

**В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитов, М.В. Кабанов,
С.В. Логинов, М.В. Решетько, М.И. Таранюк**

Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности

*Институт оптического мониторинга СО РАН,
Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете*

Поступила в редакцию 8.02.2002 г.

Представлены результаты исследования периодических структур, проявляющихся в многолетних рядах числа дней с различными формами циркуляции атмосферы и числа дней с грозой за период с 1891 по 1996 г. для территорий Западной Сибири и Казахстана. Методом вейвлет-преобразования выявлены долгопериодные циклы (продолжительностью 18 лет и более), среднепериодные (7–10 лет) и циклы короткого периода (от 2 до 6 лет). Рассмотрена связь между грозовой активностью и особенностями циркуляции атмосферы. Обсуждается возможное влияние на грозовую активность явления Эль-Ниньо – Южное колебание.

Введение

Накопленные к настоящему времени инструментальные данные по многим климатическим характеристикам привлекают все большее внимание для выявления закономерностей глобальных и региональных природно-климатических изменений [1]. Интерпретация выявляемых при этом закономерностей основывается на сопоставлении лидирующих факторов, определяющих наблюдаемые изменения в различных регионах планеты [2]. Ниже, на основании исследования периодических структур во временных рядах, сопоставляется повторяемость форм атмосферной циркуляции с числом грозовых дней на территориях, различных по географическому положению.

Атмосферная циркуляция является важнейшим климатообразующим фактором, и многолетние колебания ее типов [3, 4] оказывают влияние на зональное распределение циклонической деятельности и основные пути циклонов, а следовательно, на зональное распределение многих климатических характеристик, в том числе и на число грозовых дней над той или иной территорией. Представленные ниже результаты анализа многолетних рядов относятся к летним периодам 1891–1996 гг. для территории Западной Сибири.

Исходные данные и их обработка

Типы циркуляции атмосферы, выделенные Г.Я. Вангенгеймом [5], наиболее удобны для исследования типизаций, поскольку они являются результатом обобщения разнообразных циркуляционных механизмов и позволяют выявить наиболее существенные изменения климата в многолетнем разрезе. По принципу преобладающего переноса в тропосфере умеренных широт выделены три основные группы, назван-

ные макропроцессами западной (W), восточной (E) и меридиональной (C) форм атмосферной циркуляции. При циркуляции W в тропосфере наблюдаются волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. При формах C и E в толще тропосферы наблюдаются стационарные волны большой амплитуды. Принципиальное их различие в том, что при циркуляции типа C высотная ложбина образуется над европейской территорией России (ЕТР), Уралом и частью Западной Сибири (по 80° в.д.), а при типе E над этой территорией – гребень. Следовательно, при преобладании в течение грозового сезона типа циркуляции E вряд ли можно ожидать большого числа дней с грозой на территории Западной Сибири и Казахстана. В работе использованы каталог месячных данных о числе дней с формой циркуляции Вангенгейма за период с 1891–1972 гг. [6] и аналогичные данные, полученные в Российском Гидрометцентре за более поздний период.

Для исследований временных изменений грозовой активности использовались многолетние данные визуальных наблюдений над грозами – число дней с грозой в году (T). Обсуждаемые в настоящей статье результаты исследования получены для территорий юго-востока Западной Сибири (Томская область с прилегающими к ней метеостанциями и Алтайский край), северной, центральной, южной и восточной частей Казахстана. При исследовании временных изменений характеристик грозовой деятельности над Западной Сибирью были использованы данные 45 метеостанций за период 1936–1995 гг. и трех станций, имеющих ряд наблюдений около 100 лет. На территории Казахстана использованы данные 74 станций за период 1936–1985 гг. и 8 станций с периодом 100 лет и более. Для выявления периодической составляющей в рядах многолетних колебаний числа дней с грозой

применялись методы корреляционной теории стационарных случайных процессов и вейвлет-анализ.

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений s и сдвигов k . Каждая функция базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в пространстве (времени). Формально вейвлет-преобразование дискретного ряда X_n с постоянным расстоянием между соседними измерениями δt можно записать как свертку этого ряда с вейвлет-функцией ψ [7]:

$$W_k(s) = \sum_n^{N-1} X_n \psi^* \left[\frac{(k-n)\delta t}{s} \right],$$

или

$$W_k(s) = \sum_n^{N-1} \hat{X}_n \hat{\psi}^*(s\omega_n) e^{i\omega_n k},$$

где

$$\hat{\psi}(s\omega_n) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t} \right)^{1/2} \hat{\psi}_0[s\omega_n], \quad \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}_0(\omega)|^2 d\omega = 1;$$

знак (*) обозначает комплексное сопряжение; знак (^) – Фурье-образ; ψ_0 – базисная вейвлет-функция; N – количество точек в ряду.

При построении $W_k(s)$ вейвлет-преобразования временного ряда X_n в качестве базисной вейвлет-функции нами использовался вейвлет Морле, хорошо локализованный во временном и частотном пространствах [7]. Использование вейвлет-преобразования в отличие от Фурье-преобразования обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом частота и смещение рассматриваются как независимые координаты. Вейвлет-преобразование способно выявить положение особенностей исследуемой функции. Так, например, коэффициенты вейвлет-преобразования гладкой функции малы и резко возрастают при появлении особенности, обозначая ее расположение линиями локальных экстремумов.

Анализ многолетних рядов на наличие циклов

Анализ повторяемости той или иной формы циркуляции атмосферы может оказаться важным при поиске причин изменения грозовой активности над интересующими нас территориями в тот или иной отрезок времени. На рис. 1, а представлена средняя месячная повторяемость форм атмосферной циркуляции за весенне-летние (март–август) месяцы 1890–1995 гг. Из рис. 1, а видно, что преобладающей на рассматриваемом отрезке времени является форма циркуляции E , хотя со второй половины 70-х гг. наметилась тенденция уменьшения числа дней с этой формой циркуляции атмосферы. В то же время стала заметной тенденция

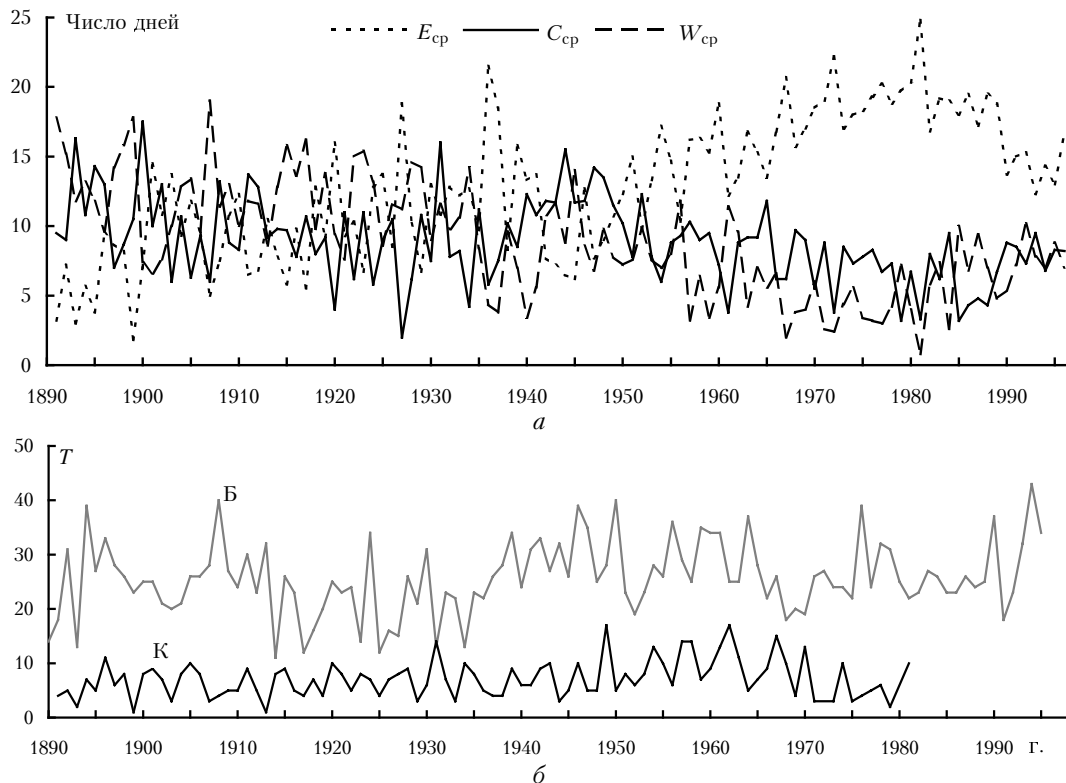


Рис. 1. Средняя месячная повторяемость (число дней) форм атмосферной циркуляции за март–август 1890–1995 гг. (а): число дней с грозой в различные годы грозового сезона на станциях Барнаул (Б), Казалинск (К) (б)

увеличения числа дней с формой циркуляции *C*. Если сравнить многолетний ход числа дней с различными формами циркуляции и числа грозных дней в году за этот же период, то обнаруживается, что общие тенденции грозных дней на исследуемых территориях достаточно хорошо согласуются с тенденцией формы циркуляции *C* (рис. 1, б).

Исследования на наличие периодичности в рядах числа дней с различной формой циркуляции атмосферы за март–август с 1890 по 1995 гг. выполнены с помощью оценок автокорреляционной функции [8]. Предварительно было установлено, что анализируемые ряды стационарны как по математическому ожиданию, так и по дисперсии. Результаты исследований периодичностей представлены в таблице.

Цикличности (число лет) в рядах повторяемости форм циркуляции атмосферы

Продолжительность циклов, лет	Формы атмосферной циркуляции		
	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>W</i>
Короткие (< 5)	2–4	2	–
Средние (5–20)	10–11	–	–
Длинные (> 20)	20–22, 25,	20–22,	20, 25
	45–47, 50–52	37, 41	

Как видно из таблицы, методом автокорреляционной функции в рядах повторяемости форм циркуляции атмосферы обнаружены периоды, кратные периодам солнечной активности, причем наиболее ярко представлен 22-летний цикл, который проявляется в знаке полярности магнитных полей солнечных пятен и обнаружен также в рядах температуры воздуха [9], давления [10] и др. По мнению авторов [11], смена магнитной полярности на Солнце оказывается более существенным фактором, чем просто уровень запятненности Солнца, обуславливающий 11-летний цикл, поэтому и проявляется в метеорологических рядах наиболее ярко.

Вейвлет-анализ рядов повторяемости форм циркуляции атмосферы обнаружил следующие закономерности:

1. Продолжительность некоторых циклов остается постоянной на всей временной оси. В частности, все периоды активности западной формы циркуляции в летние месяцы являются стабильными, а продолжительность циклов – с периодом от 10 до 20 лет (рис. 2, а).

2. Амплитуда выявленных циклов не постоянна на всей временной оси. Особенно это характерно для циклов короткого и среднего периодов. В отдельные десятилетия исследуемого периода их амплитуда может быть в 1,5–2 раза больше, чем на остальной оси. Наиболее яркими по амплитуде являются 33-летние циклы (известные как циклы Брикнера). Практически на всем земном шаре характеристики климата испытывают колебания такой же продолжительности.

3. Для рядов повторяемости восточной формы циркуляции атмосферы (рис. 2, б) характерно наличие циклов короткого (< 5 лет), среднего (7–8 лет, 12–15 лет) и длинного (25, 50 лет) периодов. Наибольшая амплитуда присуща полувековому циклу.

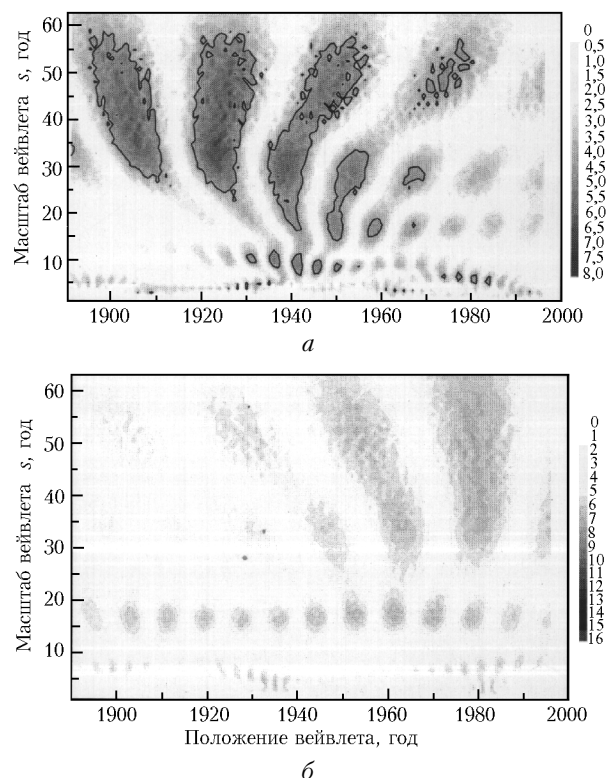


Рис. 2. Амплитудные спектры вейвлет-преобразования числа дней с формой атмосферной циркуляции: меридиональной (а) и восточной (б) в июне. В правой части рисунка приведена колориметрическая шкала амплитуды вейвлет-спектра

4. Для меридиональной формы циркуляции характерны циклы продолжительностью 3, 7–8, 10–15 и 45–50 лет. Наибольшей амплитудой характеризуется полувековой цикл. Однако в 1920–1935 гг. амплитуда 5-летнего цикла тоже достаточно велика. Кроме того, в 40-е гг. отмечен всплеск 22-летнего периода.

5. В рядах западной формы циркуляции можно выделить циклы продолжительностью 2–3, 8–9, 12–15 и 30 лет. Циклы продолжительностью около 20 лет присутствуют в данных начала века и после 1960 г. Наибольшая амплитуда характерна для брикнеровского 33-летнего цикла, но только в промежутке 1920–1940 гг. Остальные циклы по амплитуде различаются мало. Отличительной особенностью структуры рядов повторяемости этой формы циркуляции является отсутствие полувековых циклов.

Вейвлет-анализ рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции позволил не только выявить наличие циклов различной продолжительности, но и временную локализацию их наиболее ярких проявлений, что позволяет проследить изменение различных климатических характеристик в эти временные периоды.

Во временном ходе грозовой активности по результатам проведенных ранее исследований [12] с помощью расчета оценок автокорреляционной функции обнаружены циклы короткого, среднего и длинного периодов, не совпадающие по продолжительности над разными территориями. На всех территориях наиболее ярко выражен 3–4-летний цикл. Циклы длительностью

5–6 лет, 11–12, 22–23 года, которые чаще всего связывают с солнечной активностью, обнаруживаются не над всеми районами.

Если проанализировать результаты применения вейвлет-анализа к многолетним рядам грозовой активности, то можно отметить следующее.

1. Во временном ходе грозовой активности обнаружены циклы короткого (3–4 года и 5–6 лет), среднего (11–12 и 15–17 лет) и длинного (22–25, 30, 50 и более лет) периодов.

2. Одни и те же циклы на некоторых интервалах временной оси могут быть выражены более ярко, чем на протяжении всей остальной оси. Так, на ст. Семипалатинск (рис. 3, а) цикл 6–7 лет в период 1960–1975 гг. выражен ярче, чем в другие годы, а на станции Тальменка цикл 6–7 лет наиболее отчетливо просматривается в период 1955–1975 гг.

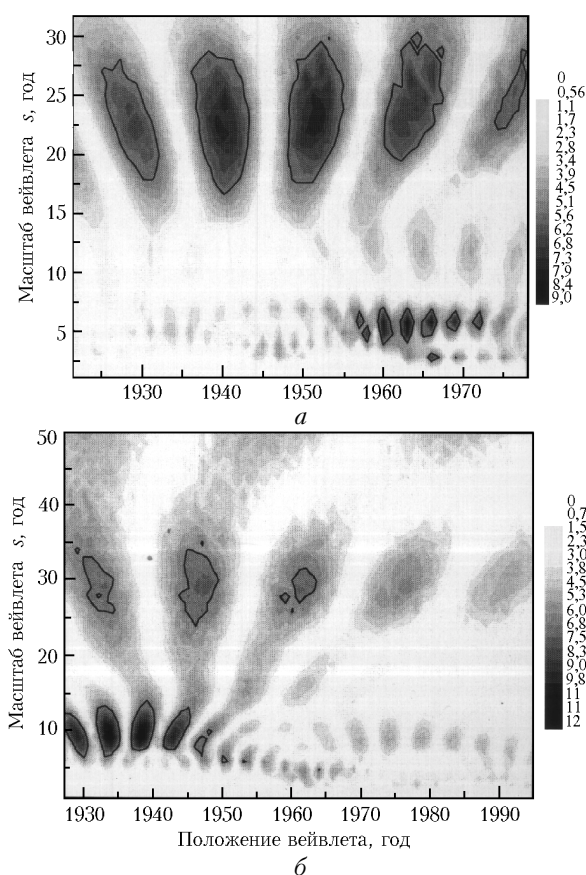


Рис. 3. Амплитудные спектры вейвлет-преобразования числа дней с грозой на станциях: а – Семипалатинск; б – Новый Васюган. В правой части рисунка приведена колориметрическая шкала амплитуды вейвлет-спектра

3. На некоторых станциях (Тайга, Новый Васюган (рис. 3, б), Казалинск) продолжительность периодов в рядах грозовой активности плавно уменьшается от 10 до 4 лет, а затем плавно увеличивается до 8–10 лет. Цикличность наименьшего периода приходится на 40–70 гг. прошедшего столетия. По-видимому, эти циклы обусловлены причинами одного и того же генезиса, но проявляются на временной оси с различной периодичностью.

4. Представляется важным отметить, что над интересующими нас территориями максимум грозовой активности зарегистрирован в 50–60-е гг. прошедшего столетия, когда происходит совпадение пиков нескольких циклов различного периода, как это видно из представленных выше рисунков.

Результаты исследований

Итак, в результате применения различных методов выявления циклических составляющих в многолетних рядах повторяемости форм атмосферной циркуляции и повторяемости числа дней с грозой над различными территориями установлено, что для всех исследованных рядов характерно наличие циклов короткого, среднего и длинного периодов. При этом в рядах повторяемости форм атмосферной циркуляции наибольшая амплитуда присуща 30–35-летнему и полувековому циклам, что подтверждает наличие выявленных ранее [3] синоптических эпох, характеризующихся преобладанием одного типа циркуляции атмосферы на протяжении десятков лет.

В рядах грозовой активности большая амплитуда присуща нескольким циклам. На территории Западной Сибири – 5, 10–12 и 30 лет, а на территории Казахстана – 6–8, 16–18, 30 и 50 лет. Таким образом, значительная амплитуда брикнеровского и полувекового циклов в рядах повторяемости форм атмосферной циркуляции находит свое явное отражение и в рядах грозовой активности. Однако циклы короткого и среднего периодов по амплитуде в грозовой активности выражены гораздо ярче, чем в повторяемости форм циркуляции атмосферы, и продолжительность этих циклов имеет лишь приблизительное сходство. Следовательно, наличие циклических составляющих малого и среднего масштабов в рядах грозовой активности обусловлено и другими причинами, хотя и зависящими от особенностей циркуляционных процессов в атмосфере. В первую очередь эти причины связаны с характеристиками циклонов, обуславливающих возникновение и развитие гроз. Поскольку повторяемость циклонов и их траектории обусловлены сезонным контрастом температур и структурой высотного барического поля, то они могут значительно меняться в различные синоптические эпохи и обуславливать колебания климатических норм.

На основе данных повторяемости циклонов различного генезиса, обуславливающих возникновение гроз над интересующими нас территориями, были выявлены циклические преимущественно малого периода (поскольку временной ряд не превышал 20 лет). По результатам проведенных исследований следует вывод о том, что для повторяемости циклонов различного генезиса характерна циклическая природа. При этом повторяемость циклонов, образовавшихся над Западной Сибирью и Средней Азией, имеет только короткопериодную составляющую (2–4 года), а циклы среднего периода (6–8 лет) обнаружены в рядах повторяемости циклонов, приходящих с ЕТР.

Кроме того, известно, что многолетний ход интенсивности полярной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) достаточно точно повторяет ход солнечной активности [3], а значит, определяет интенсивность циклонов и, следовательно, грозовую активность. Для подтверждения этой гипотезы нами была определена интенсивность циклонов, приносящих грозы на интересующую нас территорию. Оказалось, что в годы, когда солнечная активность максимальна, средняя интенсивность всех циклонов увеличивается в 2 раза по сравнению с годами минимума солнечной активности. Следовательно, наличие в рядах грозовой активности циклов, кратных 11-летним циклам солнечной активности, обусловлено, скорее всего, интенсивностью ПВФЗ и ее положением, а не только наличием цикла с таким же периодом в повторяемости форм циркуляции атмосферы.

Заключение

Представленные выше результаты исследований получены, скорее, на уровне корреляционных связей, а не на уровне детерминированных соотношений. Поэтому выявленные закономерности пока не могут быть однозначно интерпретированы. Тем не менее ряд существенных замечаний в этом направлении представляется интересным.

Прежде всего отметим, что 3–4-летний цикл в рядах грозовой активности обусловлен, вероятнее всего, цикличностью в рядах повторяемости местных и южных циклонов, обуславливающих возникновение гроз.

Циклы продолжительностью, кратной периодам солнечной активности, проявляются в грозовой активности через интенсивность циклонов. Кроме того, в годы, когда наиболее типичны для территории крупные барические образования особенно активны, они, по-видимому, подавляют соседние образования. Поэтому в годы максимальных значений солнечной активности грозовая активность увеличивается не над всеми территориями, а только там, где перемещаются наиболее интенсивные циклоны.

Циклы грозовой активности продолжительностью 7–8 лет над исследуемой территорией обусловлены повторяемостью циклонов, приходящих с ЕТР. Чем вызван такой цикл, сказать пока невозможно, однако исследования двух последних десятилетий показали,

что самый большой и наиболее важный сигнал в межгодовой изменчивости многих климатических характеристик связан с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), которое наблюдается с периодичностью 2–7 лет и создает статистически значимые климатические аномалии в различных районах земного шара.

Взаимосвязи между аномалиями метеорологических полей и явлением ЭНЮК для различных регионов исследовались неоднократно [13] и выявлены не только в пределах бассейна Тихого океана, но и во всем мире. Что касается интересующих нас территорий, то установлено [13], что одна из областей высоких отрицательных корреляций временных рядов индекса Южного колебания (SOI) и температуры воздуха расположена на юге Казахстана и в Средней Азии. Говорить о возможности влияния Южного колебания на грозовую активность на исследуемых территориях пока трудно, а если это влияние и есть, то проявляется оно через смену циркуляционных процессов, способствующих возникновению и развитию гроз.

Нельзя не заметить тот факт, что в рядах грозовой активности некоторых станций циклы одного периода могут плавно переходить в циклы периода более (а иногда и менее) длительного, что удивительным образом совпадает с периодами проявления процесса Эль-Ниньо. Причем достаточно хорошо совпадают и границы переломных периодов (например, 1970 г.), когда меняется период цикличности и в исследуемых нами рядах, и в рядах повторяемости Эль-Ниньо. В то же время проявляется это на разных станциях по-разному. Если в период 1920–1970 гг. цикл повторения Эль-Ниньо составляет 5–7 лет, то циклы такой продолжительности на этом же временном отрезке присутствуют в рядах грозовой активности лишь нескольких из числа исследованных станций (Барнаул, Зайсан, Новый Васюган). На ст. Казалинск циклы такой продолжительности отмечены на всей временной оси с 1890 г., а на ст. Тальменка и Атбасар появляются только в 50-е гг. В то же время на большинстве станций (8 из 10) после 70-х гг. циклов продолжительностью 7–8 лет или не выявлено, или их амплитуда невелика.

Сравнивая графики изменения грозовой активности не отдельно для каждой из выбранных станций, а над территориями в целом (рис. 4), важно отметить, что в годы активности Эль-Ниньо больших значений

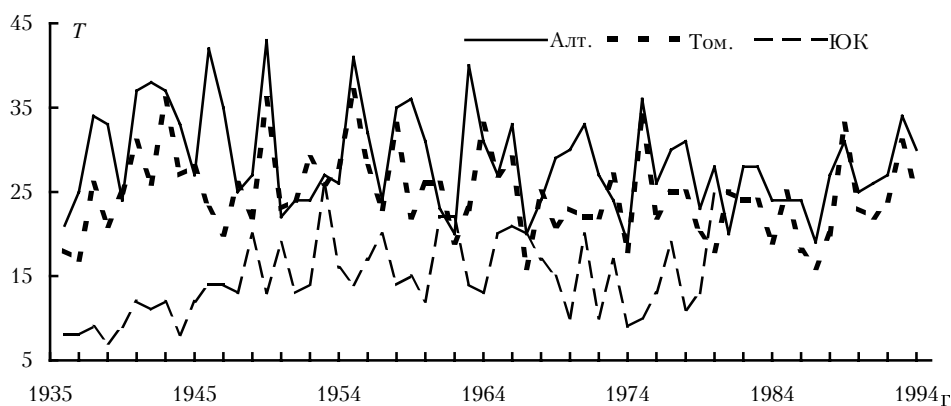


Рис. 4. Среднее число дней с грозой на метеостанциях Томской области (Том.), Алтайского края (Алт.) и Южного Казахстана (ЮК)

Грозовой активности над интересующими нас территориями, как правило, не отмечается. Трудно утверждать на основе вышеприведенного анализа, что явление ЭНЮК, несомненно, вносит какие-то коррективы в вариации грозовой активности над любыми территориями, однако и отрицать возможность такого влияния мы тоже не можем.

1. *Кабанов М.В.* Итоги и задачи мониторинга современных природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 110–115.
2. *Вакуленко Н.В., Мошин А.С., Шишков Ю.А.* Об изменениях общей циркуляции атмосферы в XX веке // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 6. С. 802–805.
3. *Байдал М.Х.* Колебания климата Кустанайской области в XX столетии. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 154 с.
4. *Кац А.Л.* Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. М.: Гидрометеиздат, 1960. 269 с.
5. *Вангенгейм Г.Я.* О колебаниях атмосферной циркуляции северного полушария // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1946. Т. 10. № 5. С. 405–416.
6. *Гурс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 488 с.
7. *Torrence C., Compo G.P.* A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. N 1. P. 61–78.
8. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
9. *Логинов В.Ф.* Характер солнечно-атмосферных связей. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 48 с.
10. *Болотинская М.Ш.* Влияние солнечной активности на частоту формирования крупных аномалий в Арктике // Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1974. С. 80–86.
11. *Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И.* Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 352 с.
12. *Горбатенко В.П.* Структура временных рядов числа дней с грозой // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 1026–1029.
13. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клещенко Л.К., Аристова Л.Н.* О связи климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание // Метеорол. и гидрол. 1999. № 5. С. 32–51.

V.P. Gorbatenko, I.I. Ippolitov, M.V. Kabanov, S.V. Loginov, M.V. Reshet'ko, M.I. Taranuk. **Analysis of the structure of time series repetition of atmosphere circulation forms and the number of thunderstorm days.**

This paper presents the analysis of the available periodical structure, which displays in dates the forms of atmospheric circulation and temporal changes of the number of days of thunderstorm activity in the West Siberia and Kazakhstan. The data base covers the period 1891–1996. Wavelet transform is used in the analysis. Most parameters exhibit long-term (greater than 18 years), medium (7–10 years), and short (2–6 years) periodicity. Relationships are studied between peculiarities of the atmospheric circulation and thunderstorm activity. Possibility of influence of the phenomenon El Nino–Southern Oscillation on the thunderstorm activity is discussed.