

УДК 551.577.21(571.61/.64)

Т. Е. ДАНОВА*, Е. А. ГРИГОРЬЕВА**

*Одесский государственный экологический университет

**Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан

ДИНАМИКА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПОНЕНТНОГО АНАЛИЗА

Проведена работа по оценке динамики количества атмосферных осадков на территории юга Дальнего Востока России за 46-летний период с использованием методов многомерного статистического анализа; представлены результаты компонентного анализа. Предложена методика, дающая возможность оценить динамику количества осадков, проводя сравнение разномасштабных процессов, влияющих на условия образования осадков в различные периоды времени. Показано, что величины первых трех собственных значений исчерпывают 52–53 % суммарной дисперсии поля. Это свидетельствует о большом количестве факторов, от которых зависит процесс осадкообразования в регионе. Проведена параметризация поля количества осадков, получены собственные значения матрицы корреляции, а также решена проблема сжатия исходной информации. Выявлена хорошо выраженная динамика зон максимумов и минимумов полей первых трех собственных векторов в пространстве. Подтвержден факт главенствующей роли циклонической активности в осадкообразовании в регионе, проведено исследование взаимосвязи динамики первого собственного вектора и влияния на осадкообразование циклонов южного направления. Именно с ними связано выпадение наибольшего количества осадков. Второй собственный вектор характеризует влияние циклонов западного направления, третий — представляет собой результат действия «ныряющих» циклонов.

Ключевые слова: годовое количество осадков, метод главных компонент, юг Дальнего Востока России.

An assessment is made of the atmospheric precipitation amount across the territory of the southern part of the Russian Far East for a 46-year-long period by using the methods of multidimensional statistical analysis; results of principal component analysis are presented. We suggest the technique for assessing the dynamics of the precipitation amount through a comparison of different-scale processes influencing the precipitation formation conditions at different period of time. It is shown that the first three eigenvalues account for 52–53 % of the total field variance. This points to a large number of factors governing the process of precipitation formation in the region. A parametrization of the field of precipitation amount is carried out, the eigenvalues of the correlation matrix are obtained, and the problem of input data compression is solved. The study revealed a clearly pronounced dynamics of the zones of maxima and minima for the fields of the first three eigenvectors across space. The fact of the dominant role of cyclonic activity in precipitation formation in the region is confirmed; the relationship of the dynamics of the first eigenvector and the influence of southward cyclones on precipitation formation is investigated. It is these cyclones that are responsible for the largest precipitation amounts. The second eigenvector characterizes the influence of westward cyclones, and the third eigenvector represents the result of the action of “diving” cyclones.

Keywords: annual precipitation, principal component analysis, south of the Russian Far East.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последние десятилетия большое количество исследований посвящено изучению современных климатических изменений не только в мире и на территории России [1–5], но и на Дальнем Востоке [6–10]. Изменение климата, наблюдаемое в настоящее время, характеризуют прежде всего как «продолжающееся глобальное потепление» [2]. Однако при этом авторы отмечают, что процесс неоднороден как во времени, так и в пространстве и проявляется по-разному в изменении основных метеорологических полей в тех или иных частях земного шара [1–10]. Так, П. В. Новороцкий [7, 8] отмечает, что в бассейне Амура наибольший рост температуры воздуха по сравнению с концом XIX и началом XX в. приходится на конец XX в. и первое десятилетие текущего столетия, что согласуется с динамикой глобального потепления. Изменение количества выпадающих осадков здесь также очень неравномерно. Наблюдаются чередующиеся циклы повышенного и пониженного увлажнения. Например, повышенная увлажненность наблюдалась в 1960-х и 1980-х гг., а начало XXI в. характеризовалось пониженными значениями количества осадков [7, 8], что совпадает с результатами наших исследований для Среднего Приамурья [9, 10].

Для надежной оценки возможного влияния колебаний климата на окружающую среду, связанного с обоснованием основных мероприятий по адаптации к ним хозяйственной деятельности, нуж-

ны серьезные региональные исследования. Детальное изучение пространственно-временных особенностей динамики некоторых элементов метеорологического режима на Дальнем Востоке России во второй половине XX—начале XXI в. актуально и необходимо для прогноза вероятных изменений в текущем столетии.

Климат Дальнего Востока отличается особой контрастностью: от резко континентального (Якутия, колымские районы Магаданской области) до муссонного (юго-восточная часть региона), что обусловлено огромной протяженностью территории с севера на юг (4500 км) и с запада на восток (2500–3000 км).

Характерная черта дальневосточного муссона — это наличие двух сезонных фаз (летний и зимний муссоны) [6–15]. В холодную половину года над Азиатским континентом формируется Сибирский антициклон, а над океаном — Алеутская депрессия. Преобладает сухая малооблачная морозная погода, немногочисленные (до пяти раз за зиму) вторжения теплых влажных воздушных масс с океана сопровождаются потеплением, появлением облачности и продолжительными осадками [6, 13]. Структура летнего термобарического поля тропосферы противоположна зимнему; в этот период на особенности проявления муссона оказывает влияние взаимодействие депрессии на материке и тихоокеанского субтропического максимума. В первой половине лета преобладают циклоны из Монголии и Забайкалья, во второй — возрастает количество южных и юго-западных циклонов [14]. При благоприятной синоптической ситуации во второй половине лета с юга продвигаются глубокие циклоны, иногда тропические тайфуны, сопровождающиеся сильными ливневыми дождями [6, 13, 15].

Одним из наиболее существенных параметров при характеристике климата служит количество выпадающих осадков. Цель данной работы — оценка динамики количества осадков на территории юга Дальнего Востока России за последние десятилетия с использованием методов многомерного статистического анализа. Достоверность полученных результатов обеспечивают фактические данные о количестве осадков за год [16] и применение компонентного анализа [17].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования нами проанализирована база Мирового центра данных о количестве осадков на 48 гидрометеорологических станциях Дальнего Востока за 1966–2011 гг. [16]; компонентному анализу подверглась информация со станций, имеющих более полные ряды наблюдений (рис. 1). Для выявления динамики данные разделены на два 23-летних периода: 1966–1988 и 1989–2011 гг.

Известно, что поля метеорологических величин формируются под действием атмосферных процессов разных масштабов: макромасштаба, синоптического, мезомасштаба и более мелкого масштаба. Компонентный анализ позволяет сосредоточить внимание отдельно на процессах разных масштабов, влияющих на условия возникновения изучаемого явления [17].

Для определения собственных векторов матрицы корреляции используется матричное уравнение полной проблемы собственных значений:

$$R_x W_i = \lambda_i W_i, \quad (1)$$

где R_x — матрица корреляции, λ_i — собственное значение матрицы корреляции, W_i — i -й ортонормированный собственный вектор.

Свойство ортогональности собственных векторов позволяет рассматривать их совокупность как базис n -мерного евклидова пространства R^n и провести разложение вектора в этом базисе. Алгоритм компонентного анализа реализован в виде программы на кафедре физики атмосферы и климатологии Одесского государственного экологического университета. Анализ различных метеорологических величин, основанный на методе главных компонент, ранее был описан в работах [18–21]. Используемая нами методика [22, 23] позволяет оценить динамику количества осадков на юге Дальнего Востока, проводя сравнительный анализ процессов разного масштаба, влияющих на условия образования осадков в разные периоды времени.

Рассматриваемый временной отрезок (1966–2011 гг.) разбит на две равные части, поэтому возможно провести адекватную оценку динамики количества осадков, сравнивая процессы разных масштабов, влияющих на условия образования осадков в одинаковые отрезки времени.



Рис. 1. Юг Дальнего Востока России.

Гидрометеорологические станции: 1 — использованные в компонентном анализе, 2 — остальные.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение количества осадков на территории юга Дальнего Востока минимально: для первого периода (1966–1988 гг.) среднее значение составило 615,8 мм, для второго (1989–2011 гг.) — 615,2 мм. Нами визуализированы данные о средних значениях количества осадков за весь период наблюдений 1966–2011 гг., а также за два исследуемых временных отрезка (рис. 2).

Максимальное среднегодовое количество осадков наблюдается на прибрежной территории. Пространственное распределение формирует зоны максимумов и минимумов, расположение которых во времени практически не меняется, что свидетельствует о постоянстве факторов, влияющих на осадкообразование в регионе и связанных с крупномасштабной циркуляцией.

Для выявления основных причин осадкообразования на юге Дальнего Востока использован алгоритм компонентного анализа [17]. Известно, что суммарная дисперсия метеорологического поля распределяется таким образом, что наибольшая ее часть представляет собой дисперсию первой ортогональной компоненты. Анализ показывает, что величины первых трех собственных значений поля осадков за период 1966–1988 гг. исчерпывают около 52 % суммарной дисперсии поля; для периода 1989–2011 гг. этот показатель возрастает до 53 % (см. таблицу), что подтверждает предположение о

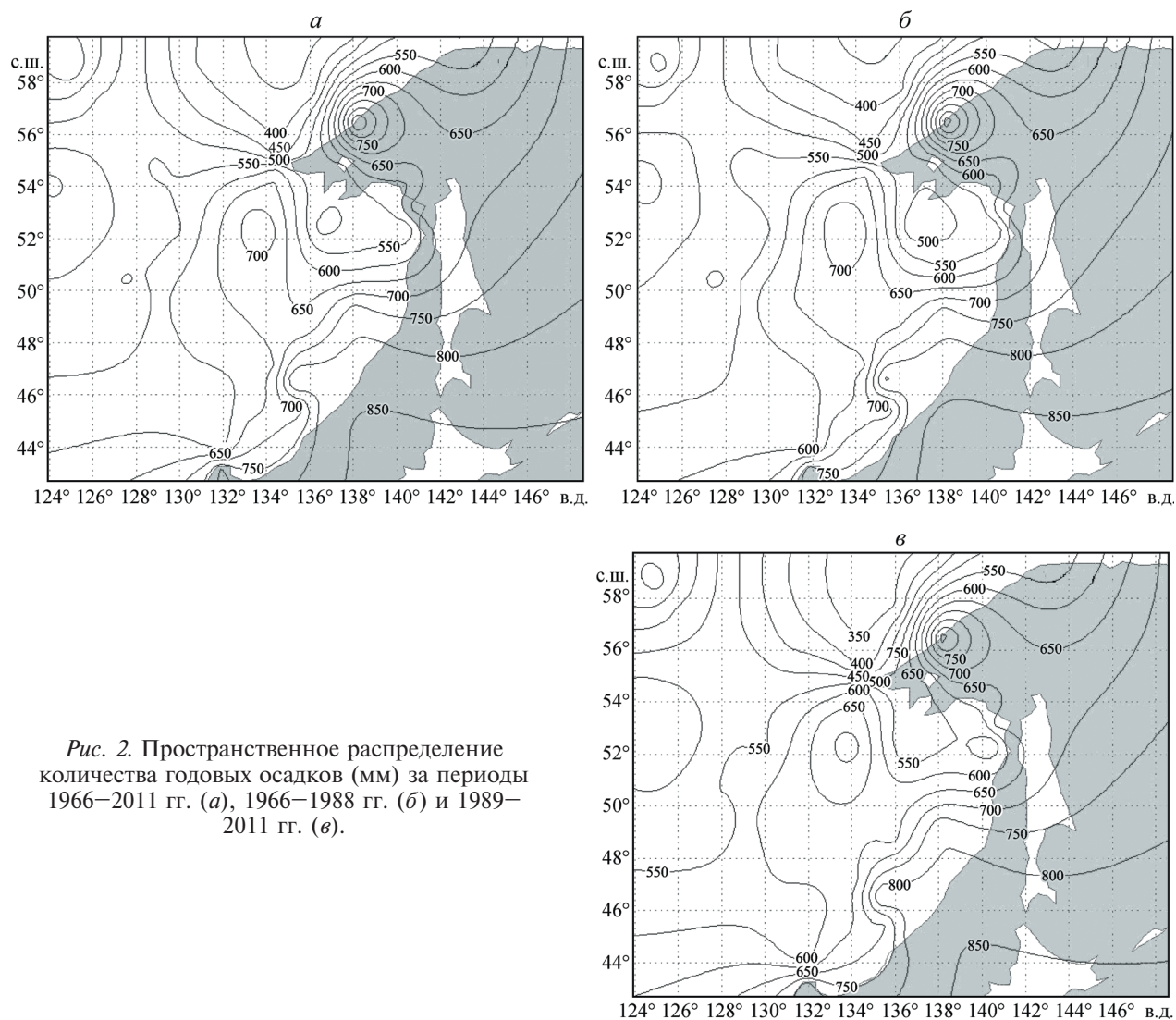


Рис. 2. Пространственное распределение количества годовых осадков (мм) за периоды 1966–2011 гг. (а), 1966–1988 гг. (б) и 1989–2011 гг. (в).

многофакторности условий осадкообразования. Еще около 50 % суммарной дисперсии поля приходится на различные факторы: изменение температуры, влажности, радиационного режима, состава атмосферы и т. д.

Поскольку крупномасштабные атмосферные процессы характеризуются максимальной дисперсией, то первая ортогональная компонента Z_1 и первый собственный вектор отражают особенности наиболее крупномасштабных процессов, под воздействием которых формируются поля годового количества осадков. На долю первой главной компоненты приходится от 23,5 до 21,4 % суммарной дисперсии поля (см. таблицу). За последние 23 года влияние на осадкообразование процесса, представленного первой главной компонентой, снизилось незначительно. Этот факт подтверждает результаты осреднения данных о годовом количестве осадков (см. рис. 2).

Охват дисперсии количества осадков для 1966–1988 и 1989–2011 гг.

Номер компоненты	Собственное число		Охват		Динамика, %
	1966–1988	1989–2011	1966–1988	1989–2011	
1	6,83	6,19	23,5	21,4	-2,1
2	5,24	5,62	18,1	19,4	1,3
3	3,10	3,66	10,7	12,6	1,9
	Всего		52,3	53,4	1,1

Вклад второй ортогональной компоненты в процесс осадкообразования достаточно высок (от 18,1 до 19,4 % для двух временных периодов) и сравним с вкладом первой ортогональной компоненты. Это говорит о том, что в регионе существуют два основных процесса, влияющих на осадкообразование. Вторая и третья ортогональные компоненты характеризуют процессы более мелкого масштаба, в том числе шумы, обусловленные ошибками. В нашем случае для этих двух главных компонент также выявлена одинаковая динамика, описывающая рост влияния процессов, связанных с этими компонентами.

С помощью скользящего сглаживания проведено избавление от шумовой составляющей компоненты во временных рядах трех главных первых компонент. Для этого использовалась периодичность с максимальной энергией колебания, рассчитанная с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье с вероятностью 68 %. Выявлены изменения в периодичности колебаний, характерные для первой главной компоненты: трехлетнее колебание для 1966–1988 гг., двухлетнее — для 1989–2011 гг. Кроме того, анализ временной изменчивости первой главной компоненты показал, что на протяжении двух периодов наблюдается разнонаправленная тенденция: для 1966–1988 гг. характерно незначительное уменьшение значений, а для 1989–2011 гг. очевиден значительный рост величин первой главной компоненты (рис. 3, а).

Здесь надо уточнить, что база данных, на основе которой производились расчеты, представляет собой количество осадков за год (мм). Следовательно, в это общее количество входят осадки холодного (снег) и теплого (дождь) периодов года. Учитывая, что для юга Дальнего Востока России свойствен континентальный климат с муссонными чертами [12], процентное содержание осадков теплого

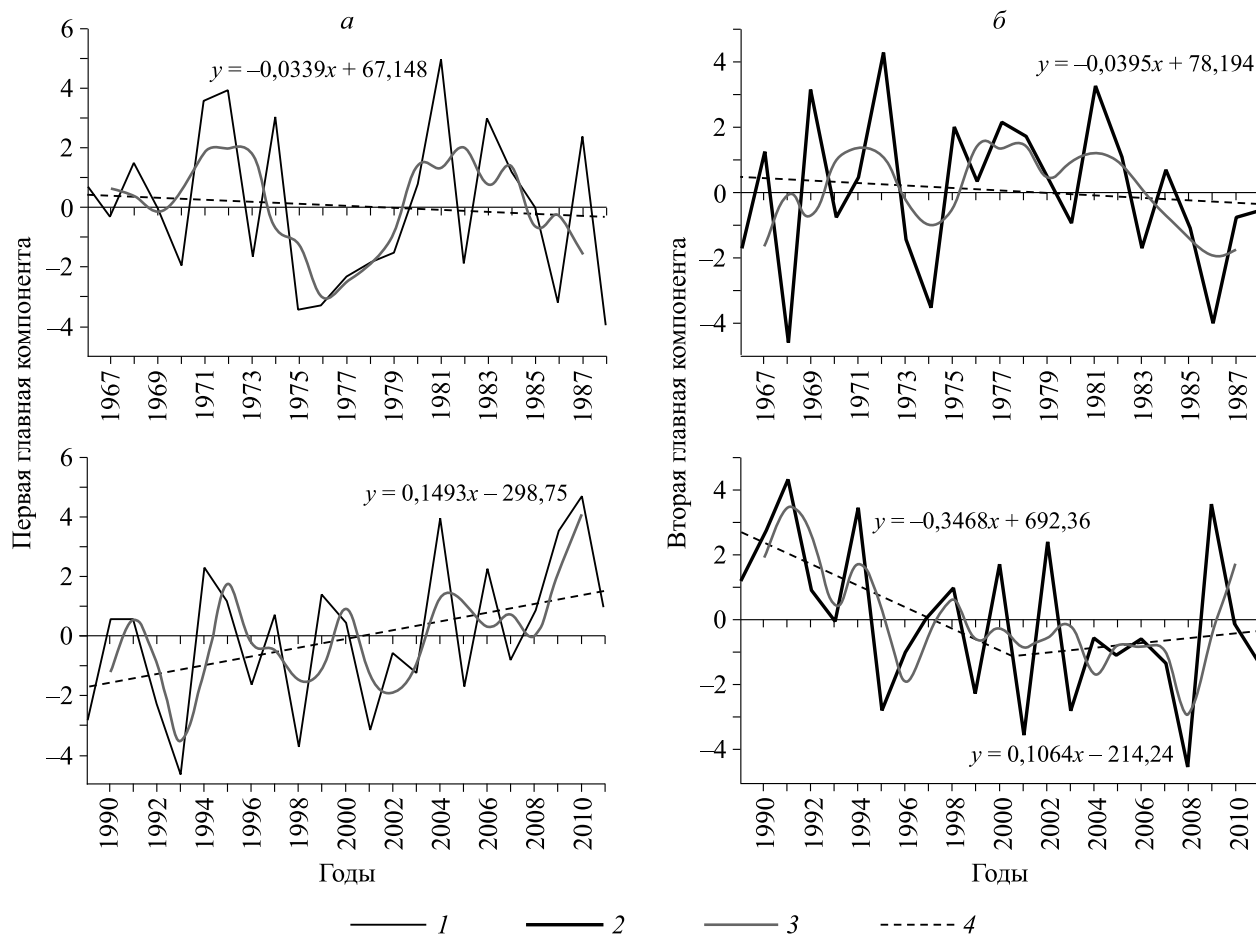


Рис. 3. Динамика первой (а) и второй (б) главных компонент количества осадков для периодов 1966–1988 и 1989–2011 гг.

1 — первая главная компонента; 2 — вторая главная компонента; 3 — сглаженный ряд; 4 — линейный тренд.

периода значительно превышает содержание осадков холодного периода [6–10]. Например, в Хабаровске среднегодовое количество осадков в 1911–2012 гг. составляло 614 мм, из них на теплый период года (апрель–сентябрь) приходилось 545 мм [9].

Таким образом, можно предположить, что и первая, и вторая главные компоненты, сравнимые в процентном соотношении, описывают влияние муссонного климата на осадкообразование в этом районе.

Наиболее крупномасштабный атмосферный процесс летом представлен воздушными потоками, приходящими со стороны Тихого океана. Летние муссонные дожди на территории юга Дальнего Востока обусловлены взаимодействием морских воздушных масс с континентальными. Муссонный климат охватывает бассейн крупнейшей дальневосточной р. Амур, в результате чего река и ее притоки разливаются не весной, а летом, что нередко приводит к катастрофическим наводнениям. На вторую ортогональную компоненту приходится от 18,1 % в 1966–1988 гг. до 19,4 % в 1989–2011 гг. Она характеризует процессы несколько меньшего масштаба. Как видим, наблюдается незначительный рост (+1,3 %) охвата дисперсии. График второй главной компоненты свидетельствует о довольно ровном ходе в первый период и незначительных изменениях во второй (см. рис. 3, б).

Учитывая преобладание меридионального переноса воздушных масс над Дальним Востоком и деление летнего муссона на две стадии, можно предположить, что первая и вторая главные компоненты описывают влияние на процессы осадкообразования циклонов разного происхождения. В первой стадии летнего муссона (май–июнь) преобладают циклоны умеренных и более высоких широт из Монголии, Забайкалья и Якутии [14]. Количество осадков обычно невелико. Во второй стадии вероятен выход на Дальний Восток тропических циклонов (тайфунов), с которыми связано усиление ветра почти до штормового и значительное количество осадков (за сутки может выпасть 150–300 мм). Наиболее часто тайфуны на Дальнем Востоке наблюдаются с июля по октябрь. В отдельные годы сроки наступления муссона значительно сдвигаются, в муссонной циркуляции могут случаться перебои. Незначительным ростом охвата дисперсии характеризуется третья главная компонента, которая описывает процессы еще более мелкого масштаба (рис. 4). На нее приходится от 10,7 % в 1966–1988 гг. до 12,6 % в 1989–2011 гг. (см. таблицу), при этом наблюдается незначительный рост охвата дисперсии (+1,9 %).

Нами проведен анализ полей первых трех собственных векторов, для этого визуализированы расчетные значения (рис. 5). Точность расчета собственных значений и векторов соответствует 0,01.

Поле первого собственного вектора характеризуется обширной зоной максимальных значений в юго-западной части региона в 1966–1988 гг. В 1989–2011 гг. зона максимумов сместилась в район побережья, однако центр максимума мало изменил свое положение (см. рис. 5, а). Расположение зоны в целом соответствует известным траекториям тропических циклонов, которые приносят в регион

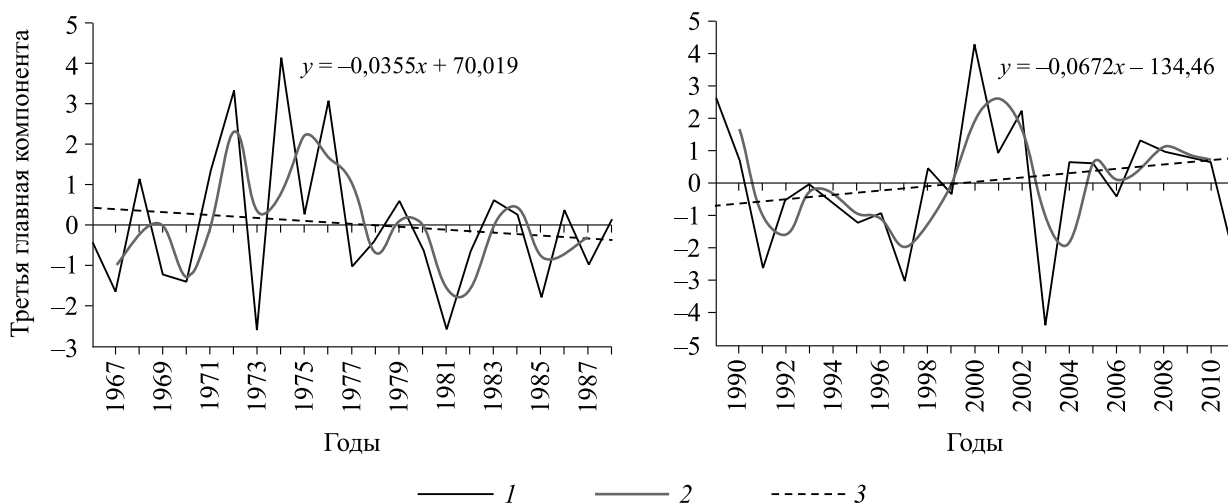


Рис. 4. Динамика третьей главной компоненты количества осадков для периодов 1966–1988 и 1989–2011 гг.

1 — третья главная компонента; 2 — сглаженный ряд; 3 — линейный тренд.

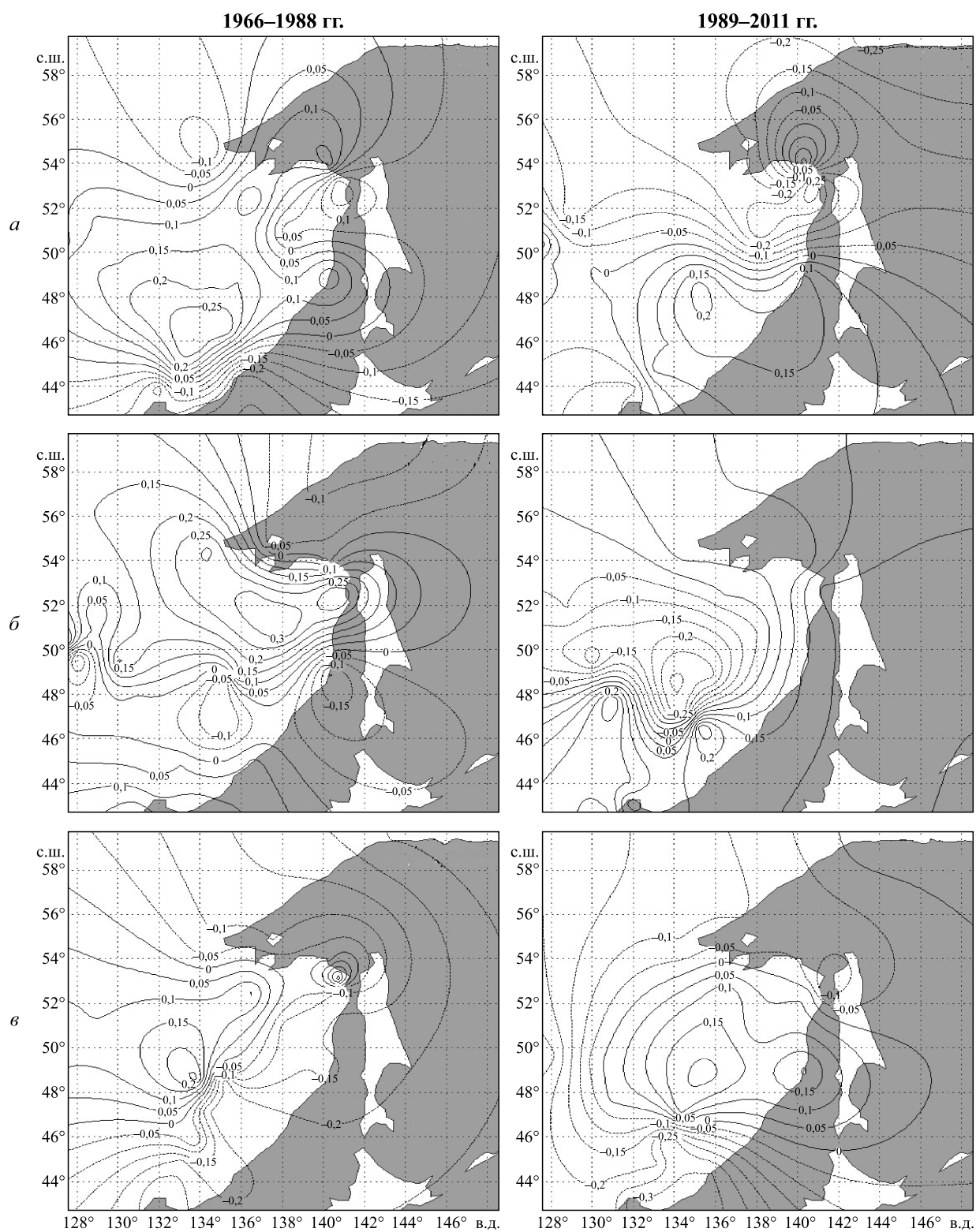


Рис. 5. Поля первых трех собственных векторов для периодов 1966–1988 и 1989–2011 гг.

Собственные векторы: *a* – первый; *б* – второй; *в* – третий.

большое количество осадков [6, 14, 24, 25]. Поле второго собственного вектора характеризуется большей изменчивостью — зона максимумов, занимавшая центральную часть региона в 1966–1988 гг., уступила место зоне минимальных значений во втором временном периоде (см. рис. 5, б). Ярко выражена динамика и поля третьего собственного вектора, где наблюдается смещение зоны максимальных значений в меридиональном направлении (см. рис. 5, в).

Анализ пространственного расположения зон максимумов и минимумов первых трех собственных векторов показал, что для двух временных периодов наблюдается хорошо выраженная динамика зон в пространстве. Кроме того, конфигурация зон максимумов первого и третьего собственных векторов, а также их расположение в регионе обладают значительным сходством, различия характерны для площади этих зон. Зоны максимумов третьего собственного вектора значительно меньше аналогичных зон первого собственного вектора.

В соответствии с предложенной В. Л. Архангельским [24] классификацией циклонов в зависимости от места их зарождения и траектории движения, Д. Э. Муха с соавторами [25] провели анализ циклонов разных статусов в Восточной Азии в 1997–2009 гг. Было выявлено, что в этот период максимальное количество циклонов в регионе относится к юго-западным (266 случаев), западным по югу (152) и южным (54); кроме того, выделены западные по северу (180) и «ныряющие» (85). К сожалению, авторы использовали выборку за 13 лет, что недостаточно для проведения корреляционного анализа с количеством осадков, выпадающих в Дальневосточном регионе. В то же время не вызывает сомнения факт главенствующей роли циклонической активности в осадкообразовании в регионе, поэтому на данном этапе проведения исследований можно предположить, что первый собственный вектор показывает влияние на осадкообразование циклонов южного направления — как юго-западных (266), так и южных (54). Именно с ними связано выпадение наибольшего количества осадков. В этом случае второй собственный вектор, возможно, характеризует влияние циклонов западного направления, проходящих как по северу (180), так и по югу (152). Что касается третьего собственного вектора, то, по всей видимости, это результат действия «ныряющих» циклонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование компонентного анализа позволило сосредоточить внимание на процессах разных масштабов, влияющих на условия осадкообразования на территории юга Дальнего Востока. Предложенная методика дала возможность оценить динамику количества осадков, проводя сравнительный анализ процессов разного масштаба.

Немногим более 50 % суммарной дисперсии исследуемого поля количества осадков приходится на величины первых трех собственных значений, что свидетельствует о большом количестве факторов, от которых зависит процесс осадкообразования в регионе.

Проанализированы изменения в полях собственных векторов количества осадков за период 1966–2011 гг., которые характеризуют изменение процессов разных масштабов, влияющих на осадкообразование. Показано увеличение второй и третьей главных компонент и уменьшение первой в пределах 2 % суммарной дисперсии поля. Можно предположить, что первая главная компонента представляет влияние тропических муссонов, а вторая описывает циклоны умеренных и более высоких широт, с которыми связано меньшее количество осадков.

Сравнительный анализ среднего количества осадков на территории Дальнего Востока за периоды 1966–1988 и 1989–2011 гг. выявил минимальную динамику. Поля первых трех собственных векторов показали изменение локализации зон максимумов и минимумов. Наибольшим изменениям подвержены поля второго и третьего собственных векторов. Ярко выраженные изменения характерны для поля второго собственного вектора. Наблюдается качественная перестройка поля: зона максимумов, занимавшая центральную часть региона в 1966–1988 гг., уступила место зоне минимальных значений во втором временном периоде. Увеличение охвата суммарной дисперсии второй главной компоненты свидетельствует об усилении влияния процессов этого масштаба на осадкообразование. Связь изменения расположения максимумов с траекториями циклонов разного происхождения требует дополнительных исследований.

В дальнейшем для надежных оценок причин изменения количества осадков на юге Дальнего Востока необходимо применить алгоритм компонентного анализа к данным о количестве осадков в теплую половину года, учитывая, что в этот период дальневосточный муссон проявляется наиболее ярко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О. А., Поляков В. Ю. К прогнозу изменения температуры воздуха для первой четверти XXI столетия // Метеорология и гидрология. — 1999. — № 2. — С. 25–31.
2. **Оценочный доклад** об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1: Изменения климата. — М.: Росгидромет, 2008. — 227 с.
3. **Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 год. — М.: Росгидромет, 2012. — 83 с.
4. **Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год. — М.: Росгидромет, 2014. — 109 с.
5. **Изменения** климата. 2013 год (декабрь 2012–ноябрь 2013). Обзор состояния и тенденций изменения климата России. — М.: Изд-во Ин-та глобального климата и экологии, 2014. — 40 с.
6. Петров В. С., Новороцкий П. В., Леншин В. Г. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. — Владивосток; Хабаровск: Дальнаука, 2000. — 174 с.
7. Новороцкий П. В. Современные климатические изменения в бассейне Амура и на побережье Японского моря // Изв. РГО. — 2011. — Т. 143 (1). — С. 41–48.
8. Новороцкий П. В. Многолетние изменения температуры воздуха в бассейне реки Буря // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 2. — С. 118–124.
9. Григорьева Е. А., Чичик Н. Я. Временная динамика количества атмосферных осадков в Хабаровске // Учен. зап. Рос. гидрометеорол. ун-та. — 2013. — № 331. — С. 57–64.
10. Grigorieva E. A., de Freitas C. R. Temporal dynamics of precipitation in an extreme mid-latitude monsoonal climate // Theor. Appl. Climatol. — 2014. — Vol. 116 (1). — P. 1–9.
11. Людевиг Л. Климат Амурской губернии в сельскохозяйственной оценке. — Благовещенск: Метеорол. бюро Амурской губернии, 1923. — 28 с.
12. Витвицкий Г. Н. Климат. Южная часть Дальнего Востока. — М.: Наука, 1969. — С. 70–96.
13. Климат Хабаровска / Под ред. Ц. А. Швер. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 176 с.
14. Новороцкий П. В. Климатические условия загрязнения атмосферного воздуха Хабаровского края. — Хабаровск: Изд-во Ин-та водных и экологических проблем ДВО АН СССР, 1992. — 55 с.
15. Федоровский А. С. Закономерности пространственного распределения атмосферных осадков на юге Дальнего Востока // Гидрометеорологические исследования на юге Дальнего Востока. — Владивосток: Изд-во Дальневост. науч. центра АН СССР, 1984. — С. 3–12.
16. **Мировой центр данных** [Электронный ресурс]. — <http://www.meteo.ru> (дата обращения: 12.09.2013).
17. Школьный Є. П., Лосєва І. Д., Гончарова Л. Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: Підручник. — Київ: Міносвіти України, 1999. — 600 с.
18. von Storch J.-S. On the 3-dimensional oceanic density distribution in a millennium integration with an AO-GCM // Ocean Dyn. — 2003. — Vol. 53. — P. 11–20.
19. von Storch J.-S. Progress in understanding momentum exchange process // Journ. Geodynamics. — 2003. — Vol. 36. — P. 359–367.
20. Jolliffe I. T. Principal component analysis. 2nd edition. — New York: Springer, 2002. — 487 p.
21. **Естественные составляющие** метеорологических полей / Под ред. М. И. Юдина. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. — 199 с.
22. Данова Т. Є., Мельник Є. А. Статистична структура часових рядів головних компонент відносної вологості повітря в північному полярному регіоні // Вісн. Харківськ. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. географія, екологія, геологія. — 2012. — Вип. 37 (№ 1033). — С. 178–185.
23. Данова Т. Є., Мацук Ю. М. Компонентный анализ повторяемости гроз в Причерноморском регионе // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естеств. науки. — 2013. — № 3. — С. 98–103.
24. Архангельский В. Л. Пути и скорости перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. — 1956. — Вып. 1. — С. 97–113.
25. Муха Д. Э., Кондратьев И. И., Мезенцева Л. И. Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами Восточной Азии на юг Дальнего Востока России // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 2. — С. 21–26.

Поступила в редакцию 26 июня 2014 г.