

# Вейвлет-анализ индекса Тихоокеанской декадной осцилляции и температурных индексов Эль-Ниньо.<sup>2</sup>

Белоненко Т.В. (Санкт-Петербург, СПбГУ)

Целью данной работы является исследование при помощи вейвлет-анализа изменчивости индекса Тихоокеанской декадной осцилляции и температурных индексов Эль-Ниньо, установление связей между ними, выделение характерных масштабов изменчивости и выяснение влияния этих гидрометеорологических предикторов на биологическую продуктивность некоторых промысловых рыб Северо-западной части Тихого океана.

Одним из важных направлений климатических исследований является изучение различных гидрометеорологических и геофизических индексов, фиксирующих в сжатой форме основные параметры изменчивости. Характер колебаний температуры поверхностных вод в Тихом океане позволяет предполагать существование низкочастотной цикличности, зафиксированной в индексе Тихоокеанской декадной осцилляции – **PDO (Pacific Decadal Oscillation)**, который определяется по температуре поверхности океана (ТПО) в северной нетропической части Тихого океана и рассчитывается, как первый член разложения аномалий ТПО по эмпирическим ортогональным функциям (ЕОФ). Индекс Тихоокеанской декадной осцилляции – изменяющийся во времени коэффициент при первом члене этого разложения. Многолетние наблюдения за изменениями температуры воды в Тихом океане, а также последние геофизические данные, полученные со спутника, позволили предположить существование гидрометеорологических циклов больших периодов. Несомненно, эти колебания существенно влияют на климат и, по всей вероятности, связаны с явлением Эль-Ниньо—Южная осцилляция, при котором происходит резкое потепление экваториальных вод Тихого океана и атмосферы над ними.

Понятие Pacific Decadal Oscillation (PDO) впервые было введено в научный оборот в 1995 г. Hare и Francis (S. Hare and R. Francis, 1995). Изучая зависимость вылова тихоокеанского лосося и изменчивость климата в северной части Тихого океана, они выделили индексы PDO и Эль-Ниньо (El Niño/Southern Oscillation), как два основных фактора, ответственные за изменчивость климата Тихого океана, которые, хотя и имеют схожие проявления (Tanimoto et al., 1993; Zhang et al., 1997), в то же время существенно различны во временной изменчивости.

Вот два основных признака, отличающих изменчивость PDO от El Niño/Southern Oscillation (ENSO). Во-первых, в 20-м столетии продолжительность теплых и холодных

<sup>2</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-05-64876.

фаз PDO достигает, как минимум, 20-30 лет, в то время как для ENSO она гораздо меньшая: 6-18 месяцев (Mantua et al., 1997); во-вторых, изменчивость PDO наиболее существенна для Северной части Тихого океана и Северной Америки, в то время как ENSO оставляет наибольший след в тропической части, хотя «дальние связи» ENSO являются предметом многих исследований.

Численные значения индекса PDO не превышают  $1^{\circ}$ - $2^{\circ}$ C, но его пространственное распределение существенно анизотропно, что имеет колоссальное значение для всего региона. Индекс PDO имеет положительные значения, когда ТПО аномально высокая вдоль побережья Северной и Центральной Америки до экватора, но холодная во внутренней части Тихого океана, а в противоположных случаях индекс отрицательный. На рис. 1 представлено пространственное распределение 1 и 2 члена разложения ТПО по ЕОФ. PDO вне побережья Японии фиксируется на картах в виде огромных подковообразных водных масс с ТПО, превышающей средние значения (Trenberth and Hurrell, 1994). Согласно Sang-Wook Yeh and Ben P. Kirtman (2005), первый член разложения по ЕОФ индекса PDO объясняет 36.2 % общей изменчивости ТПО, второй член разложения – 25.2%, но в то же время при декадной фильтрации вклад этих слагаемых в изменчивость уже превышает 90%. Таким образом, можно утверждать, что именно первые два слагаемых, прежде всего PDO, доминирует в изменчивости ТПО.

Несколько независимых исследователей обнаружили два полных цикла PDO в прошлом столетии: "холодные" PDO-режимы преобладали с 1905 до 1924 и снова с 1947 до 1976, в то время как "теплые" PDO-режимы доминировали с 1925 до 1946 и с 1977 до (по крайней мере) середины 1990-х годов. В частности, согласно исследованиям Shoshiro Minobe (1997), в 20-м столетии изменчивость PDO была наиболее значительна для двух масштабов: 15-25 лет и 50-70 лет<sup>3</sup>.

Первый масштаб включает 22-летний цикл – удвоенный период солнечной активности. Theodor Landscheidt выдвинул гипотезу, что этот 22-летний цикл связан также и с ENSO – индексами Эль-Ниньо. Landscheidt подробно исследовал связь PDO с периодом солнечной активности и его удвоенным значением и показал, что такого рода связь существует не только с PDO и ENSO, но также и с индексами North Atlantic Oscillation (NAO) и различными природными явлениями, например, наступлениями экстремумов температурных аномалий, засухами, ливнями и наводнениями (1983, 1990, 1995, 1998 а, 1999 а, 2000 а, 2001).

<sup>3</sup> (<http://ingrid.ldeo.columbia.edu/%28/home/alexeyk/mydata/TSSvd.in%29readfile/.SST/.PDO/>)

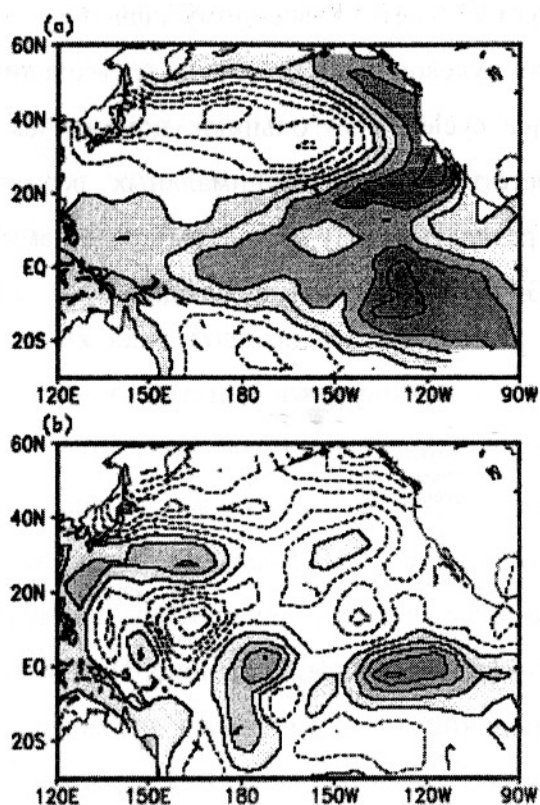


Рис. 1. Пространственное распределение первого и второго членов разложения по ЕОФ для Северной части Тихого океана, построенных по массиву ТПО (SSTA) за период 1900-2001 (см. Yeh, S.-W. and Kirtman B.P., 2005)

Установлено, что в промежутки, соответствующие положительным значениям PDO, сток реки Фрейзер (Канада) и колумбийских рек в среднем на 14 % выше, чем в промежутки, соответствующие отрицательным значениям PDO. Напротив, в центральном заливе Аляски сток реки Кенай увеличивается на 18% в периоды отрицательных значений PDO. Наблюдается положительная корреляция в зимние сезоны года с количеством осадков в северной Мексике и южной Флориде, а отрицательная корреляция существует с количеством осадков вне Северной Америки и над Гавайскими островами. В зимнее время температура поверхности воздуха вдоль направления от Аляскинского залива к южной Калифорнии меняется в зависимости от PDO (Mantua et al., 1997).

На рис. 2 представлен график среднемесячных значений индекса PDO для 20°N для зимних периодов 1900-1998 гг., сглаженных при помощи преобразования Гаусса, которое применялось для того, чтобы выделить периодичности, большие 20 лет (Mantua, 2001). Максимумы на графике отражают теплые режимы PDO, минимумы – холодные. Согласно расчетам Landscheidt (1998 b, 2000 b, 2000 c), кривая PDO характеризуется циклами 35.8 лет, связанными с перемещением центра масс солнечной системы, которые в свою очередь формируют 16-летние циклы. Отклонения от синусоидальной формы кривой

отражают вклад колебаний с периодом, равным 71.6 лет – удвоенному значению 35.8 лет (Landscheidt, 2000 а, 2001). На рис. 2 значения нулевой фазы помечены треугольниками и метками GPTC (Greatest perturbation in torque cycle). Треугольники, помеченные LPTC (Least perturbation in torque cycle), соответствуют фазе минимальных возмущений. Действительно, на рис. 2 легко увидеть, что разность между абсциссами с метками GPTC кратна 35.8 г., между абсциссами с метками GPTC и LPTC кратна 16 годам.

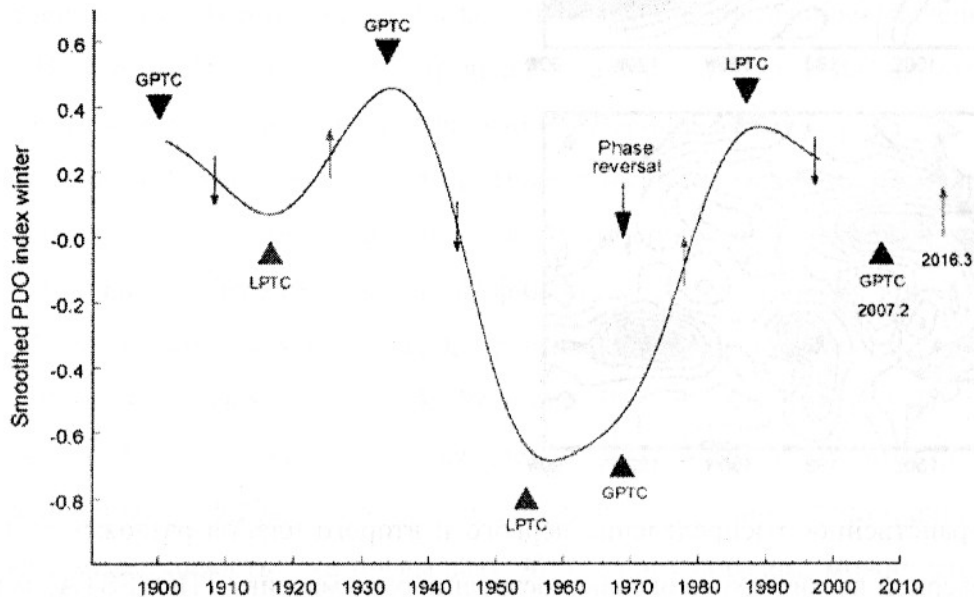


Рис. 2. График сглаженных значений индекса PDO для 20°N для зимних периодов 1900-1998.

Режимы сдвига (переход от теплой фазы к холодной и наоборот) на рисунке помечены стрелками и соответствуют датам 1908.2, 1925.1, 1944.1, 1977.9, и 1997.2. На нем можно увидеть, в частности, сдвиг 1998 г. от положительных к отрицательным значениям PDO. Такие сдвиговые режимы имеют далеко идущие последствия, в частности, существенно влияют на поведение отдельных событий ENSO и определяет существование различных биологических циклов.

Изученность индекса PDO в настоящий момент недостаточна и это в первую очередь связано с возможностями прогнозирования климатических трендов. Существуют различные модели изменчивости индекса PDO, дающие различные объяснения этой изменчивости и предсказывающие декадные циклы PDO. Наиболее популярная из них гидрометеорологическая: если изменчивость индекса PDO определяется взаимодействием океана и атмосферы, то прогноз может быть построен, исходя из предсказания периода приспособления океана к изменчивости в атмосфере. Для Северной Америки даже при отсутствии строгой теории эта прогностическая модель хорошо работает, основываясь на

устойчивости климатических трендов сезонной и межгодовой изменчивости индекса PDO (Goodrich G.B., 2004).

Однако существуют объективные причины ограниченности применения этих моделей, определяемые ограниченностью температурных временных рядов, в частности, оценки PDO существуют лишь с 1900 г. Есть различные попытки расширить временные границы наблюдений, привлекая другие данные. Например, существуют работы американских климатологов и дендрологов, которые изучали годовичные кольца старых деревьев на юге штата Калифорния и в мексиканском штате Нижняя Калифорния и смогли сделать выводы об изменениях климата восточной субтропической акватории Тихого океана за последние 350 лет. Оказалось, размеры годового прироста деревьев тесно связаны с индексом PDO по крайней мере в последние 75 лет. Согласно реконструкции, наибольшие климатические возмущения происходили здесь около 1750, 1905 и 1947 гг. (Biondi F., Gershunov A., Cayan D., 2001).

В данной работе для исследования привлекаются временные ряды среднемесячных значений индекса PDO, для которых применяется вейвлет-анализ – аппарат, наиболее приспособленный для изучения структуры неоднородных и нестационарных процессов, который позволит для рассматриваемых промежутков времени выделить масштабы максимальной или минимальной интенсивности колебаний. В качестве базисных функций нами были выбраны вейвлеты Морле, которые, как нам представляется, хорошо приспособлены для исследования процессов, содержащих климатическую и синоптическую составляющие (Смоленцев, 2003).

Напомним, что вейвлет-преобразование сигнала является обобщением спектрального анализа, в основе которого лежит классическое преобразование Фурье. В вейвлет-анализе роль простых колебаний играют вейвлеты – солитонобразные функции двух аргументов: масштаба и сдвига. Понятие частоты классического спектрального анализа здесь заменено масштабом, и, чтобы перекрыть «короткими волнами» всю временную ось, введен сдвиг функций во времени. В отличие от традиционного преобразования Фурье, вейвлет-преобразование обеспечивает двумерное представление исследуемого одномерного сигнала в частотной плоскости частота – положение.

Аналогом частоты при этом является масштаб аргумента базисной функции, а положение характеризуется ее сдвигом. Это позволяет локализовать крупные и мелкие детали сигналов, одновременно локализуя их на временной шкале. Иными словами, вейвлет-анализ – это локализованный нестационарный спектральный анализ, позволяющий не только определить промежутки и время наступления положительных и отрицательных экстремумов значений, но и детализировать, на каких масштабах изменчивости происходят эти возмущения. Результатом вейвлет-преобразования

одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования – значения коэффициентов вейвлет-преобразования. Распределение этих значений в пространстве сдвиг-масштаб дает информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени.

На рис. 3 представлены временной ход и соответствующее вейвлет-изображение индекса PDO. В качестве исходных значений рассматривались среднемесячные значения индекса, начиная с 1900 г. до 2004 г., всего 1260 значений. По графику временного хода индекса PDO (рис. 3) можно определить, что изменчивость происходит в широком диапазоне масштабов. Наибольшее значение индекса PDO составляет 3.51, достигается в июле 1983 г. (значение 3.31 достигается в августе 1941 г.), наименьшее значение, равное -3.60, – в феврале 1949 г. (значение -3.08 достигается в ноябре 1955). Среднее значение индекса равно 0.04.

Длина реализации индекса PDO позволяет при помощи вейвлет-преобразования изучать интенсивность колебаний в диапазоне масштабов от 1 месяца до 35 лет, причем с одинаковой степенью разрешения относительно масштаба и сдвига. Обратим внимание, что интенсивность предельных значений низкочастотных колебаний (35 лет) индекса PDO выделяются с 1930 до 1995 гг.: на рис. 3 отмечены три области, фиксирующие увеличение энергии этих колебаний, при этом очевидно, что на самом деле в изменчивости этой характеристики присутствуют и колебания больших периодов.

Зафиксируем масштаб, равный 20 годам ( $a = 240$ ). Нетрудно убедиться, что для низких частот вейвлет-изображение на рис. 3 хорошо согласуется с графиком индекса PDO на рис. 2, где применено низкочастотное сглаживание. Отметим, что вейвлет-анализ позволяет представить график для различных масштабов с одинаковым разрешением. Для масштаба 20 лет до 1957 г. на графике вейвлет-преобразования прослеживается отмеченная ранее Landscheidt цикличность, равная 16 годам – четыре области увеличения интенсивности колебаний соответствуют промежуткам: до 1910 г., с 1910 до 1926 гг., с 1926 до 1942, с 1941 до 1957 гг. Далее эта цикличность нарушается, промежутки составляют 9 лет (1957 – 1966 гг.), 14 лет (1966 – 1980 гг.), 12 лет (1980 – 1992 гг.) и (1992 – 2004 гг.). Интенсивность этих колебаний также различна: энергия колебаний существенно больше в центральной части реализации.

Отметим интересную особенность: области увеличения энергии колебаний наклонены относительно системы координат. Например, для промежутка 1910-1926 гг. наклон области увеличения энергии колебаний свидетельствует о перераспределении энергии от низких масштабов (20-40 лет) к более высоким, в частности, десятилетним колебаниям ( $a = 120$ ), причем энергия передается уже вне рассматриваемого промежутка, в данном примере к десятилетним колебаниям на промежутке реализации 1931-1937 гг. В

то же время для масштаба  $\alpha=180$  (15 лет) происходит передача энергии от высокочастотных колебаний к низкочастотным для промежутка 1977-1986 гг.

Вытянутые области максимальной энергии связаны, вероятно, с передачей энергии от одних временных масштабов к другим, которые многими исследователями называются «дальними связями». Вейвлет-анализ воочию предлагает увидеть, каким образом осуществляются эти «дальние связи». Когда этот наклон направлен из области больших периодов в область низких – идет поток энергии от крупномасштабных движений к мелкомасштабным, связанный с нелинейной генерацией турбулентности, обусловленной динамической неустойчивостью крупномасштабных движений. Когда в обратную сторону, то происходит энергоснабжение крупномасштабных движений от мелкомасштабных. Подобные процессы получили название в физике «движений с отрицательной вязкостью». Локализованные максимумы энергии на вейвлет-изображении могут означать области энергоснабжения от внешних источников.

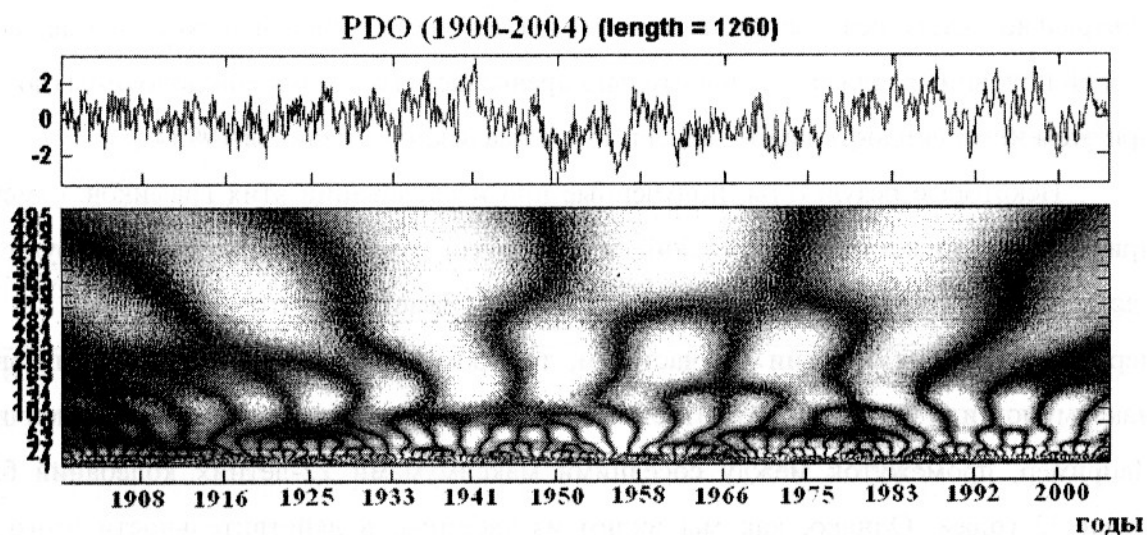


Рис. 3. Временной ход PDO (вверху) и его вейвлет-изображение (внизу).

На рис. 3 мы видим, что на графике в изменчивости индекса PDO, полученным непрерывным вейвлет-преобразованием исходной реализации, представлены все рассматриваемые масштабы, хотя и с различной степенью интенсивности для разных промежутков времени (например, в промежутке от 1935 до 1945 лет). Обратим внимание, что здесь также выделяются отмеченные другими исследователями масштабы изменчивости 20-30 лет (значения ординат  $\alpha = 240-360$ ), а также 15-25, 16 и 35,8 лет. Но вклад колебаний этих периодов для разных промежутков времени существенно различается.

Таким образом, нельзя утверждать, что в рассматриваемой изменчивости ярче всего выражены те или иные периодичности. Очевидно, однако, что эта изменчивость определяется конкретными физическими закономерностями, а отсутствие на вейвлет-

изображении приоритетных масштабов может свидетельствовать о перераспределении энергии по всему непрерывному спектру частот. Исходя из предпосылки о физической обусловленности процессов, выделим для дополнительного исследования характерные масштабы, традиционно присутствующие в изменчивости большинства гидрометеорологических характеристик в исследуемом низкочастотном диапазоне, а именно: 22 г. – удвоенный цикл солнечной активности, 19 лет – период действия приливообразующих сил Луны и Солнца, 11 лет – период солнечной активности, 7 лет – составляющая нутационного периода, 14 мес. – период изменения скорости вращения Земли – нутационный прилив, 12 месяцев – годовой цикл, 6 месяцев – полугодовой цикл.

На рис. 4 представлен сравнительный вклад колебаний различных масштабов в изменчивость индекса PDO на графиках линейных коэффициентов. Очевидно, что в различные промежутки времени вклад их существенно различен. Например, вклад низкочастотных компонент (периоды 22, 19 и отчасти 11 лет) наибольший для центральной части реализации, в то время как для изменчивости масштаба 7 лет вклад во второй половине реализации значительно превышает его для первой половины (до 1955г.), при этом интенсивность наибольшая в конце реализации (начиная 1995 г.).

Некоторые результаты, полученные при исследовании этих графиков, отмечены в приведенной ниже таблице. Третий и четвертый столбцы таблицы фиксируют время наступления соответствующего экстремума. Заметим, что если бы не было перераспределения энергии по частотам, то промежутки наступления локализованных максимумов или минимумов соответствовали бы исследуемому масштабу изменчивости. Например, промежуток между соседними максимумами 22-летних колебаний был бы равен 22 годам. Однако, как мы видим из таблицы, в действительности этого нет, в данном случае промежутки существенно больше. Для соседних максимумов промежутки составляют 29, 25 и 24 года, а для минимумов 26, 25 и 25 лет. Это свидетельствует о том, что амплитуда рассматриваемых колебаний содержит информацию о колебаниях других масштабов, в частности, о более низкочастотной компоненте.

Другая особенность связана с амплитудной модуляцией, например, для масштаба, равного 12 месяцев, и в особенности 14 месяцев (рис. 4). Изменчивость экстремумов амплитуды колебаний для периода 14 месяцев меняется во времени с периодом 30, а затем 40 лет.



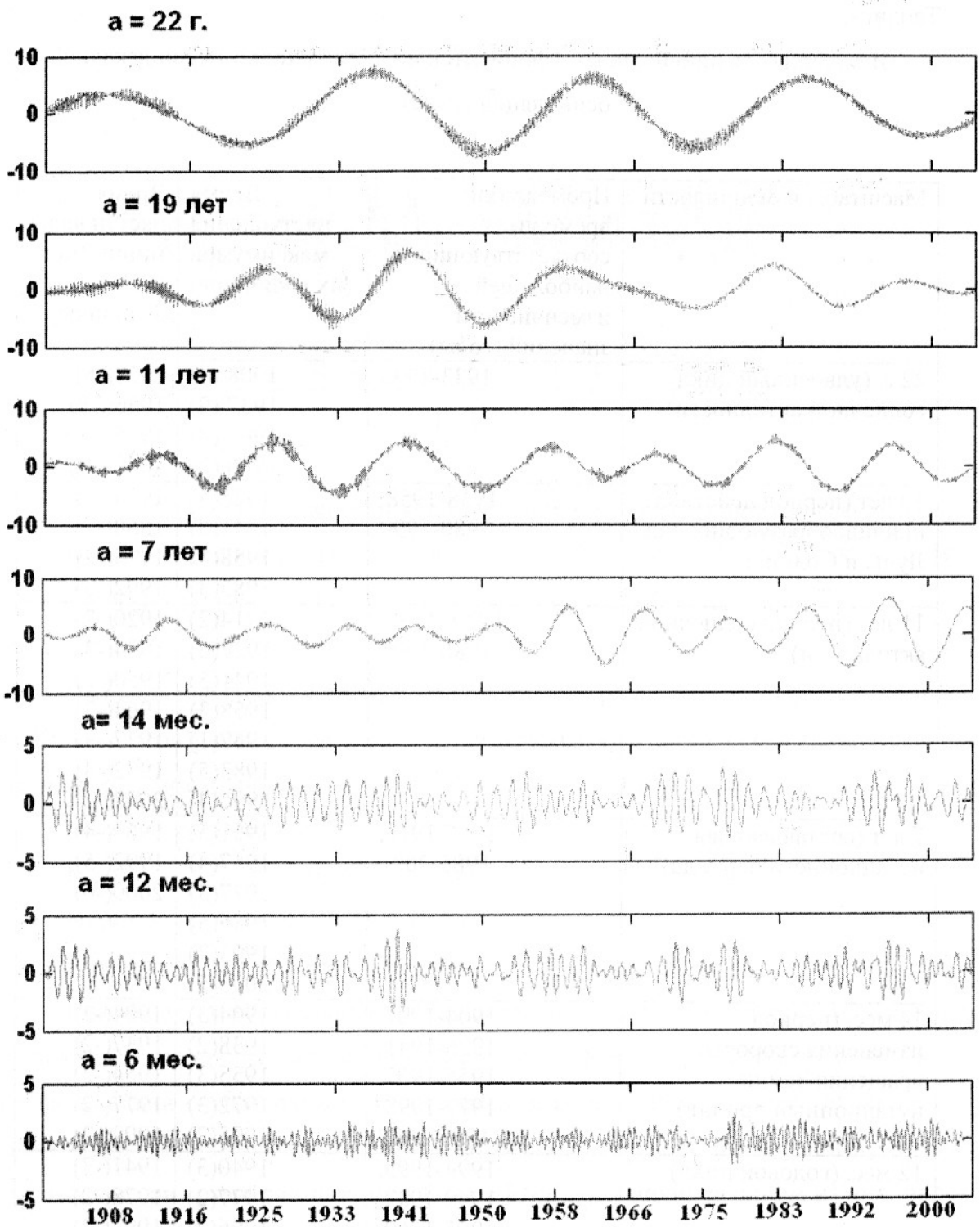


Рис. 4. Графики линейных коэффициентов PDO для различных временных масштабов ( $a$ ).

Таблица.

Изменчивость линейных коэффициентов индекса тихоокеанской декадной  
осцилляции (PDO)

Масштабы изменчивости	Промежутки времени, соответствующие наибольшей изменчивости значений (годы)	Время наступления максимумов (их величины)	Время наступления минимумов (их величины)
22 г. (удвоенный цикл солнечной активности)	1933-1995	1908 (4) 1937 (9) 1962 (8) 1986 (7)	1923(-5) 1950 (-8) 1975 (-8) 2000 (-4)
19 лет (период действия приливообразующих сил Луны и Солнца)	1938-1958, 1980-1990	1925(4) 1941(8) 1958(3) 1983(3)	1933(-6) 1858(-7) 1975(-3) 1992(-3)
11 лет (период солнечной активности)	1920=1950, 1980-1990	1914(2) 1927(6) 1941(5) 1958(3) 1967(1) 1983(5) 1996(4)	1920(-2) 1934(-3) 1950(-2) 1964(-2) 1977(-3) 1992(-4) 2002(-2)
7 лет (составляющая нутационного периода) <sup>4</sup>	1955-1970, 1985-2004	1961(5) 1967(4) 1977(3) 1986(5) 1995(7) 2003(5)	1960(-4) 1992(-5) 2000(-6)
14 мес. (период изменения скорости вращения Земли – нутационный прилив)	1904-1907, 1926-1941, 1956-1957, 1977-1998, 1995-1997	1904(3) 1938(2) 1955(3) 1972(3) 1995(2)	1904(-2) 1937(-2) 1954(-2) 1977(-2) 1992(-2)
12 мес. (годовой цикл)	1994-1995, 1940-1942, 1955-1960, 1973-1974, 1978-1979, 1995-1996	1940(3) 1977(2) 1996(2)	1941(-3) 1978(-2) 1997(-2)
6 мес. (полугодовой цикл)	1977-1978	1978(2)	1978(-2)

<sup>4</sup> Начиная с масштаба, равного 7 лет, отмечены максимумы и минимумы, величины которых не менее половины масштаба линейных коэффициентов.

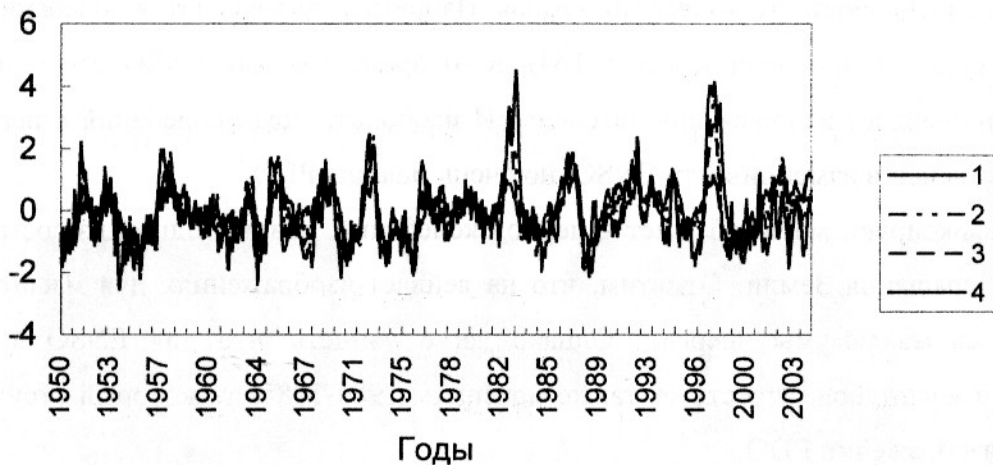


Рис. 5. Графики временного хода различных температурных индексов Эль-Ниньо для акваторий: 1 – (Nino 1+2)  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ S,  $80^{\circ}$ W- $90^{\circ}$ W; 2 – (Nino 3)  $5^{\circ}$ S- $5^{\circ}$ N,  $90^{\circ}$ W- $150^{\circ}$ W; 3 – (Nino 3, 4)  $5^{\circ}$ S- $5^{\circ}$ N,  $120^{\circ}$ W- $170^{\circ}$ W; 4 – (Nino 4)  $5^{\circ}$ S- $5^{\circ}$ N,  $160^{\circ}$ E- $15^{\circ}$ W.

На рис. 5 представлен временной ход четырех различных температурных индексов ENSO, характеризующих средние аномалии температуры поверхности тропической части Тихого океана, имеющих различную пространственную привязку:

Nino 1+2:  $0^{\circ}$  –  $10^{\circ}$ S,  $80^{\circ}$ W –  $90^{\circ}$ W,

Nino 3:  $5^{\circ}$ S –  $5^{\circ}$ N,  $90^{\circ}$ W –  $150^{\circ}$ W,

Nino 3,4:  $5^{\circ}$ S –  $5^{\circ}$ N,  $120^{\circ}$ W –  $170^{\circ}$ W,

Nino 4:  $5^{\circ}$ S –  $5^{\circ}$ N,  $160^{\circ}$ E –  $150^{\circ}$ W.

Сравнение этих графиков показывает, что при незначительных отличиях, в частности, в величинах экстремумов, некотором фазовом запаздывании, в целом эти четыре функции очень похожи. Вейвлет-анализ, проведенный для этих индексов ENSO, также выявил лишь несущественные отличия в их вейвлет-изображениях. Поэтому в дальнейшем при сравнении индексов PDO и ENSO ограничимся одним из них: индексом ENSO Nino 1+2.

Напомним, что ряды ENSO имеют меньшую продолжительность, поэтому сравнение особенностей вейвлет-изображений PDO и ENSO проводится лишь для синхронных измерений, начиная с 1950 г. На рис. 6 представлены графики и вейвлет-изображения PDO и ENSO, максимальный масштаб, определенный длиной реализации ENSO, равен 14 годам.

Анализ рис. 6 приводит к выводу, что в широком диапазоне масштабов основные энергонесущие области PDO и ENSO возникают приблизительно в одни и те же промежутки времени. Вейвлет-изображения индексов PDO и ENSO фиксируют обширные

области максимумов энергии для 1950-1965 гг. и 1980-2004 гг. Но для различных масштабов интенсивность колебаний разная. Например, наблюдаются колебания индекса PDO периода 14 лет (масштаб  $a = 164$ ), в то время как для ENSO соответствующие области на вейвлет-изображении затенены. И наоборот, вклад колебаний с периодом 14 лет существенен в изменчивости ENSO, но очень мал для PDO.

Зафиксируем масштаб 7 лет – период колебаний, равный одной из составляющих скорости вращения Земли. Отметим, что на вейвлет-изображениях для масштаба 7 лет выделяются максимумы энергии. Однако легко увидеть, что для ENSO в широком диапазоне масштабов существует также максимум 1983-1985 гг., который отсутствует на вейвлет-изображении PDO.

На графиках вейвлет-изображения можно отметить области, для которых происходит перераспределение энергии по масштабам (по частотам). Например, можно проследить перераспределение энергии изменчивости ENSO на низких частотах (масштаб 10 лет) для промежутка с 1975 по 1980 на масштабы более высокочастотных колебаний (от 10 лет до 1 года и менее).

На рис. 7 представлены графики линейные коэффициенты в разложении PDO и ENSO для масштаба изменчивости 7 лет. Отметим основные характерные особенности этих графиков. Индекс PDO характеризуется максимальной изменчивостью линейных коэффициентов для промежутков времени 1957-1966 гг., а также 1985-2004 гг. Индекс ENSO для 1952-1960, 1980-1987 и в особенности 1996-2002 гг. При этом максимумы отмечаются для 1961, 1967, 1977, 1986, 1995 и 2003 гг. Для ENSO максимумы энергии соответствуют 1958, 1983, 1990 и в особенности 1997 гг.

Проследим за временем наступления экстремумов индексов PDO и ENSO. Отметим, что, во-первых, за исследуемый промежуток дважды происходит изменение фазы, во-вторых, наблюдается фазовое запаздывание максимумов индекса PDO относительно ENSO:

1950 г. – запаздывание на 2 года,

1958 г. – запаздывание на 3 года,

1965 г. – запаздывание на 4 года,

1972 г. – запаздывание на 4 года.

В 1983 г. максимум ENSO соответствует незначительному минимуму PDO, т.е. изменчивость индексов носит противофазный характер, далее – минимум ENSO 1986 г. соответствует максимуму PDO. Но с 1990 г. фаза меняется: максимум ENSO 1990 г. соответствует минимуму PDO в 1992 г. В 1997 г. снова происходит изменение фазы: максимумы 1997 г. в двух индексах почти синхронны.

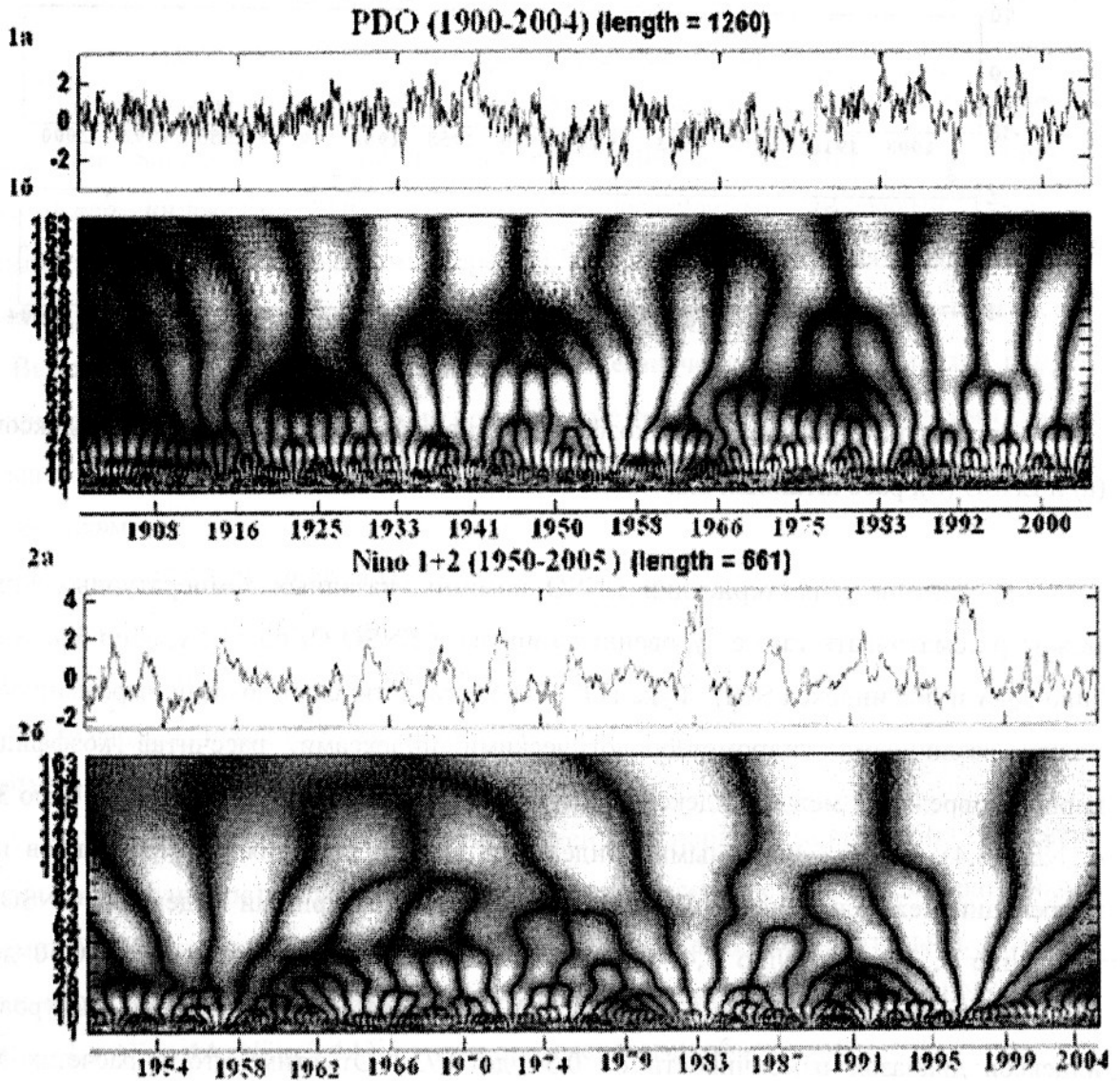


Рис. 6. Графики временного хода среднемесячных значений индекса Тихоокеанской декадной осцилляции (1а) и временного хода среднемесячных значений индекса Эль-Ниньо 1+2 (2а) и их вейвлет-изображения (1б и 2б); масштаб, равный значению 84 (разделяет на две равных части вейвлет-изображения) соответствует периоду 7 лет.

Установлено, что связь климатических аномалий с теплыми (положительные) и холодными (отрицательные) режимами PDO аналогична связи их с Эль-Ниньо и Ла-Ниньо (Latif and Barnett, 1996). В свою очередь, существует корреляция между индексами PDO и ENSO. Таким образом, вероятно, что межгодовая изменчивость PDO влияет на межгодовую изменчивость ENSO в различных частотных диапазонах. Сравнение характеристик изменчивости PDO и ENSO в вейвлет-анализе как раз демонстрирует существующие «дальние связи» этой изменчивости.

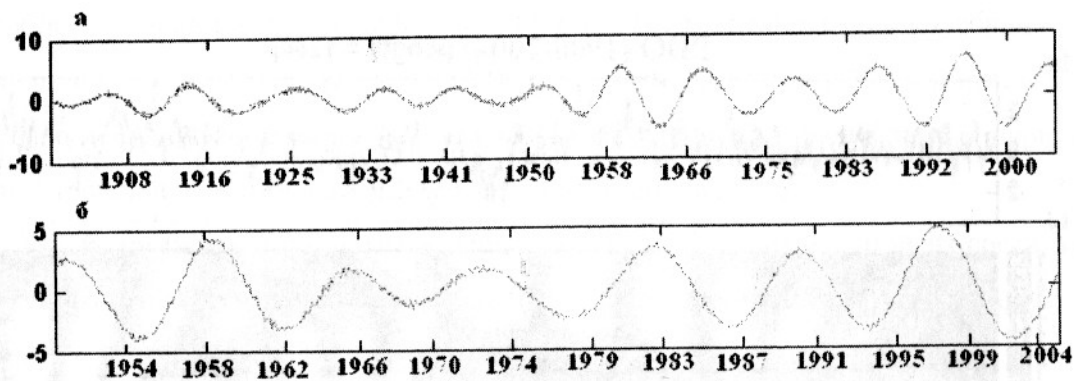


Рис. 7. Значения линейных коэффициентов вейвлет-преобразования индексов PDO (а) и ENSO (б), рассчитанных для масштабов изменчивости 7 лет.

В качестве характеристики ENSO помимо указанных температурных индексов можно рассматривать также «уровенные» индексы ENSO (Nino 1+2A, Nino 3A, Nino 4A, Nino 3,4A и два индекса SOI). Фукс В.Р. (2005) статистически доказал выраженную связь между различными гидрометеорологическими индексами, рассчитав коэффициенты парной корреляции между индексами PDO и как температурными (Nino 1+2, Nino 3, Nino 4, Nino 3,4), так и «уровенными» индексами ENSO. Значения коэффициентов парной корреляции между индексами PDO и четырьмя температурными индексами ENSO (Nino 1+2, Nino 3, Nino 4, Nino 3,4) положительны и находятся в диапазоне 0.50 до 0.60 (максимальный из них равен 0.6 между PDO и Nino 4). В то же время для уровенных индексов диапазон изменчивости от 0.34 до 0.73. (Отметим, что в расчетах Mantua приводится коэффициент  $|r| = 0.38$ ) (Mantua et al., 1997). И хотя коэффициенты корреляции не очень велики, наличие положительной корреляционной зависимости представляет прогностический интерес.

Наиболее отчетливо указанные колебания – смена различных режимов PDO определяют существование различных биологических циклов и проявляются в изменении биологической продуктивности Тихого океана, особенно – в изменении численности популяций рыб (Chavez F.P., Ryan J. et al, 2003). В частности, упомянутые ранее Steven Hare и Robert Francis на конкретных примерах показали, что изменчивость северо-восточной части морской экосистемы Тихого океана тесно связана с изменчивостью PDO: теплые периоды улучшают биологическую продуктивность прибрежной зоны Аляски и подавляют продуктивность на западном побережье США, в то время как холодные периоды способствуют продуктивности морской экосистемы в направлении север-юг.

Работы в этом направлении для Северо-западной части Тихого океана были продолжены Фуксом В.Р. (2005), который провел серию статистических расчетов для различных гидрометеорологических индексов и промысловых объектов для Северо-западной части Тихого океана. Колдунов А.В., Фукс В.Р. рассчитали значения коэффициентов парной корреляции взаимно-корреляционной функции при различных сдвигах между индексами PDO, четырьмя температурными индексами ENSO и различными промысловыми объектами: горбуша, кета, чавыча, восточная сельдь, сардина иваси, сайра, скумбрия, стрелозубый палтус, южный одноперый терпуг, тихоокеанская треска. Выяснилось, что индекс PDO имеет большие значения коэффициентов парной корреляции с промысловыми рыбами по сравнению с температурными индексами ENSO. Наибольшие значения коэффициентов зафиксированы между следующими характеристиками:

PDO и кета (0.57 на сдвиге 4 года),

PDO и чавыча (-0.62 на сдвиге 4 года),

PDO и восточная сельдь (-0.51 на сдвиге 2 года),

PDO и сардина иваси (0.57 на сдвиге 1 год),

PDO и тихоокеанская треска (0.60 на сдвиге 1 год).

В то же время значения коэффициентов парной корреляции взаимно-корреляционной функции при различных сдвигах между всеми четырьмя температурными индексами ENSO и этими же промысловыми объектами незначительны. Расчеты показали, что гораздо лучше выражена связь между «уровенными» индексами ENSO (Nino 1+2A, Nino 3A, Nino 4A, Nino 3,4A) и этими промысловыми объектами.

### **Выводы.**

1) Индексы PDO и ENSO, характеризующий температурный режим Северо-западной части Тихого океана, являются взаимодополняющими гидрометеорологическими предикторами региона.

2) Наблюдается фазовое запаздывание на 2-4 года максимумов индекса PDO относительно максимумов индекса ENSO. В промежутке времени с 1950 до 2004 гг. дважды происходит изменение фазы изменчивости: в 1986 и 1997 гг.

3) Вейвлет-анализ индексов PDO и ENSO позволяет выделить по вейвлет-изображению основные масштабы этой изменчивости для фиксированных промежутков времени. В частности, для индекса PDO для промежутка времени 1937-1943 гг. в широком диапазоне масштабов 8,5-40 лет и 2-3 года характерны максимумы энергии колебаний, для промежутка времени 1916-1927 гг. области максимумов энергии значительно уже по шкале масштабов: 20-30 лет и 6-10 лет для промежутка 1921-1927 лет, для промежутка

1946-1956 лет выделяется область максимальной энергии колебаний для масштабов 10-20 лет, для промежутка времени 1955-1966 гг. выделяются масштабы 27-40 лет (и более), для 1957-1966 и 1968-1978 гг. – масштабы 10-20 лет, для 1979-1985 гг. максимумы энергии колебаний также характерны для широкого диапазона масштабов: 8-40 и более лет, для 1990-2004 гг. максимумы энергии для небольших масштабов 1-8 лет и не выделяются для больших масштабов. Для индекса ENSO для промежутка времени 1950-1960 гг. выделяются масштабы 1-2 года и 3-9 лет, 1955-1966 гг. 5-10 лет, 1966-1976 – 1-2 года, 1975-1980 гг. – 7-11 лет, для 1980-1985 гг. и 1993-1998 гг. – максимумы энергии характерны для всего рассматриваемого диапазона масштабов: от 1 месяца до 14 лет (и более)

4) Для масштабов изменчивости 22 г., 19, 11, 7 лет, 14, 12 и 6 месяцев определены промежутки времени, соответствующие максимумам и минимумам этой изменчивости, зафиксированные в таблице 1. Величины линейных коэффициентов свидетельствуют о том, что наибольший по величине вклад дают 22-летние колебания (удвоенный цикл солнечной активности).

5) На вейвлет-изображениях индексов PDO и ENSO выделены области перераспределения энергии по масштабам (по частотам). В частности, энергия колебаний индекса PDO масштабов 20-30 лет для промежутка времени 1920-1927 гг., перераспределяется для масштабов 10-15 лет для 1930-1935 гг., то есть идет поток энергии из области больших периодов в область более низких, связанных с нелинейной генерацией турбулентности, а для промежутка 1990-1992 энергия передается от мелкомасштабных движений периода 7-9 лет в область более крупномасштабных.

6) Для большинства промысловых рыб Северо-западной части Тихого океана индекс PDO является лучшим (большая корреляция с уловами) гидрометеорологическим предиктором по сравнению с температурными индексами ENSO.

### **Литература**

- Бондаренко А.Л., Жмур В.В. О природе и возможности прогнозирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья// Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 39-52.
- Смирнов А.Н., Смирнов Н.П. Колебания климата и биота Северной Атлантики. СПб, изд. РГГМУ, 1998, 149 с.
- Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Кочанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб, изд. РГГМУ, 1998, 121 с.
- Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. Кемерово. 2003.
- Фукс В.Р. Уровень океана как показатель локальных и глобальных климатических тенденций// Труды 12 съезда РГО. 2005.
- Biondi F., Gershunov A., Cayan D. North Pacific Decadal Climate Variability since 1661 // Journal of Climate, 2001. Vol. 14. № 1. P. 5-10.
- Chavez F.P., Ryan J., Lluch-Cota S.E., Niquen M.C. From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean // Science. – 2003. – Vol. 299. – P. 217–221.



- Goodrich G.B. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on Arizona Winter Precipitation during Years of Neutral ENSO//Weather and Forecasting. 2004r. Vol. 19 N 5. (crp.950-953)
- Hare, S.R. and R.C. Francis. Climate Change and Salmon Production in the Northeast Pacific Ocean. In: R.J. Beamish [ed.] Ocean climate and northern fish populations//Can. spec. Pub. Fish. Aquat. Sci. 1995., 121, pp. 357-372
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Wallace, J. M., and Francis, R. C. (1997): A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull. Am. Meteor. Soc. 78, 1069-1079
- Mantua, N. J. (2000): The Pacific Decadal Oscillation and climate forecasting for North America.  
[http://www.atmos.washington.edu/~mantua/REPORTS/PDO/PDO\\_cs.htm](http://www.atmos.washington.edu/~mantua/REPORTS/PDO/PDO_cs.htm)
- Mantua, N. J. (2001): PDO index.  
[ftp://ftp.atmos.washington.edu/mantua/pnw\\_impacts/INDICES/PDO.latest](ftp://ftp.atmos.washington.edu/mantua/pnw_impacts/INDICES/PDO.latest)
- Trenberth, K. E. and Hurrell, J.W. (1994): Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific// Climate Dynamics 9, 303
- Latif, M. and Barnett, T. P. (1996): Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. J. Climate 9, 2407-2423
- Minobe, S. (1997): A 50 - 70 year climate oscillation over the North Pacific and North America. Geophys. Res. Lett. 24, 683-686.
- Landscheidt, T. (1983): Solar oscillations, sunspot cycles, and climatic change.// In: McCormac, B. M., ed.: Weather and climate responses to solar variations. Boulder, Associated University Press, 293-308
- Landscheidt, T. (1990): Relationship between rainfall in the northern hemisphere and impulses of the torque in the Sun's motion.// In: K. H. Schatten and A. Arking, eds.: Climate impact of solar variability. Greenbelt, NASA, 259-266
- Landscheidt, T. (1995): Global warming or Little Ice Age? In: Finkl, C. W., ed.: Holocene cycles. A Jubilee volume in celebration of the 80th birthday of Rhodes W. Fairbridge. Fort Lauderdale, The Coastal Education and Research Foundation (CERF), 371-382.
- Landscheidt, T. (1998 a): Forecast of global temperature, El Nico, and cloud coverage by astronomical means. //In: Bate, R., ed.: Global Warming. The continuing debate. Cambridge, The European Science and Environment Forum (ESEF), 172-183
- Landscheidt, T. (1998 b): Solar activity: A dominant factor in climate dynamics.// <http://www.john-daly.com/solar/solar.htm>.
- Landscheidt, T. (1999 a): Solar activity controls El Nico and La Nica.  
<http://www.john-daly.com/sun-enso/sun-enso.htm>
- Landscheidt, T. (2000 a): Solar forcing of El Nico and La Nica.// ESA Special Publication 463, 135-140
- Landscheidt, T. (2000 b): River Po discharges and cycles of solar activity.// Hydrol. Sci. J. 45, 491-493.
- Landscheidt, T. (2000 c): New confirmation of strong solar forcing of climate.// <http://www.john-daly.com/po.htm>
- Landscheidt, T. (2000 d): Sun's role in the satellite-balloon-surface issue. <http://www.john-daly.com/solar/temps.htm>
- Landscheidt, T. (2001): Solar eruptions linked to North Atlantic Oscillation.// <http://www.john-daly.com/theodor/solarnao.htm>
- Tanimoto, Y.N., Iwasaka, N., Hanawa, K., and Toba, Y. (1993): Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific.// J. Climate 6, 1153-1160
- Yeh, S.-W. and Kirtman, B.P. Pacific decadal variability and decadal ENSO amplitude modulation. // Geophysical Research Letters, VOL. 32, L05703, DOI:10.1029/2004GL021731, 2005
- Zhang, Y., Wallace, J. M., and Battisti, D. S. (1997): ENSO-like interdecadal variability: 1900-1993.// J. Climate 10, 1004-1020.