

## ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ И ДИНАМИКИ МОРСКОГО ЛЬДА АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

Т.Е. Данова

Одесский государственный экологический университет, г. Одесса

*Исследование временных рядов среднемесячных значений Северно-Атлантического и Тихоокеанского декадного колебаний и общей сплоченности морского льда Арктического бассейна с помощью взаимного спектрального анализа позволило выявить тесную значимую связь между процессами. Выявлены долгопериодные колебания: от полугода до тридцати лет. Квазипериодичность для процесса PDO, характеризующего изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) и приземного давления в регионе Тихого океана севернее 20° с.ш., является основной, а для остальных исследуемых рядов – второстепенной.*

### Введение

В работе отражены результаты исследований взаимосвязи Северно-Атлантического и Тихоокеанского декадного колебания и суммарной сплоченности морского льда Арктического бассейна. Индекс Северно-Атлантического колебания (САК) является суммарным измерением состояния циркуляции в средних широтах Северной Атлантики. САК отражает колебание атмосферной массы между севером и югом Северной Атлантики с центрами в районе Исландии (минимум) и в районе Азорских о-вов (максимум). Пространственные особенности и временная изменчивость САК обычно определяются по полю давления на уровне моря (SLP), для которого существует наиболее длительный ряд инструментальных наблюдений. Обычно индекс САК вычисляется как разность нормированных значений давления на станции Гибралтар (Лиссабон или Понта Дельгада) и станции Рейкьявик. Согласно многочисленным исследованиям, Северо-Атлантическое колебание в значительной степени определяет погоду (интенсивность и траектории циклонов и штормов, аномалии осадков и приземной температуры воздуха) в большинстве стран Европы и на акватории Северной Атлантики в зимний сезон, поэтому тенденции климатических изменений в Европейском регионе невозможно правильно объяснить без этого индекса.

Термин «Тихоокеанское декадное колебание» или в английской транскрипции «Pacific Decadal Oscillation» (PDO) ввел Steven Hare в 1996 г., исследуя взаимосвязь между продуктивностью лосося на побережье Аляски и климатом северной части Тихого океана. Изменчивость PDO обычно представляют двумя индексами, рассчитанными на основе температуры поверхности океана (ТПО) и приземного давления. Изменения океанической циркуляции связаны с изменениями в поле температуры и солености в океане.

### Выходные данные и методика исследования

Из всего разнообразия источников индекса Северно-Атлантического колебания нами был выбран: Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, который рассчи-

тывается на основе стационарных данных как разница нормализованного давления на уровне моря (SLP) на станциях Лиссабон (Португалия) и Рейкьявик (Исландия).

Индексы (PDO) представляют средние аномалии ТПО и приземного давления за период с октября по март в регионе Тихого океана севернее 20° с.ш., рассчитанные по средним месячным значениям аномалий. На рис. 1 представлены как средние значения индексов за период с октября по март, так и скользящие средние значения индексов, рассчитанные как средние за пять лет. Положительные (отрицательные) значения индексов соответствуют положительной (отрицательной) фазе PDO. По характеру изменчивости индексов видно, что каждая фаза PDO имеет тенденцию длиться 20–30 лет. Внутри этих продолжительных периодов отмечены и короткие интервалы до 3 лет противоположной фазы PDO, например, 1959–1961 гг. и 1989–1991 гг. исследования [Trenberth, 1990; Trenberth and Hurrell, 1994; Zhang et al., 1997; and Mantua et al., 1997] показывают, что теплой фазе PDO соответствуют холодные аномалии ТПО в северной центральной части океана и теплые вдоль западного.

Источником данных общей сплоченности морского льда Арктического бассейна послужили: Nimbus-7 SMMR Arctic Sea Ice Concentrations or DMSP SSM/I Sea Ice Concentrations using the NASA Team Algorithm. Данные, описывающие ледовую обстановку в Арктическом бассейне, представлены в виде сетки с разрешением в один градус и наполнением (максимум – 100 % и минимум 0 %, в зависимости от характеристик морского льда) и подготовлены в Иллинойском университете. Они носят название ледовитость (Ice cover) и представляют собой процент площади, занятой льдом любой сплоченности по отношению к общей площади моря или какого-нибудь большого географического района. Этот район может быть глобальным, включающим площадь морей целого полушария, а может быть и какой-либо частью океана или моря. Далее данные были преобразованы и выражены в десятых долях, которые описывают общую площадь морской поверхности, покрытую льдом как часть всей рассматриваемой площади. Они, согласно

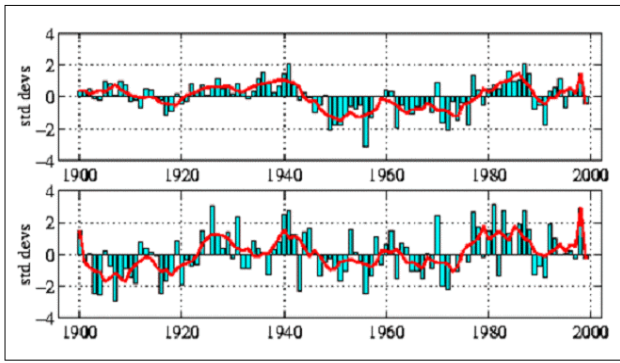


Рис. 1. Средние значения индексов Тихоокеанского декадного колебания (верхний рисунок – по ТПО, нижний рисунок – по приземному давлению) за период с октября по март и скользящие средние значения индексов, рассчитанные как средние за пять лет [Mantua, et al., 1997]

Международной номенклатуре морских льдов (ВМО), называются сплоченностью морского льда (Concentration).

Анализируются исторические данные общей сплоченности морского льда Арктического бассейна, относящиеся к 15 числу каждого месяца за период с 1900 по 2007 гг. Источником послужили:

1. Danish Meteorological Institute
2. Japan Meteorological Agency
3. Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO)
4. Kelly ice extent grids (based upon Danish Ice Charts)
5. Walsh and Johnson/Navy-NOAA Joint Ice Center
6. Navy-NOAA Joint Ice Center Climatology
7. Temporal extension of Kelly data (see note below)
8. Nimbus-7 SMMR Arctic Sea Ice Concentrations or DMSP SSM/I Sea Ice Concentrations using the NASA Team Algorithm.

Предлагаемые к исследованию данные разбиты на группы по способу получения информации [1]: 1 группа – 1900–1952 гг. В этой группе представлены сведения, полученные из исторических источников: наблюдения береговых поселений, кораблей, находящихся в море, о расположении кромки морского льда, о характеристиках льда (количестве и толщине). Наполнение периода проводилось с учетом климатологии региона, использованы методы интерполяции. 2 группа – 1953–1971 гг. Представляет собой полусферические наблюдения, имеющие разные источники. Безусловно, надежность измерений меняется с каждым источником, но в общем данные достаточно точны и надежны. 3 группа – 1972–2007 гг. Период спутника – полусферический охват.

Первичная подготовка данных включала в себя: декодировку, разбивку помесячно, по годам, по группам; осреднение данных проводилось по годам, группам и по всей выборке в целом, составляющей 107 лет. В качестве основы для типизации ледяного покрова морей Арктики использованы величины суммарной сплоченности, которые определялись путем суммирования значений общей сплоченности морского льда для середины каждого

месяца за соответствующий период. Для характеристики всего исследуемого поля введено суммарное значение сплоченности поля  $Y_{\text{поля}}$ .

Все данные раньше были подвергнуты статистическому анализу [2]. В работе в качестве метода анализа информации использован взаимный спектральный анализ суммарной сплоченности морского льда Арктического бассейна и предложенных индексов NAO и PDO. Спектральный анализ является одним из важных методов статистического исследования случайных временных рядов, этот метод всесторонне используется в разных отраслях науки и техники, в том числе в гидрометеорологии для физико-статистического моделирования сложных атмосферных процессов. Стационарные случайные функции в «чистом» виде встречаются очень редко, однако нас интересует протекание случайного процесса на небольшом интервале значений, и если условия стационарности выполняются для этого интервала, то можно считать такую случайную функцию стационарной.

### Результаты исследования и их анализ

Алгоритм исследования стационарных случайных процессов был реализован на ПЭВМ (компьютерная программа «Spektr»). Это дало возможность получить статистические оценки взаимной спектральной плотности отдельных случайных процессов, а именно среднемесячных значений общей сплоченности морского льда Арктического бассейна (процесс  $X$ ) и среднемесячных значений индекса NAO (процесс  $Y$ ) за период 1900–2000 гг. – в первом эксперименте, и среднемесячных значений индекса PDO (процесс  $Y$ ) за период 1901–2007 гг. – во втором эксперименте, все данные имеют дискретность один месяц. Поскольку взаимная спектральная плотность является комплексной функцией, охарактеризуем ее действительными функциями ко-спектра  $C_{x_i x_j}(\omega)$ , квадратурного спектра  $Q_{x_i x_j}(\omega)$  и когерентности  $\gamma(\omega)$  (табл. 1).

Как известно, функция:  $C_{x_i x_j}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{x_i x_j}^{(+)}(\tau) \cos \omega \tau d\tau$  называется ко-спектром и является косинус-преобразованием Фурье от парной функции  $K_{x_i x_j}^{(+)}(\tau)$ . Ко-спектр характеризует разложение по частотам энергии синхронного взаимодействия процессов  $X_i(t)$  и  $X_j(t)$ .

Квадратурный спектр  $Q_{x_i x_j}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{x_i x_j}^{(-)}(\tau) \sin \omega \tau d\tau$  показывает вложение разных гармоник в суммарную ковариацию при условии, когда все гармоники временной последовательности  $X_i(t)$  сдвинуты по фазе на четверть периода назад, а последовательность  $X_j(t)$  остается неизменной. Квадратурный спектр характеризует распределение по частотам энергии несинхронного взаимодействия процессов  $X_i(t)$  и  $X_i(t)$ . Таким образом, квадратурный спектр характеризует вклад в общую взаимную корреляцию двух случайных процессов гармоник, содержащихся в них, при сдвиге фаз этих гармоник на четверть периода. Вероятность статистических оценок взаимной спектральной плотности будем определять по когерент-

Статистические оценки взаимной спектральной плотности общей сплоченности морского льда Арктического бассейна и среднемесячных значений индексов NAO и PDO

№ п/п	Ко-спектр $C_{x_i x_j}(\omega)$	Кв-спектр $Q_{x_i x_j}(\omega)$	Когерентность $\gamma(\omega)$	Период, месяц	Сдвиг, град.	Сдвиг, месяц
С индексом NAO						
128	1,57	-1,20	0,96	8,0	322,59	7,2
130	1,22	-1,14	0,95	7,9	316,92	6,9
136	0,48	-2,75	0,96	7,5	279,86	5,9
С индексом PDO						
4	-51,33	30,41	0,90	256,0	329,34	234,2
<b>6</b>	<b>-26,75</b>	<b>2,70</b>	<b>0,94</b>	<b>170,7</b>	<b>354,23</b>	<b>167,9</b>
51	1,97	-1,47	0,91	20,1	323,25	18,0
<b>74</b>	<b>4,68</b>	<b>-0,79</b>	<b>0,92</b>	<b>13,8</b>	<b>350,41</b>	<b>13,5</b>
<b>175</b>	<b>-1,80</b>	<b>0,46</b>	<b>0,92</b>	<b>5,9</b>	<b>345,66</b>	<b>5,6</b>
198	-0,08	0,17	0,91	5,2	295,17	4,2
254	-0,04	0,76	0,94	4,0	272,97	3,1
264	0,12	-0,22	0,91	3,9	298,58	3,2
329	-0,14	0,45	0,93	3,1	287,24	2,5
355	0,13	-0,14	0,96	2,9	312,86	2,5

ности при условиях  $\gamma(\omega) \geq 0,90$ , которые поместим в табл. 1. Жирным шрифтом в таблице выделены значения гармоник в «фазе». Когерентность представляет собой меру стойкости разницы фаз. Если разница фаз двух процессов устойчива, то  $\gamma(\omega) \rightarrow 1$ , если разница фаз неустойчива, то  $\gamma(\omega) \rightarrow 0$ .

Как видим, для гармоник от 7,5 до 8,0 месяцев наблюдается опережение изменений индекса NAO по отношению к общей сплоченности морского льда на период от 5,9 до 7,2 месяцев. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение состояния циркуля-

ции в средних широтах Северной Атлантики каждые восемь месяцев оказывают влияние на динамику морского льда Арктического бассейна, и этот отклик наблюдается спустя полгода после начала изменений в атмосферной циркуляции Атлантики.

В эксперименте с индексом PDO для гармоник от 3 до 256 месяцев (21,3 лет) также наблюдается опережение изменений индекса PDO по отношению к изменениям общей сплоченности морского льда Арктики, а запаздывание изменений в значениях общей сплоченности морского льда в этих случаях наблюдается на срок приблизительно равный самому периоду колебания. Для гармоник

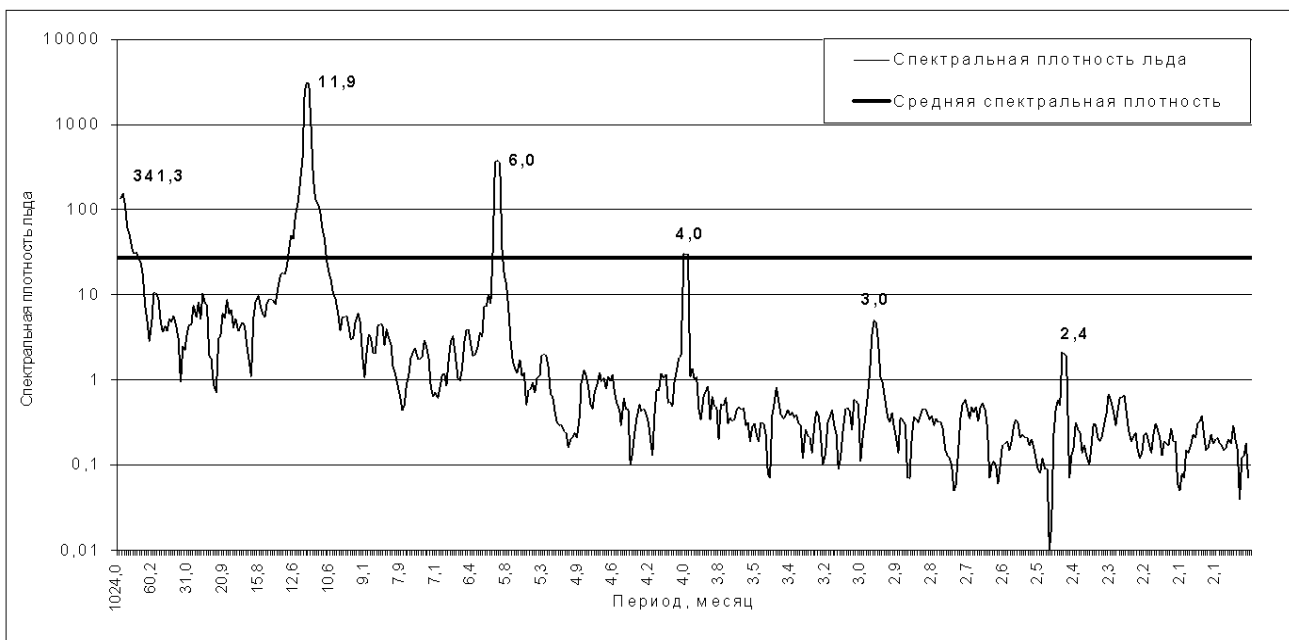
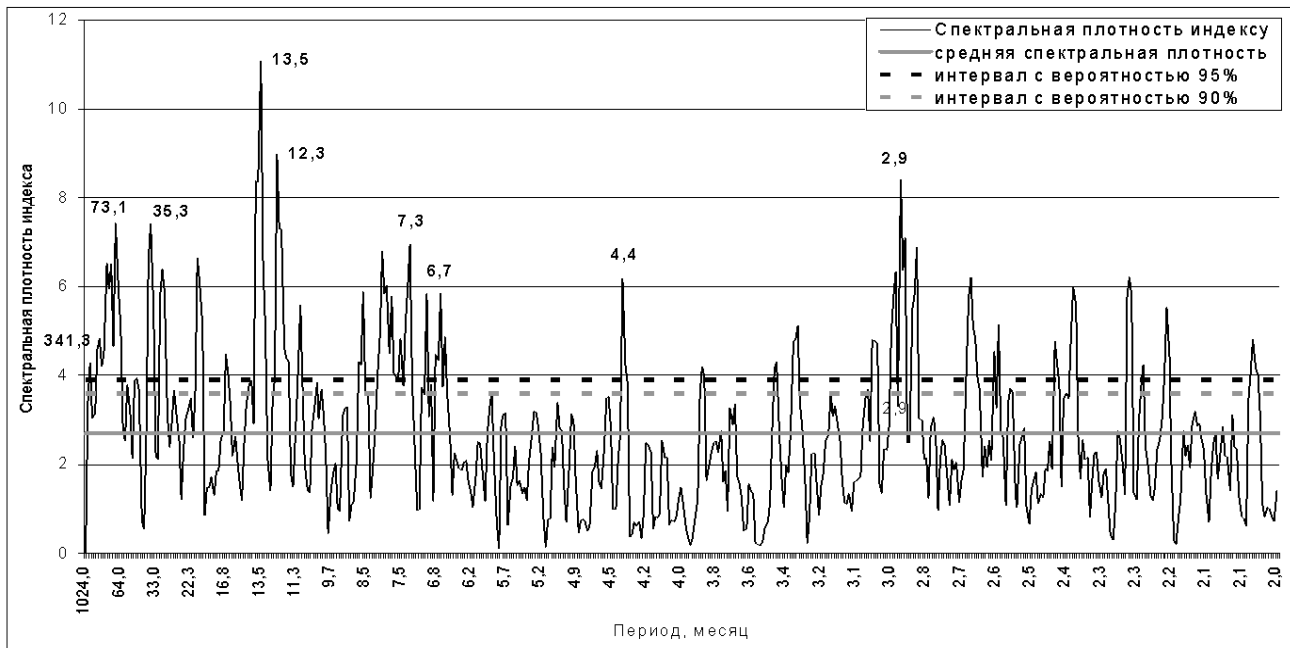


Рис. 2. Спектрограмма общей сплоченности морского льда Арктического бассейна и средние значения спектральной плотности



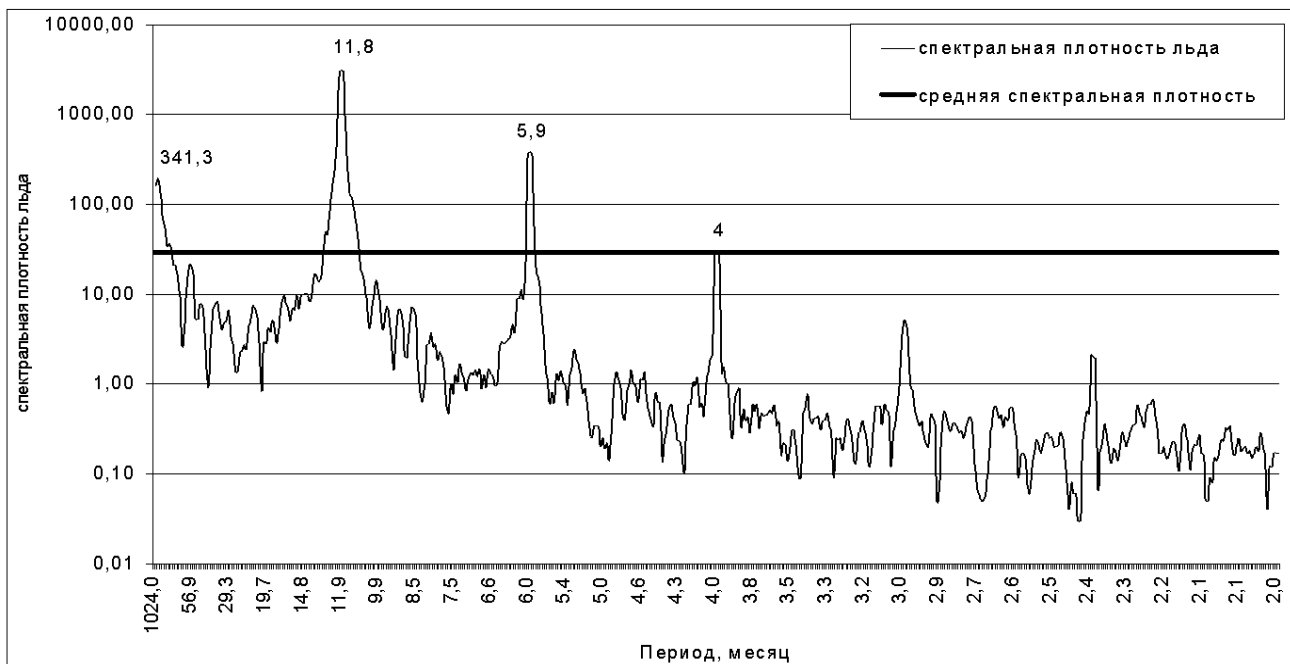
**Рис. 3. Спектрограмма индекса NAO и доверительные интервалы, построенные с вероятностью 95 % и 90 %**

170,7 месяца (14,0 лет), а также годовых и полугодовых характерны колебания «в фазе».

Колебания с периодом 256 месяцев (квизидвадцатидвухлетние) соответствуют длительности двух циклов солнечной активности. Известно, что солнечная активность в числа Вольфа имеет циклический характер со средней длительностью в 11,2 года, а магнитный цикл Солнца равен 22 годам. Возможно, в нашем случае квизидвадцатидвухлетняя периодичность свидетельствует о взаимосвязи солнечной активности и динамики общей сплоченности морского льда Арктики с запаздыванием на 19,5

лет. На рис. 2–5 представлены спектрограммы исследуемых процессов.

Как следует из рис. 1 и 3, в спектральной плотности значений общей сплоченности морского льда Арктического бассейна за 15 число каждого месяца за период 1900–2000 гг. выявлены годовые, полугодовые и сезонные колебания, а также колебания с периодом – 341,3 месяца (28,4 г.). В спектральной плотности среднемесячных значений индекса NAO (рис. 2) выявлены гармоники с периодом – 341,3; 73,1 и 35,3 месяца, а также годовые, полугодовые и сезонные колебания.



**Рис. 4. Спектрограмма суммарной сплоченности морского льда Арктического бассейна**

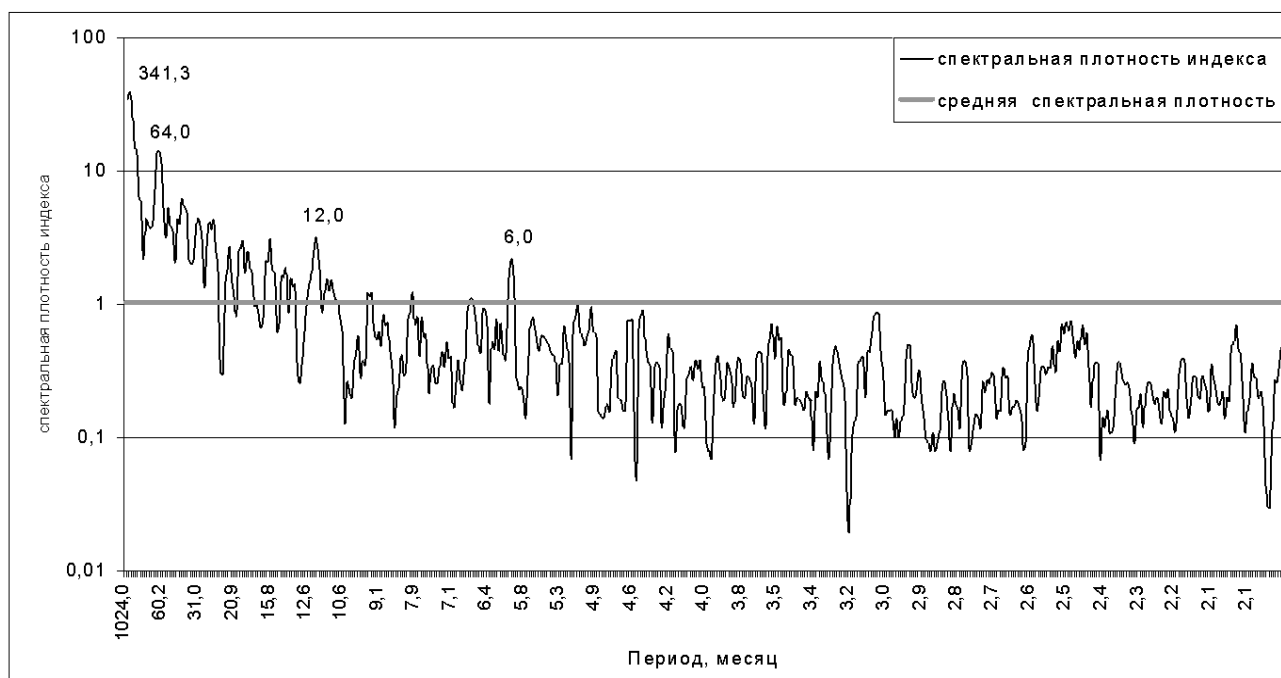


Рис. 5. Спектрограмма индекса PDO

В спектральной плотности среднемесячных значений индекса PDO за период 1901–2007 гг. выявлены долгопериодные колебания (341 месяц (28,4 г.), 64 месяца (5,3 г.)), а так же годовые и полугодовые. Известно, что спектральную плотность случайной функции можно рассматривать как «энергетический спектр» этой функции. Проведенный взаимный спектральный анализ данных 1901–2007 гг. для индекса NAO и для индекса PDO позволил получить доминирующие и второстепенные периоды колебаний, которые представлены в табл. 2.

Для рядов индекса NAO и суммарной сплоченности морского льда Арктического бассейна получены второстепенные пики с периодом 28,4 года, причем в ряде суммарной сплоченности морского льда пик квазитридцатилетней периодичности энергетически более выражен, чем в ряде индекса NAO. В эксперименте с индексом PDO также определена квазитридцатилетняя периодичность. В этом случае для индекса PDO квазитридцатилет-

нему пику принадлежит максимум энергии, то есть для Тихоокеанского декадного колебания эта периодичность является основной.

Известно, что как глобальные (Глобальная Td), так и региональные климатические индексы, к которым относятся PDO, NPI, имеют общую циклическую динамику приблизительно с 60-летним периодом [3, 4]. На фоне вековых линейных трендов разных климатических показателей, включая сплоченность разных регионов Северного Ледовитого океана, периоды положительных значений трендов длительностью 25–30 лет чередуются периодами почти равной длительности с отрицательными. Из этих данных можно сделать вывод, что полный цикл колебаний насчитывает приблизительно 55–60 лет. Вполне возможно, что существует однообразное развитие климатических процессов приблизительно 60-летней периодичности в масштабах хотя бы Северного полушария.

Таблица 2  
Доминирующие периодичности в рядах суммарной сплоченности морского льда Арктического бассейна и индексов NAO и PDO

Ряд	Длина ряда, год	Доминирующий пик, год	Второстепенные максимумы, год
Период 1900–2000 гг. – индекс NAO			
Суммарная сплоченность морского льда Арктики	100 лет $N_1=2^{10}=1024$	1 год	28,4 лет, 6 и 4 месяца
Индекс NAO	100 лет $N_1=2^{10}=1024$	1 год	28,4 лет, 6,1 лет, 2,9 года, 4 месяца
Период 1901–2007 гг. – индекс PDO			
Суммарная сплоченность морского льда Арктики	107 лет $N_1=2^{10}=1024$	1 год	28,4 лет, 6 и 4 месяца
Индекс PDO	107 лет $N_1=2^{10}=1024$	28,4 лет	5,3 лет, 1 год, 6 месяцев

### Выводы

Проведенное исследование временных рядов среднемесячных значений Северно-Атлантического и Тихоокеанского декадного колебания и общей сплоченности морского льда Арктического бассейна с помощью взаимного спектрального анализа позволило выявить тесную значимую взаимосвязь между рассматриваемыми процессами:

1. В проведенных экспериментах выявленная значимая зависимость динамики морского льда Арктики от региональных индикаторов климатических изменений NAO и PDO.

2. Во всех исследуемых рядах выявлены долгопериодные колебания: от полугода до тридцати лет (по классификации Добрышмана С.Н.).

3. С 90 % вероятностью во взаимосвязи морской лед – процесс PDO выявлены колебания с периодом 256 месяцев (квазидвадцатидвухлетнее), которые соответствуют длительности двух циклов солнечной активности.

4. Колебание с периодом 28,4 лет для процесса PDO, характеризующего изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) и приземного давления в регионе Тихого океана севернее 20° с.ш., является основным. В то же время регистрация второстепенных колебаний с периодом 28,4 лет в ряду общей сплоченности морского льда является показателем влияния индекса PDO на динамику морского льда Арктики.

5. Установленная, квазитридцатилетняя периодичность на фоне вековых трендов является лишь половиной полного 55–60-летнего цикла.

Таким образом, полученные результаты подтверждают существование статистически значимых межширотных связей крупномасштабных атмосферных и гляциальных процессов Северного полушария, что дает возможность использовать эти результаты в прогнозе динамики морских льдов данного региона.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Danova T.E., Galat E.V. Climatology of sea ice of the Northern hemisphere // Международный полярный год в Украине: итоги и перспективы: тезисы Международной научн. конф. Харьков, 2009. С. 60.
2. Данова Т.Е., Галат Е.В. Динамика концентрации морского льда северного полушария за период 1870–2007 гг. // Український гідрометеорологічний журнал. 2009. Вип. 5. С. 243–249.
3. Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. М.: ВНИРО, 2005. 235 с.
4. Vinje T. Sea ice variability in the Nordic seas // In: Proc. Int. Conf. on the Role of the Polar Regions in Global Change. 1992. Vol. 1. PP. 23–27.

*The research of temporal rows of monthly values of the North-Atlantic and Pacific decade oscillations, and a general solidarity of the Arctic basin sea ice, carried out by the mutual spectral analysis, has revealed a close meaningful relation between the processes. It is observed the long period oscillations, from half a year to thirty years. The quasi periodicity of thirty years for the PDO process, which characterizes changeability of the ocean surface temperature (OST) and the surface pressure in the Pacific ocean region, to the north further than 20° n.lat, is a basic one, and for the other explored rows just of a second-rate.*