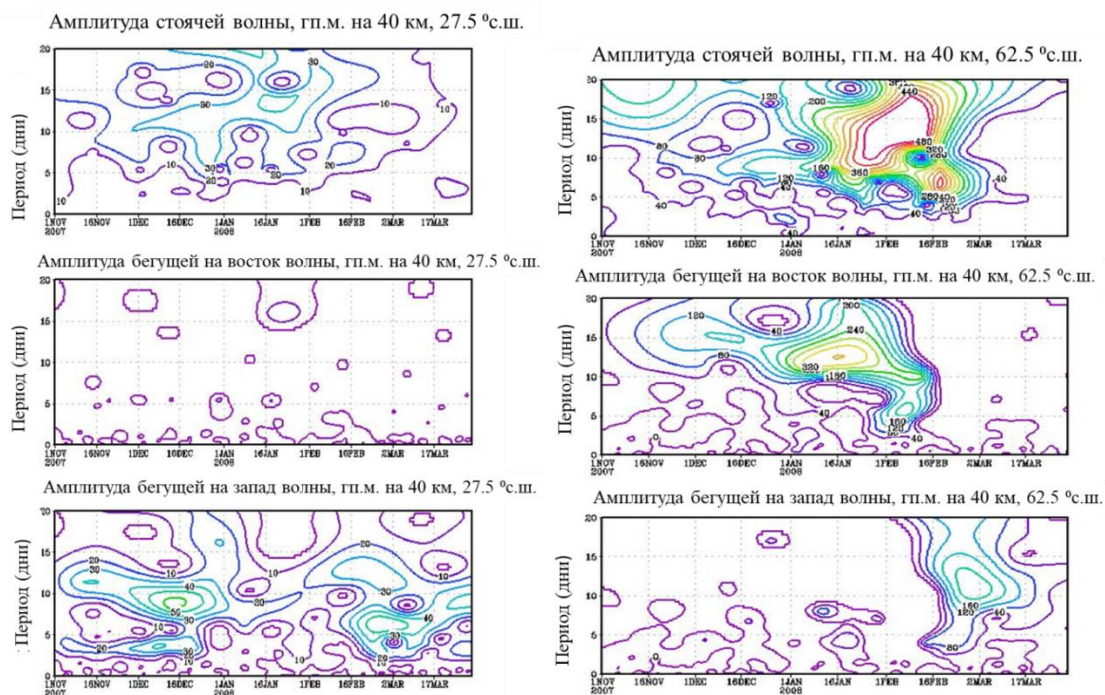


Рис. 3.27. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5⁰с.ш. и на 62.5⁰с.ш. в зимний период 2007-2008 гг.

Для лет с низким индексом ОМД:

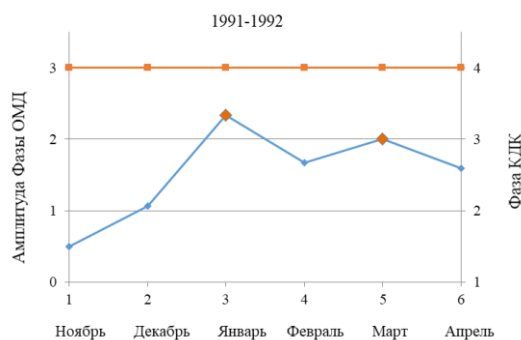


Рис. 3.28. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1991-1992 гг.

В зимний период 1991-1992 гг. фаза КДК остается постоянной. Амплитуда ОМД при этом меняется значительно, но нет сильно высоких значений.

На 2.5°с.ш. (рис. 3.29) амплитуда стоячей волны имеет максимум в январе; в бегущих на восток и на запад волнах амплитуды небольшие.

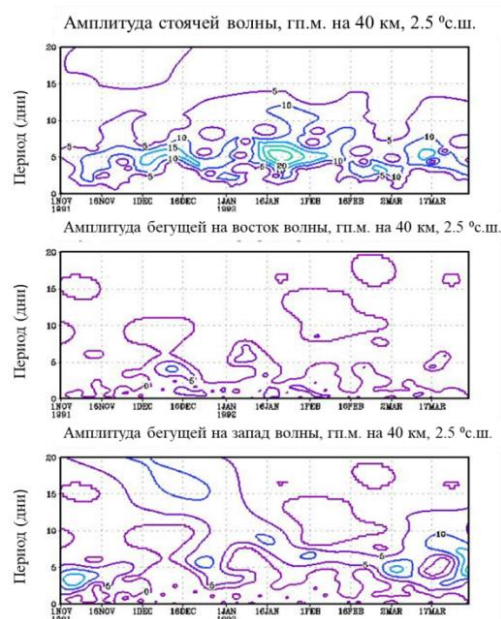


Рис. 3.29. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5°с.ш. в зимний период 1991-1992 гг.

Амплитуды на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. представлены на рис. 3.30.

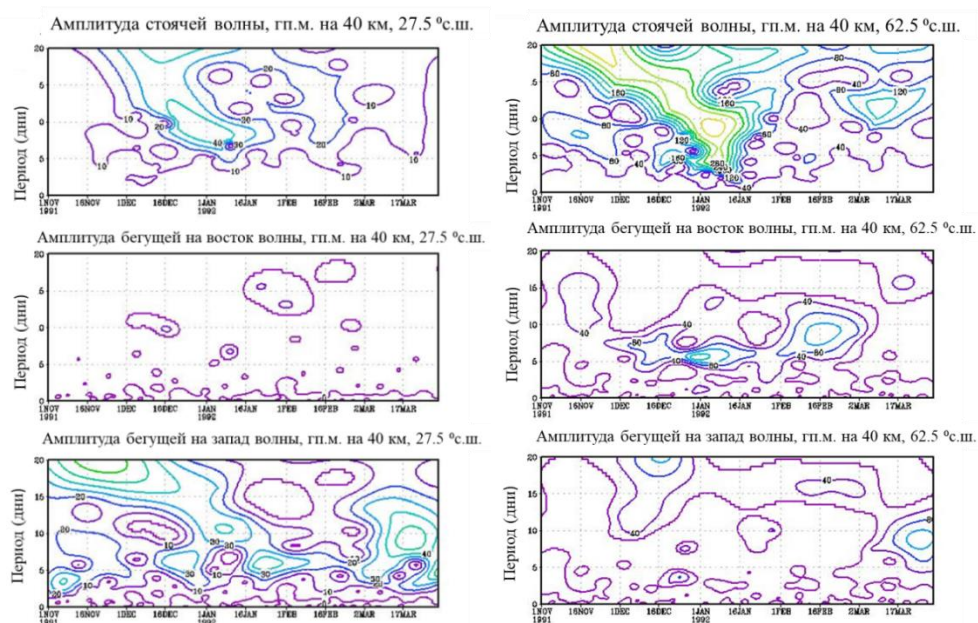


Рис. 3.30. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. в зимний период 1991-1992 гг.

По рис. 3.30 на 27.5°с.ш. (слева) амплитуда стоячей волны максимальна в январе, в бегущей на запад волне максимум ноябре, но при этом высокие значения также на всем периоде. На 62.5°с.ш. (справа) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в январе, в бегущей на запад волне - в январе, а в бегущей на восток – в марте.

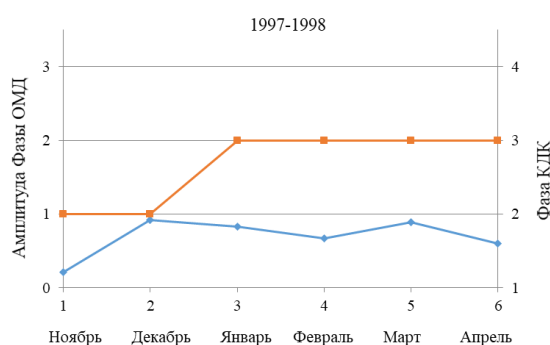


Рис. 3.31. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 1997-1998 гг.

В зимний период 1997-1998 гг. фаза КДК меняется с западной на переходную в январе. Амплитуда ОМД при этом меняется незначительно и остается низкой на всем промежутке.

На 2.5°с.ш. (рис. 3.32) амплитуда стоячей волны имеет максимум в феврале и марте, в бегущей на восток волне амплитуды небольшие, в бегущей на запад волне максимум также в марте.

На 27.5°с.ш. (рис. 3.33 левая панель) амплитуда стоячей волны максимальна в январе, в бегущей на запад волне нет определенного максимума, высокие значения амплитуд сохраняются почти на всем промежутке. На 62.5°с.ш. (рис. 3.33 левая панель) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в декабре, в бегущих на запад и на восток волнах значения амплитуд небольшие.

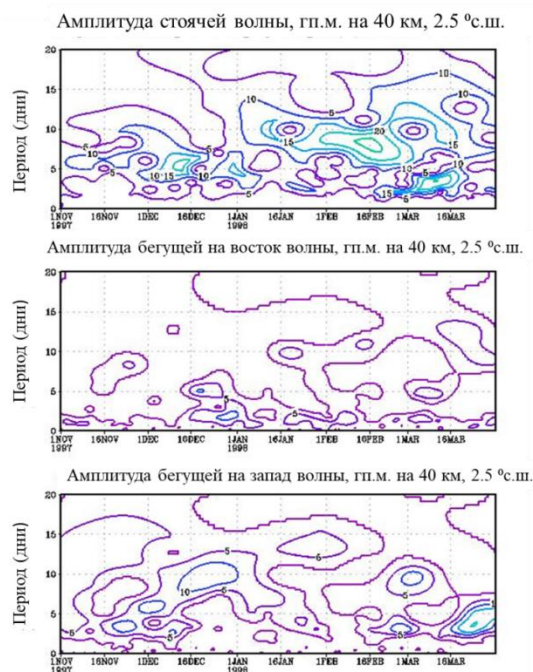


Рис. 3.32. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5⁰с.ш. в зимний период 1997-1998 гг.

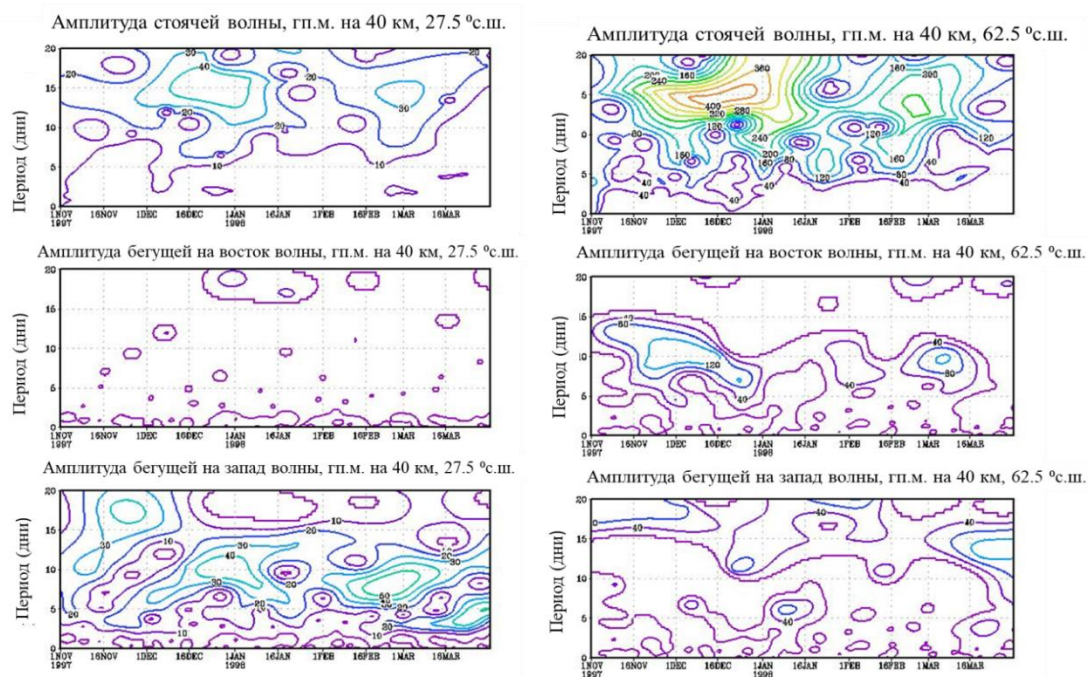


Рис. 3.33. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5⁰с.ш. на 62.5⁰с.ш. в зимний период 1997-1998 гг.

В зимний период 2013-2014 гг. (рис. 3.34) фаза оставалась неизменной, при этом индекс ОМД возрастал почти на всем промежутке, но оставался небольшим.

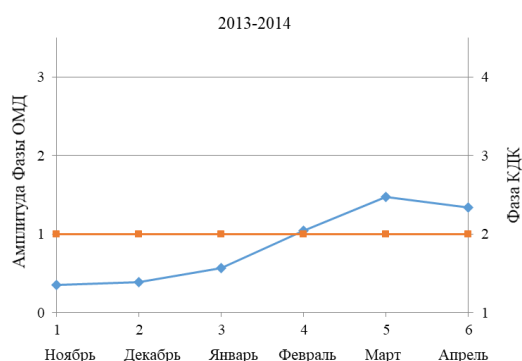


Рис. 3.34. Изменение фазы КДК (оранжевая кривая) и индекса ОМД (синяя кривая) зимой 2013-2014 гг.

На 2.5° с.ш. амплитуда стоячей волны имеет максимум в декабре и январе, в бегущей на восток волне небольшой максимум в декабре, в бегущей на запад волне амплитуды небольшие.

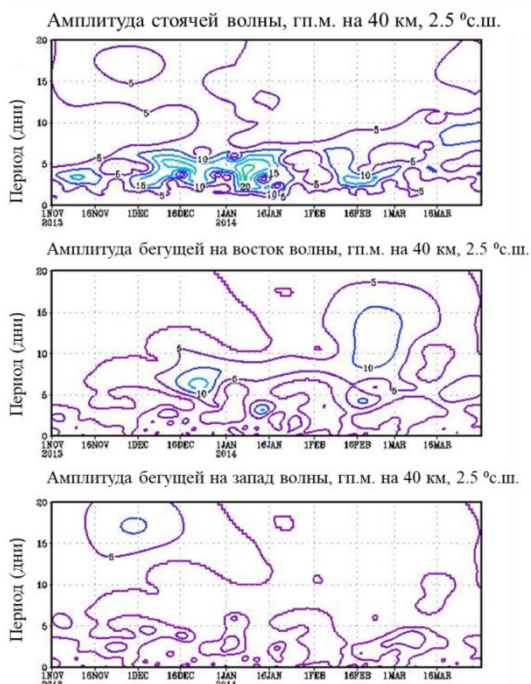


Рис. 3.35. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 2.5° с.ш. в зимний период 2013-2014 гг.

По рис. 3.36 На 27.5°с.ш. (слева) амплитуды стоячей волны очень маленькие, в бегущей на запад волне максимум в марте. На 62.5°с.ш. (справа) максимальные значения наблюдаются в стоячей волне в феврале, в бегущей на запад волне максимум также приходится на февраль, в бегущей на восток волне небольшие максимумы в январе и марте.

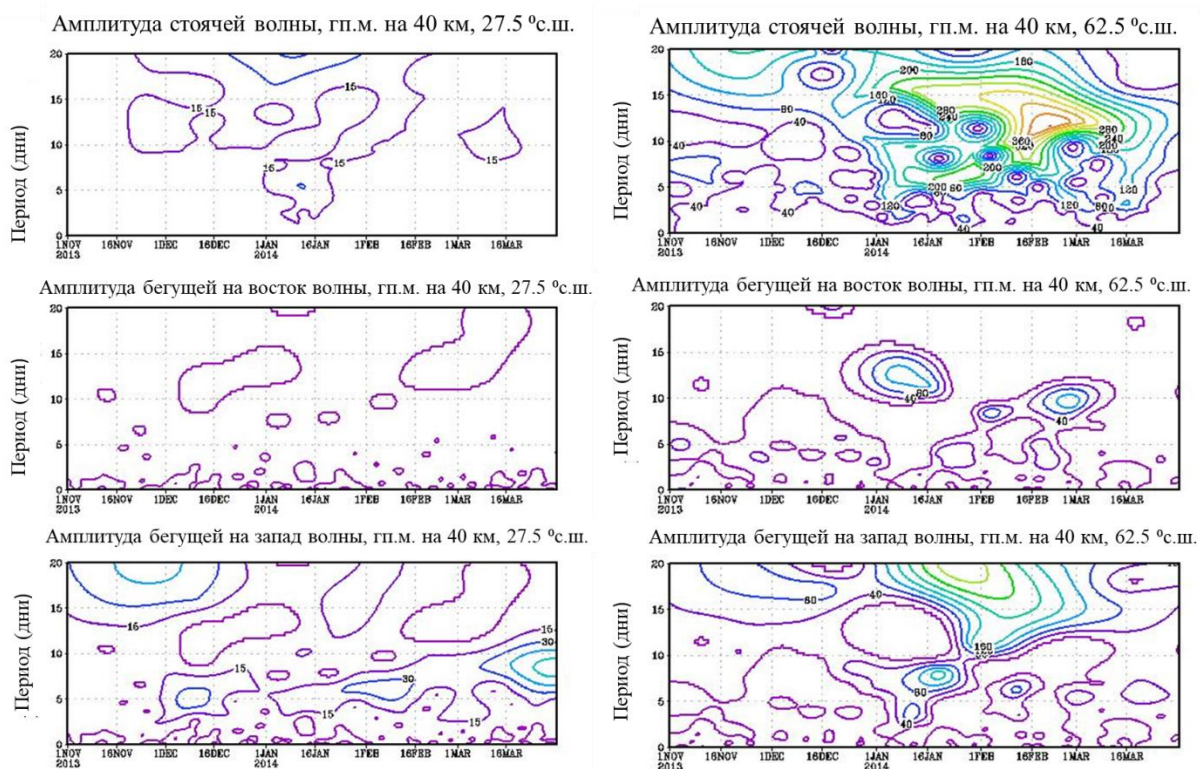


Рис. 3.36. Амплитуды стоячей, бегущих на запад и на восток волн на 27.5°с.ш. и на 62.5°с.ш. в зимний период 2013-2014 гг.

Сравнивая зимы с высоким и низким индексом, не получилось выявить зависимость между амплитудой волн с периодом до 20 дней и фазой КДК. При смене фазы КДК с переходной (4) на западную фазу (1) максимум индекса ОМД получался в различные месяцы, но при этом смена этих фаз почти всегда предшествовала наибольшему значению амплитуды ОМД за данный период при возрастании индекса ОМД.

На 2.5° с.ш. в стоячей волне месяц смены фазы КДК с четвертой на первую совпадал или был близок с месяцем, в который наблюдался максимум амплитуд.

На 2.5° с.ш. значения амплитуд стоячей волны зим с высоким индексом получились меньше, чем у зим с низким индексом (рис. 3.37). На остальных рассматриваемых широтах такой зависимости не наблюдалось.

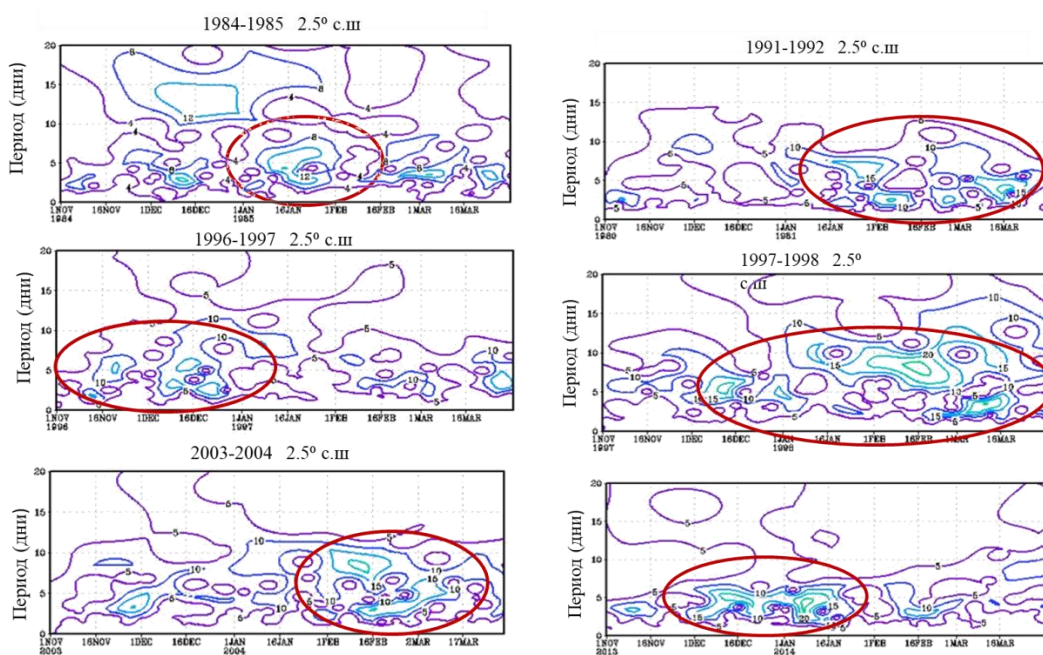


Рис. 3.37 Амплитуды стоячих волн в зимы с высоким (слева) и низким (справа) индексом ОМД

3.3. Построение амплитуд волн с периодом до 2 дней

Для тех же лет были построены атмосферные мигрирующие приливы (рис. 3.38), чтобы посмотреть, имеется ли их влияние на фазу КДК. Так как зависимость просматривалась только на 2.5° с.ш., мигрирующие приливы были построены только для этой широты.

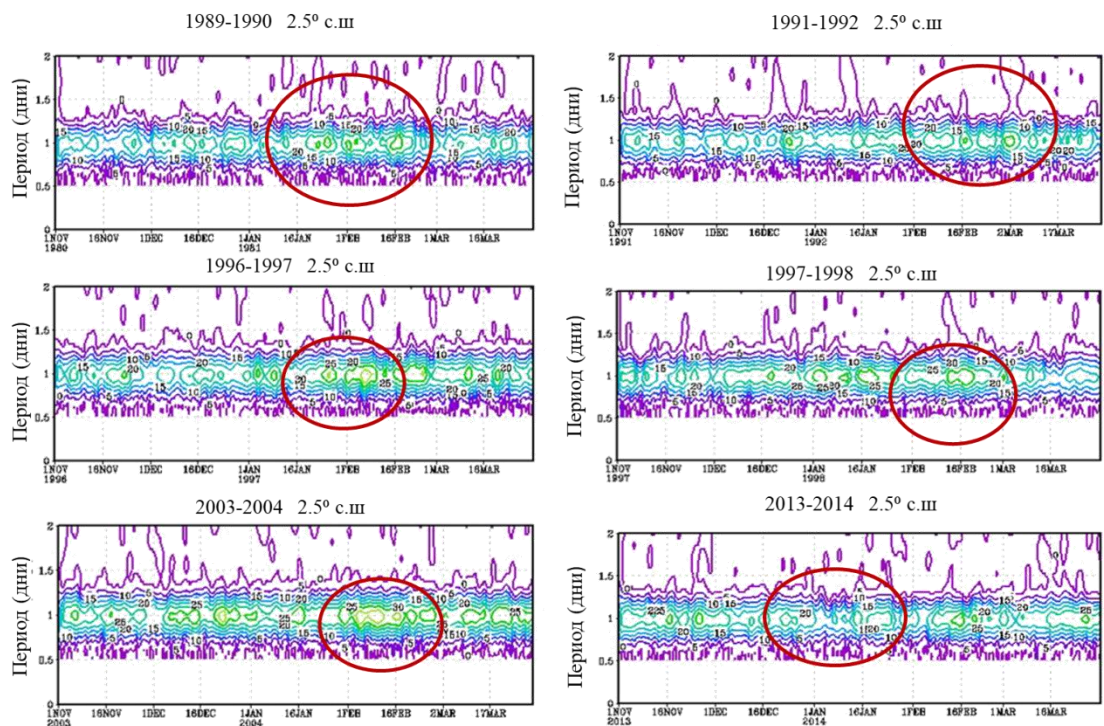


Рис. 3.38 Амплитуды бегущих на запад короткопериодных волн в зимы с высоким (слева) и низким (справа) индексом ОМД

По полученным результатам очевидно, что в зимы с низким и высоким индексом значения амплитуд примерно одинаковы. Следовательно, на атмосферных мигрирующих приливах той же зависимости не просматривается.

3.4. Построение остаточной меридиональной циркуляции

Чтобы посмотреть влияние колебаний на более высокие широты, была построена остаточная меридиональная циркуляция. Были взяты года из уже выбранных ранее зим с высоким и низким индексом ОМД, в которых индекс возрастал от ноября к январю.

Полученная остаточная меридиональная циркуляция для зим с высоким индексом осцилляции Маддена-Джулиана представлена на рис. 3.39, для зим с низким индексом на рис. 3.40.

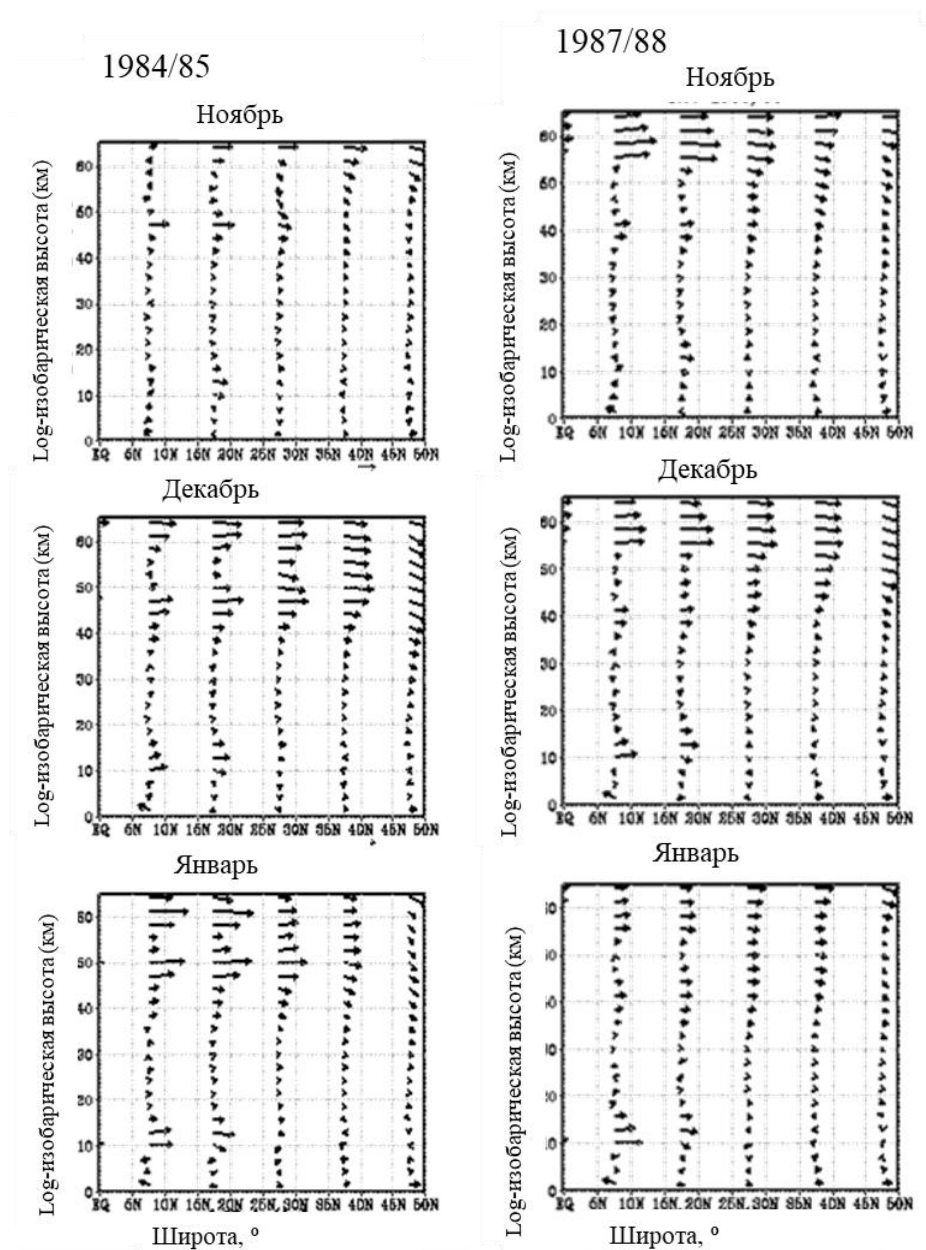


Рис. 3.39. Остаточная меридиональная циркуляция с ноября по январь в 1984-1985 гг. и 1987-1988 гг.

Из-за небольшого количества удобных для рассмотрения случаев, нельзя сделать выводы о связи с более далекими от экватора широтами северного

полушария. Даже в зимы с высоким индексом остаточная меридиональная циркуляция значительно отличается, то же самое для низких индексов.

Есть вероятность, что можно будет проследить зависимость при большем количестве подходящих для анализа лет.

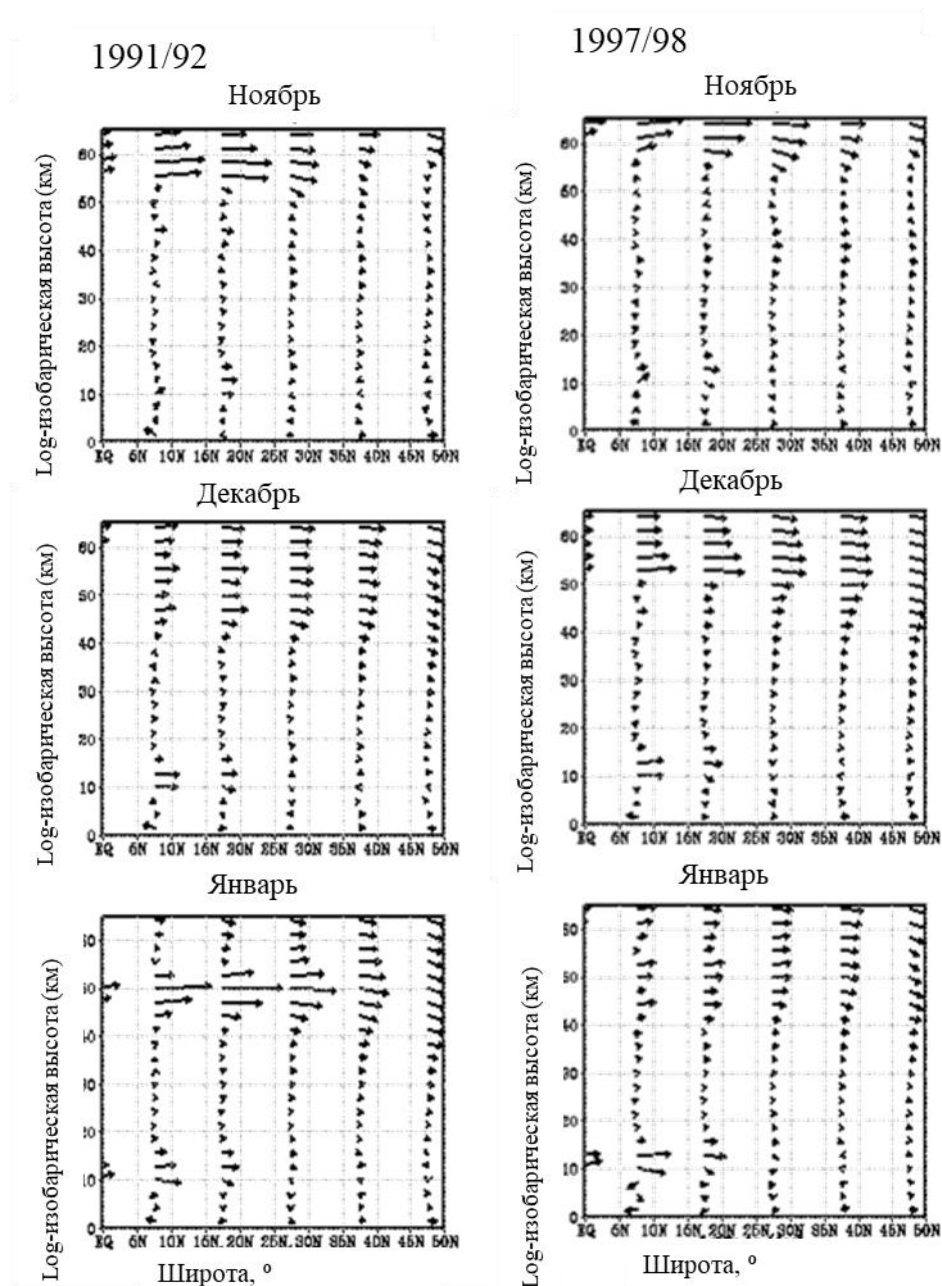


Рис. 3.40 Остаточная меридиональная циркуляция с ноября по январь в 1991-1992 гг. и 1997-1998 гг.

Заключение

Были выполнены все поставленные задачи. Получены следующие выводы:

1. По анализу индекса ОМД и фаз КДК в зимы с 1979 по 2016 гг. было получено, что наибольшее число зим с высоким индексом ОМД приходится на зимы в условиях с переходной на западную и западной фазами. При этом во многие зимы наблюдается некий минимум индекса ОМД в феврале при восточной фазе КДК;
2. Определено количество месяцев с высокими и низкими индексами в каждую фазу. Наибольшее число месяцев с высоким индексом ОМД приходится на западную фазу, а наибольшее число месяцев с низким индексом приходится на переходную, с западной на восточную, и восточную фазы КДК;
3. По амплитуде волн четкой зависимости между индексом ОМД и фазой КДК выявить не удалось, но в стоячей волне на 2.5° с.ш. очевидна разница в амплитудах между малым и большим индексами за все рассматриваемые временные интервалы;
4. На 2.5° с.ш. в стоячей волне месяц смены фазы КДК с четвертой на первую совпадал или был близок с месяцем, в который наблюдался максимум амплитуд. Следовательно, есть определенное влияние индекса ОМД на фазу КДК;
5. Для атмосферных мигрирующих приливов не удалось выявить определенной зависимости;
6. По результатам построенной остаточной меридиональной циркуляции нельзя сделать какие-либо выводы из-за малого количества подходящих для анализа лет.

Список использованных источников

1. R. A. Madden, P. R. Julian, Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* 28, 702–708 (1971).
2. R. A. Madden, P. R. Julian, Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *J. Atmos. Sci.* 29, 1109–1123 (1972).
3. B. Wang, J.-Y. Moon, Subseasonal prediction of extreme weather events, in *Bridging Science and Policy Implication for Managing Climate Extremes: Linking Science and Policy Implication*. C. S. Chung, B. Wang, Eds. (World Scientific Series of Asia-Pacific Weather and Climate Press, 2017).
4. C. Zhang, Madden–Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 94, 1849–1870 (2013).
5. F. Vitart, Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 140, 1889–1899 (2014).
6. C. Zhang, Madden-Julian oscillation. *Rev. Geophys.* 43, RG2003 (2005).
7. M. C. Wheeler, H. H. Hendon, An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Weather Rev.* 132, 1917–1932 (2004).
8. D. Waliser, H. Hendon, E. Maloney, M. Wheeler, K. Weickmann, C. Zhang, L. Donner, J. Gottschalck, W. Higgins, I.-S. Kang, D. Legler, M. Moncrieff, S. Schubert, W. Stern, F. Vitart, B. Wang, W. Wang, S. Woolnough, MJO simulation diagnostics. *J. Clim.* 22, 3006–3030 (2009).
9. J. Dias, S. Leroux, S. N. Tulich, G. N. Kiladis, How systematic is organized tropical convection within the MJO? *Geophys. Res. Lett.* 40, 1420–1425 (2013).

10. K. Kikuchi, G. N. Kiladis, J. Dias, T. Nasuno, Convectively coupled equatorial waves within the MJO during CINDY/DYNAMO: Slow Kelvin waves as building blocks. *Climate Dynam.* 50, 4211–4230 (2018).
11. B. Wang, H. Rui, Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975–1985. *Meteorol. Atmos. Phys.* 44, 43–61 (1990).
12. D. Kim, J.-S. Kug, A. H. Sobel, Propagating versus nonpropagating Madden-Julian oscillation events. *J. Clim.* 27, 111–125 (2014).
13. C. Zhang, J. Ling, Barrier effect of the Indo-Pacific Maritime Continent on the MJO: Perspectives from tracking MJO precipitation. *J. Clim.* 30, 3439–3459 (2017).
14. G. Chen, B. Wang, Effects of enhanced front Walker cell on the eastward propagation of the MJO. *J. Clim.* 31, 7719–7738 (2018).
15. P. Yadav, D. M. Straus, Circulation response to fast and slow MJO episodes. *Mon. Weather Rev.* 145, 1577–1596 (2017).
16. Huesmann, A.S. The stratospheric quasibiennial oscillation in the NCEP reanalyses: Climatological structures / A.S. Huesmann, M.H. Hitchman // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106. – P. 11859–11874.
17. Plumb, R.A. A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane / R.A. Plumb, R.C. Bell // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* – 1982. – Vol. 108. – P. 335–352.
18. Gray, W.M. Influence of the stratospheric QBO on ENSO variability / W.M. Gray, J.D. Scheaffer, J.A. Knaff // *J. Meteor. Soc. Japan.* – 1992. – Vol. 70. – P. 975–995.
19. Reid, G.C. Interannual variations in the height of the tropical tropopause / G.C. Reid, K.S. Gage // *J. Geophys. Res.* – 1985. – Vol. 90. – P. 5629–5635.

20. 108. Uppala, S. M. The ERA-40 Re-Analysis / S.M. Uppala and et al // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 2005. – Vol. 131. – P. 2961–3012
21. Rienecker, M.M. NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications / M.M. Rienecker, M.J. Suarez, R. Gelaro R. and et al. // J. Clim. – 2011. – Vol. 14. – P. 3624–3648. – DOI:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.