

УДК 633:551.50

Канд. геогр. наук С.С. Байшоланов¹М.С. Габбасова¹Канд. геогр. наук Н.У. Бултеков²**ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДЛЯ
ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ**

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, гармонический анализ, преобразование Фурье, циклическое колебание, синусоидальное колебание, индекс изменения метеоэлемента, экологические системы

Проведен гармонический анализ многолетнего ряда средней годовой температуры воздуха по трем метеорологическим станциям Казахстана, смоделированы их прогнозные циклические колебания до 2039 года, а также проведена оценка влияния их изменения на экологические системы. Выявлено 22...23 летнее циклическое колебание средней годовой температуры воздуха. Влияние на экологические системы изменения температурного режима за последнее 83 года оценивается как «очень сильное влияние». Предполагается, что циклическое колебание средней годовой температуры воздуха с 2016 года входит в фазу повышения и достигнет максимума в 2028...2029 годах, а далее снова пойдет на понижение до 2039 года. Также предполагается, что изменение температурного режима за этот период окажет слабое влияние на экологические системы.

Известно, что различают понятия «изменчивость климата», «колебание климата» и «изменение климата». Под изменчивостью климата понимают изменение климатических показателей за относительно кратковременный период, имеющее обратимый характер. Колебанием климата считается изменение климатических показателей за длительный период, также имеющее обратимый характер. Если изменение климатических показателей имеет не обратимый характер, то это является изменением климата [3].

В работах В.Г. Кривенко [4, 5] говорится, что изменение климата – это природный процесс циклического характера, и существуют многове-

¹ МНК «Астана», г. Астана, Казахстан

² Корпоративный фонд «Региональный центр гидрологии», г. Алматы

ковые, вековые и внутривековые климатические циклы. Отмечаются 7...11, 20...30, 60...90 летние климатические циклы колебания. Он также отмечает «многослойность» климатических циклов – одновременное развитие многовековых, вековых и внутривековых трендов, нередко проявляющихся в одно и то же время в противоположных направлениях. Современный многовековой тренд потепления несколько сглаживает (подавляет) развитие внутривековых и вековых прохладно-влажных фаз климата и наоборот, резко усиливает проявление тепло-сухих тенденций. Влияние Солнца на Землю также близко к циклическому колебанию. В колебаниях солнечной активности и колебаниях атмосферной циркуляции присутствуют одинаковые циклы: 7, 12, 22, 60-летние.

В работе [6] исследовано воздействие Солнца на атмосферу Земли. Солнечная активность (числа Вольфа) имеет 11, 80...90 и 160...180 летние циклы. Также существует 22-летний цикл, проявляющийся в смене знака полярности магнитных полей биполярных групп пятен в обоих полушариях Солнца. Здесь также отмечается, что 22-летний цикл более четко проявляется в нижней атмосфере, чем 11-летний. Это влияние проявляется на барических образованиях в центрах действия атмосферы.

Для определения закономерности колебания и тенденции изменения климата необходимо провести анализ временного ряда показателя климата. Например, провести гармонический анализ многолетнего ряда и установить цикличность его колебания. Здесь необходимо отметить, что цикл, в отличие от периода, имеет непостоянную длину и амплитуду колебания, которые варьируют около определенных значений.

Для моделирования циклических колебаний можно использовать различные математические методы. Например, для выявления циклов колебания климата (температуры воздуха, осадки и т.д.) за многолетний период можно использовать один из методов преобразования Фурье – разложение в тригонометрический ряд Фурье [7, 11].

Аналитической формой циклической волны служит тригонометрический многочлен вида [11]:

$$\hat{Y}_t = a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kt + b_k \sin kt), \quad (1)$$

где \hat{Y}_t – преобразованные в ряды Фурье значения исследуемого параметра; k – порядковый номер гармоники ряда Фурье; m – число гармоник; n – продолжительность многолетнего ряда; t – время, принимающее значение $0; 2\pi/n; 2 \cdot 2\pi/n; 3 \cdot 2\pi/n; \dots (n-1) \cdot 2\pi/n$.

Параметры a_0 , a_k , b_k находятся в соответствии с методом наименьших квадратов и задаются следующими соотношениями:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum Y_t, \quad a_k = \frac{2}{n} \sum Y_t \cos kt, \quad b_k = \frac{2}{n} \sum Y_t \sin kt. \quad (2)$$

При выравнивании многолетних данных по ряду Фурье обычно рассчитывают не более четырех гармоник, а затем определяют, при каком числе гармоник наилучшим образом отражается периодичность изменения уровней ряда. В процессе преобразования в ряды Фурье происходит выравнивание резких скачков метеоэлемента из года в год, и вырисовывается кривая с плавными колебательными волнами.

В работе [1] Байшолоновым С.С. был проведен гармонический анализ многолетних рядов средней годовой, средней за теплый и средней за холодный периоды года температуры воздуха, а также суммы осадков за год, за теплый и холодный периоды года по М Щучинск (1935...2013 гг.). Также было смоделировано их колебание и изменение до 2034 г., на основе установленной многолетней цикличности колебания.

Также в работе [10] приведены результаты статистического анализа временных рядов (1936...2011 гг.) средней годовой температуры воздуха и годовой суммы осадков по 45 метеорологическим станциям Казахстана, в том числе представлены графики гармонического анализа. Например, установлены колебания годовой температуры воздуха различной цикличности (3...8, 21...23, 33...38, 118...148 лет).

На основе установленной многолетней цикличности колебания метеоэлемента можно смоделировать его дальнейшее колебание. Для этого нужно продолжить колебание преобразованного в ряды Фурье метеоэлемента еще на 1 цикл (период) колебания вдоль установленной линии тренда. Для этой цели можно использовать формулу синусоидального колебания [2, 9]:

$$h = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где h – отклонение колеблющейся величины в определенный момент времени от среднего за период значения; A – амплитуда колебания; ω – циклическая частота: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, где f – частота колебания, T – период колебания ($f = 1/T$); t – момент времени (порядковый номер года); φ – начальная фаза колебания.

Относительно слабым местом данного подхода является возможность изменения линии тренда на прогнозный период (в связи с возраста-

нием антропогенного воздействия), а также непостоянство периода и амплитуды циклического колебания. Поэтому очень важным является правильное определение линии тренда, вдоль которой развивается колебание. При прогнозировании режима метеоэлемента только на один колебательный цикл вероятность данной погрешности сводится к минимуму.

После установления многолетней цикличности колебания и тенденции изменения метеоэлемента очень важным является определение его изменения в результате колебания климата и в результате изменения климата. Такое разделение дает возможность оценить влияние изменения климата (метеоэлемента) на состояние экологических систем, т.е. на компоненты окружающей экологической системы. Например, на фитоценозы (устойчивые сообщества растений), зооценозы (совокупность взаимосвязанных видов животных), на водные объекты и т.д., связанные с условиями окружающей среды в пределах более или менее однородного участка территории (биотопа).

Естественная экологическая система (фитоценоз, зооценоз и т.д.) обладает приспособляемостью и саморегуляцией, обеспечивает устойчивое равновесное состояние [8]. Иначе говоря, экосистемы обладают способностью адаптироваться к внешним изменениям, в том числе и к климатическим. Обычно экосистемы адаптированы к естественному внутривековому колебанию климата. Поэтому можно предположить, что, если величина изменения климата будет превышать величину естественного колебания климата, то это может превышать адаптационные возможности экосистемы, т.е. окажет существенную нагрузку на нее, и может привести к качественному изменению ее состояния.

Оценку степени влияния изменения климатического показателя (температура, осадки и т.д.) на экосистему можно провести с помощью «Индекса изменения метеоэлемента» (I_M), предложенного Байшолановым С.С. в работе [1].

Индекс изменения метеоэлемента характеризует соотношение изменения и колебания метеоэлемента за многолетний период, в котором наблюдается не менее 3...4 колебательных циклов (чем больше циклов, тем точнее). Индекс определяется как отношение значения изменения метеоэлемента (ΔM) на значение размаха колебания метеоэлемента (dM), выраженное в процентах:

$$I_M = \frac{\Delta M}{dM} \cdot 100. \quad (4)$$

Размах колебания метеоэлемента (dM) определяется как наибольший размах из всех циклов колебания за рассматриваемый многолетний период, уменьшенный на величину прироста метеоэлемента по тренду за данный цикл колебания. Изменение значения метеоэлемента (ΔM) за многолетний период можно определить по линии тренда за весь многолетний период. Степень влияния изменения метеоэлемента на экосистему можно оценить по критериям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Критерии влияния изменения метеоэлемента на экосистемы

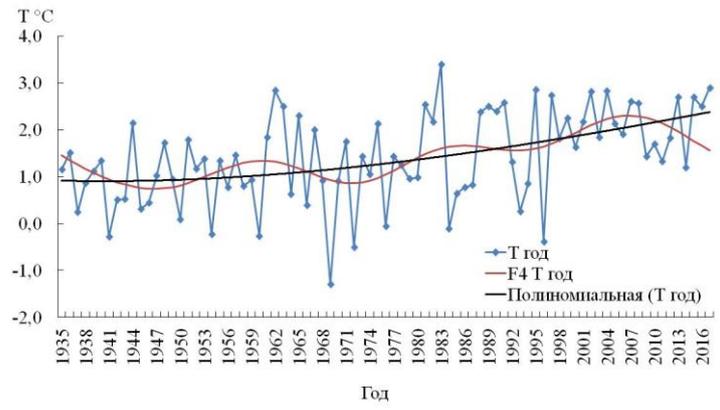
$I_M, \%$	Степень влияния
< 50	нет влияния
50...80	слабое влияние
80...120	умеренное влияние
120...200	сильное влияние
> 200	очень сильное влияние

Можно предположить, что при степени влияния до 120 %, когда изменение находится еще в пределах нормы, естественная экологическая система еще сама способна адаптироваться к изменению климата. При превышении 120 % на экологическую систему оказывается существенная нагрузка, что может привести к ее деградации. В таком случае для восстановления экосистемы нужны будут искусственные адаптационные меры. Превышение нормы в два раза (более 200 %) можно оценить как «очень сильное влияние», приводящее к катастрофическим последствиям.

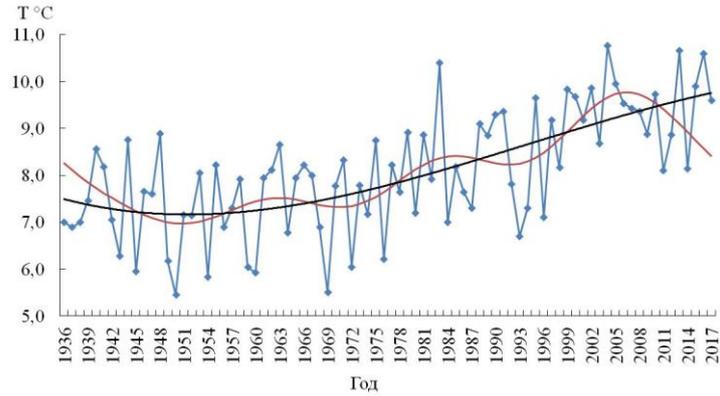
Гармонический анализ многолетнего ряда температуры воздуха.

Для исследования цикличности климата проведем гармонический анализ многолетних рядов годовой температуры воздуха на трех метеорологических станциях, расположенных на севере (М Щучинск), на юге (М Аральск) и на западе (М Темир) республики (1935...2017 гг.). М Щучинск расположена в Акмолинской области, М Аральск – в Кызылординской области, а М Темир – в Актюбинской области.

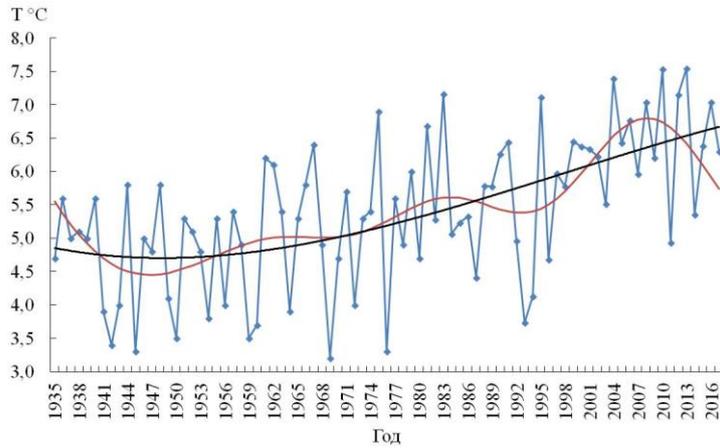
На рис. 1 приведена многолетняя динамика средней годовой температуры воздуха ($T_{год}$) и его значения, преобразованные в тригонометрический ряд Фурье четвертой гармоники ($F4 \cdot T_{год}$) по М Щучинск, М Аральск и М Темир. Здесь линии трендов описываются полиномами 3-го порядка (полиномиальное преобразование данных).



a



б



в

*Рис. 1. Динамика средней годовой температуры воздуха ($T_{год}$) и ее преобразованных значений в ряды Фурье четвертой гармоники ($F4 \cdot T_{год}$).
a – М Щучинск; *б* – М Аральск; *в* – М Темир.*

В результате анализа колебания температуры воздуха на всех исследуемых метеостанциях были установлены следующие закономерности:

1. Средняя годовая температура воздуха имеет тенденцию роста, которая четко проявляется с 60-х годов 20 века.

2. Колебание средней годовой температуры воздуха имеет 20...25-летние циклы (в среднем 22...23-летние). Цикличность колебания рядов температуры воздуха в определенной степени соответствует цикличности солнечной активности. В работе [10] на большинстве метеостанций также присутствует 23-летний цикл колебания температуры воздуха.

Оценка влияния изменения температуры воздуха на экосистемы.

Проведем оценку влияния изменения среднегодовой температуры воздуха на экологические системы (без конкретизации экосистемы). Для этого вначале определим изменение температуры воздуха в результате колебания климата и в результате изменения климата, т.е. размах наибольшего колебания (с вычетом прироста по тренду за цикл) и рост среднегодовой температуры за весь рассматриваемый многолетний период. Далее определим индекс изменения температуры воздуха и согласно критериям, оцениваем степень влияния на экосистемы.

Линия тренда многолетнего ряда температуры на М Щучинск (см. рис. 1) показывает, что средняя годовая температура воздуха за последние 83 года (1935...2017 гг.) выросла на 1,55 °С ($\Delta T_{год}$). За этот же период изменение средней годовой температуры воздуха в результате колебания климата ($dT_{год}$) составило 0,71 °С. Тогда индекс изменения средней годовой температуры воздуха равен 217 %, что оценивается как «очень сильное влияние». Например, на озера и леса Щученско-Боровской курортной зоны (табл. 2).

Таблица 2

Изменение годовой температуры воздуха в результате изменения климата ($\Delta T_{год}$) и колебания климата ($dT_{год}$), а также индекс изменения ($I_{T_{год}}$)

М	$\Delta T_{год}, ^\circ\text{C}$	$dT_{год}, ^\circ\text{C}$	$I_{T_{год}}, \%$	Степень влияния на экосистемы
Щучинск	1,55	0,71	217	очень сильное влияние
Аральск	2,45	0,87	282	очень сильное влияние
Темир	2,11	0,80	264	очень сильное влияние

На М Аральск средняя годовая температура воздуха (по тренду) за последние 82 года (1936...2017 гг.) выросла на 2,45 °С, а ее изменение в результате колебания климата составило 0,87 °С. Соответственно индекс изменения средней годовой температуры воздуха составляет 282 %, что

оценивается как «очень сильное влияние» на экосистемы Приаралья (табл. 2). Отметим, что начиная с 1961 г. Аральское море начало мелеть, в 1989 г. распалось на два водоёма (северное и южное). На дне высохшего моря образовалась новая пустыня Аралкум. Естественно все это привело к изменению температурного режима в районе М Аральск. Этим можно объяснить значительное повышение среднегодовой температуры воздуха на М Аральск, по сравнению с остальными метеостанциями.

На М Темир за последнее 83 года (1935...2017 гг.) средняя годовая температура воздуха (по тренду) выросла на 2,11 °С, а ее изменение в результате колебания климата составило 0,80 °С. Соответственно индекс изменения средней годовой температуры воздуха составило 264 %, что оценивается как «очень сильное влияние» на экосистемы.

Таким образом, повышение температуры воздуха за последнее 83 года оказало «очень сильное влияние» на состояние экологических систем в рассматриваемых нами регионах. Для рассмотрения отдельных экосистем нужно будет исследовать критические для них периоды года. Например, для фитоценоза нужно исследовать колебание температуры вегетационного периода (теплого периода).

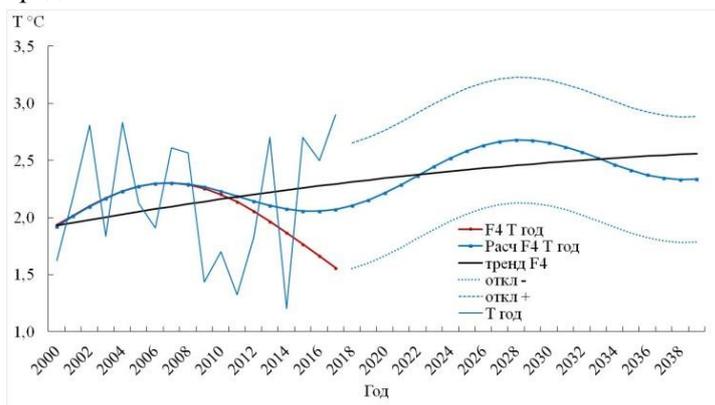
Здесь необходимо обратить внимание на то, что линия тренда характеризующая изменение температуры воздуха за весь период (1935...2017 гг.) включает не только изменение климата в результате антропогенного воздействия, но и естественное колебание климата более длинного – векового цикла.

Прогноз колебания и изменения температуры воздуха. Прогноз многолетней динамики метеоэлемента можно сделать на основе результатов гармонического анализа многолетнего ряда. На основе установленных закономерностей колебания и тенденции изменения, с применением формулы синусоидального тока (колебания) можно смоделировать его будущее колебание и изменение.

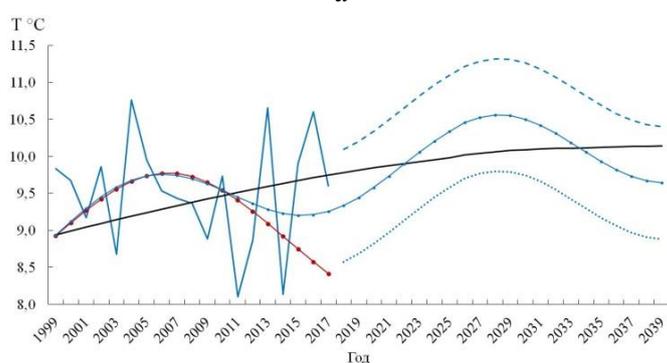
Для прогноза колебания и изменения температурного режима смоделируем колебание средней годовой температуры воздуха на рассматриваемых станциях вперед на 1 цикл колебания, т.е. до 2039 года. Для этого нужно продолжить синусоидальное колебание преобразованной в ряды Фурье температуры воздуха ($F4 \cdot T_{год}$) еще на 1 цикл, с помощью формулы синусоидального колебания.

На рис. 2 представлено смоделированное колебание значений рядов Фурье средней годовой температуры воздуха (расчет $F4 \cdot T_{год}$) по М Щучинск, Аральск и Темир до 2039 года. Также определен диапазон

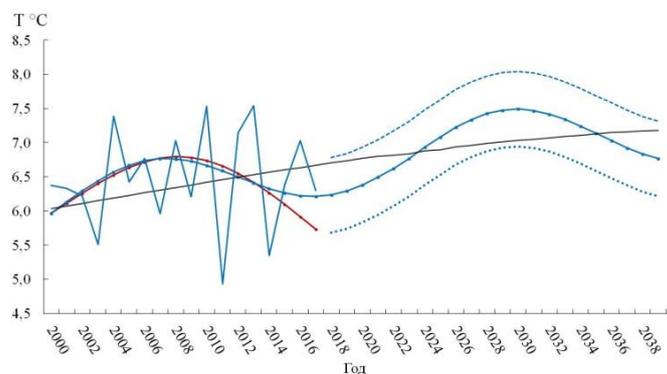
возможного отклонения фактических температур от смоделированной линии колебания годовой температуры воздуха: нижний (откл. -) и верхний (откл. +) пределы отклонения.



a



б



в

Рис. 2. Фактическое ($F4 \cdot T_{год}$) и смоделированное (расчет $F4 \cdot T_{год}$) колебания годовой температуры воздуха ($T_{год}$). *a* – М Щучинск; *б* – М Аральск; *в* – М Темир.

Как видно на рис. 2, в верхней полуволне синусоиды (2000...2011 гг.) фактическая ($F4 \cdot T_{год}$) и смоделированная (расчет $F4 \cdot T_{год}$) линии почти совпадают, коэффициент корреляции между ними равняется 0,96. Надо отметить, что крайние значения кривой колебания всегда меняются при прибавлении к ряду данных последующих лет. Поэтому пренебрегаем возникающей разницей между фактическими и расчетными данными в 2013...2017 гг. Соответственно, смоделированное синусоидальное колебание преобразованной в ряды Фурье годовой температуры воздуха (расчет $F4 \cdot T_{год}$) может быть показателем ожидаемого изменения температурного режима на период до 2039 г.

В итоге, согласно прогнозным расчетам, колебание средней годовой температуры воздуха с 2016 года входит в фазу повышения и достигает максимума в 2028...2029 гг., а далее снова пойдет на понижение до 2039 г.

Как видно по линии тренда, до 2039 г. сохраняется тенденция роста годовой температуры воздуха, с постепенным сокращением прироста к концу периода. Если учесть результаты предыдущих работ [6, 11] и соединить линии тренда на рис. 1 и 2, можно предположить существование циклического колебания длиной около 180 лет (минимальная точка в 1950 г., максимальная – в 2040 г.). Тогда с 2040 по 2130 год можно ожидать фазу понижения температуры воздуха. Естественно сильное антропогенное воздействие может внести свои коррективы.

Оценка влияния ожидаемого изменения температуры воздуха на экосистемы. Проведенные расчеты показали, что с 2016 по 2039 г. в исследуемых районах изменение средней годовой температуры воздуха составит в результате колебания климата 0,45...0,97 °С, а в результате изменения климата – 0,28...0,51 °С. Тогда индекс изменения среднегодовой температуры воздуха на период с 2016 по 2039 год составляет 48-61 %, что оценивается как «слабое влияние» на экологические системы (табл. 3).

Таблица 3

Изменение годовой температуры воздуха в результате колебания климата ($dT_{год}$) и изменения климата ($\Delta T_{год}$), а также индекс изменения температуры ($I_{T_{год}}$) на период с 2018 по 2039 год

М	$\Delta T_{год}, ^\circ\text{C}$	$dT_{год}, ^\circ\text{C}$	$I_{T_{год}}, \%$	Степень влияния на экосистемы
Щучинск	0,28	0,45	61	слабое влияние
Аральск	0,47	0,97	48	слабое влияние
Темир	0,51	0,92	55	слабое влияние

В заключение можно сказать, что более четко проявляется 22...23 летнее циклическое колебание средней годовой температуры воздуха. Произошедшее за последнее 83 года изменение режима температуры воздуха оказало очень сильное влияние на экологические системы. Предполагается, что колебание средней годовой температуры воздуха с 2016 года входит в фазу повышения и достигнет максимума в 2028...2029 гг. а далее снова пойдет на понижение до 2039 года. Изменение температурного режима за этот период окажет слабое влияние на экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байшоланов С.С. Моделирование режима температуры и осадков в Щучинско-Боровской курортной зоне на основе их циклических колебаний // Гидрометеорология и экология. – 2014. – № 4 (75). – С. 21-36.
2. Гармоническое колебание. [Электрон. ресурс]. – 2012. – URL: http://fizmat.by/kursy/kolebanija_volny/garmonicheskoe (дата обращения: 12.05.2014).
3. Климатология / Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.
4. Кривенко В.Г. Прогноз изменения климата Евразии с позиций концепции его циклической динамики // Всемирная конференция по изменению климата. Тезисы докладов. – М.: 2003. – 514 с.
5. Кривенко В.Г. Сохранение водоемов России, как источника пресной воды с позиций концепции изменчивости климата [Электрон. ресурс]– URL:<http://biodat.ru/doc/lib/krivenko2.htm> (дата обращения: 15.01.2018).
6. Кузнецов А.Д., Логинов В.Ф. Космические воздействия на атмосферу. – Л.: Изд. ЛПИ, 1984. – 160 с.
7. Методы гармонического анализа сезонности. [Электрон. ресурс]. – 2013. – URL: http://mobile.studme.org/150609139282/ekonomika/metody_garmonicheskogo_analiza_sezonnosti (дата обращения: 12.05.2014).
8. Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 424 с.
9. Синусоидальный ток. [Электрон. ресурс]. – 2011. – URL: <http://electrophysic.ru/elektricheskiy-tok/sinusoidalnyiy-tok.-opredelenie-arametriyi.html> (дата обращения: 12.05.2014).
10. Чередниченко А.В., Чередниченко А.В., Чередниченко В.С. Временные ряды температуры и осадков. Статистический анализ. – Алматы: 2013. – 365 с.

11. Экономико-математические методы и прикладные модели / Под ред. В.В. Федосеева. – М.: Издательство Юрайт, 2013. – 328 с.

Поступила 19.02.2018

Геогр. ғылымд. канд. С.С. Байшоланов
М.С. Габбасова

Геогр. ғылымд. канд. Н.У. Бултеков

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІНІҢ ЭКОЖҮЙЕЛЕРГЕ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ ҮШІН АУА ТЕМПЕРАТУРАСЫН ГАРМОНИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

Түйінді сөздер: климаттың өзгеруі, ауа температурасы, гармоникалық талдау, Фурье түрлендіруі, циклдік тербеліс, синусоидальді тербеліс, метеоэлементтің өзгеру индексі, экологиялық жүйелер

Қазақстанның үш метеорологиялық стансасы бойынша орташа жылдық ауа температурасының көпжылдық қатарына гармоникалық талдау жүргізілген, олардың 2039 жылға дейінгі болжамдық циклдік тербелістері моделденген, сонымен қатар олардың өзгеруінің экологиялық жүйелерге әсері бағаланған. Орташа жылдық ауа температурасының 22...23 жылдық циклдік тербелісі анықталған. Соңғы 83 жылда температуралық режимнің өзгеруінің экологиялық жүйелерге әсері «өте күшті әсер» болып бағаланады. Орташа жылық ауа температурасының циклдік тербелісі 2016 жылдан бастап өсі фазасына кіреді және 2028...2029 жылдары максимумға жетеді, ал одан әрі 2039 жылға дейін қайта төмендеуі мүмкін. Бұл кезең аралығындағы температура режимінің өзгеруі экологиялық жүйелерге әлсіз әсер етеді деп есептеледі.

Baisholanov S.S., Gabbasova M.S., Bultekov N.U.

HARMONIC ANALYSIS OF AIR TEMPERATURE FOR EVALUATING THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON ECOSYSTEMS

Keywords: climate change, air temperature, harmonic analysis, Fourier transform, cyclic oscillation, sinusoidal oscillation, meteorological element change index, ecological systems

A harmonic analysis of the long-term series of the average annual air temperature over three meteorological stations in Kazakhstan has been carried out, their predictive cyclic fluctuations have been modeled up to 2039, and the impact of their changes on ecological systems has

been assessed. A 22-23 year old cyclic fluctuation of the average annual air temperature has been revealed. The impact on environmental systems of temperature changes over the last 83 years is assessed as "a very strong influence." It is assumed that the cyclical fluctuation of the average annual air temperature from 2016 enters the phase of increase and will reach a maximum in 2028-2029, and then again will go down to 2039. It is also assumed that a change in the temperature regime over this period will have little effect on environmental systems.