

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СКЛЕРИТОГРАММ ЧЕШУИ ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ

Р.А. Шапоров, Н.В. Варнавская*, В.Г. Степанов***

**Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (КамчатНИРО), Петропавловск-Камчатский*

***Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский*

APPLICATION OF FOURIER TRANSFORM FOR ANALYSIS OF SCALES SCLERITEGRAMM OF PACIFIC SALMONS

R.A. Shaporev, N.V. Varnavskaya*, V.G. Stepanov***

**Kamchatka Research Institute of Fisheries and Oceanography (KamchatNIRO), Petropavlovsk-Kamchatsky*

***Kamchatka Branch of the Pacific Institute of Geography (KB PIG) FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

Развитие лососевого хозяйства и рациональная организация промысла требуют решения задач, связанных с идентификацией нативных популяций в смешанных уловах. При решении подобных задач одним из первых в историческом аспекте является метод анализа строения слоистых элементов чешуи, который характеризуется неоднородностью структуры, связанной с особенностями роста рыб в изменяющихся условиях окружающей среды. В регистрирующих тканях (кости, чешуя, отолиты) периодически образуются кольца роста, подобные годовичным слоям на деревьях, а различные воздействия окружающей среды на организм рыб (температура воды, кормовая база и т. д.) сопровождаются отложением микрослоев разной оптической плотности и размера. Тот факт, что особенности строения центральной зоны чешуи лососей, формирующейся в пресноводный и первый морской периоды жизни, могут служить маркерами, дифференцирующими локальные популяции, многократно использовался исследователями в научных изысканиях. Первоначально при анализе чешуи либо просто подсчитывали число склеритов в отдельных зонах роста, либо дополнительно к этому методу использовали данные по средней ширине склеритов (Куликова, 1970, 1975; Николаева, Семенец, 1983). Некоторые исследователи проводят измерение всех межсклеритных расстояний и анализ их по отдельным группам склеритов (Грачев, 1983) или по отдельным группам склеритов с учетом экологических особенностей этих рыб (Каев, 1998). Измерялась также ширина расстояний между краями склеритов в различных комбинациях (отдельные пары, прямые и обратные триплеты, группы из пяти скле-

ритов и т. д.). Измерения производились вдоль произвольно проведенного радиуса сначала под микроскопом с помощью окуляр-микрометра, а позднее – с использованием проекционных изображений, на которых сначала вручную, а потом с помощью компьютерных программ, работающих по принципу того же окуляр-микрометра, измерялись параметры чешуи, которые, учитывая специфику их получения, часто называют линейными. При этом методе анализа одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на конечный результат, является субъективизм выполнения измерений. Учитывая, что чешуя лососей имеет не круглую, а овальную и часто неправильную форму, а также определенный угол наклона к своей оси (скошенность), произвольное проведение радиуса значительно влияет на абсолютные значения признака. При этом линия прикрепления чешуи (линия вставания), на которую ориентируются исследователи при проведении радиуса, часто имеет неровную размытую форму и не всегда расположена перпендикулярно к ее оси. Увеличение числа радиусов, которое могло бы способствовать получению более надежных результатов, прямо пропорционально увеличивает трудоемкость анализа и, соответственно, его длительность, что не всегда по силам отдельным исследователям.

Попытки автоматизировать процесс измерения параметров структуры чешуи и снизить влияние субъективного фактора предпринимались неоднократно (Major et al., 1972; Mason, 1973; Терсков и др., 1976; Ваганов, 1978). Они сводились к получению склеритограмм, построенных на основе измерения светопроницаемости чешуи – снятия фотометрических характеристик скульптуры ее верхнего слоя. Склеритограммы, имеющие вид кривых, пики на которых соответствуют областям наибольшего затемнения чешуи вдоль произвольно проведенных радиусов, также отражают параметры роста и склеритообразования. Полученные параметры анализировали с помощью различных математических методов. Результаты такого анализа были полезны при исследовании характера роста рыб, но не имели большого применения в целях дифференциации популяций и идентификации их в смешанных уловах. Дифференциация популяций этим методом основана на том, что количественные характеристики склеритограмм, отражающие различия в зонах расширенных и сближенных склеритов, являясь экологическими характеристиками роста, могут различаться у разных популяций и даже у внутривидовых группировок, находящихся в разных условиях. Недавно выполнено исследование (Robertson et al., 2004), использующее в качестве дифференцирующих критериев коэффициенты ряда Фурье, полученных по склеритограммам от шести радиусов, с их последующим анализом вероятностными нейронными сетями (Probabilistic Neural Networks).

В 2005 г. нами была разработана новая методика анализа особенностей строения слоистых структур чешуи кеты, основанная на создании упрощенной топологической структуры, эквивалентной исходному изоб-

ражению, и автоматизированного (т. е. полностью без участия человека) получения на ее основе дифференцирующих локальные популяции данного вида критериев. Предложен способ расчета новых, не применяемых ранее критериев формы первой зоны сближенных склеритов. Статистическое исследование критериев определило несколько важнейших из них, позволяющих относить исследуемые популяции к крупным региональным популяционным комплексам Западной и Восточной Камчатки.

Цель данного исследования заключалась в разработке метода применения преобразования Фурье для анализа межсклеритной изменчивости снятых с компьютерных имиджей склеритограмм и выявление популяционной вариабельности полученных параметров.

Материалом послужили выборки мигрирующих на нерест рыб из локальных популяций кеты западного и восточного побережий Камчатки, отловленные в 1997, 2002–2004 гг. Акриловые оттиски чешуи были любезно предоставлены сотрудниками лаборатории динамики численности ФГУП КамчатНИРО.

1. Спектральный анализ склеритограмм

Пусть $x(j)$, $j=0, K, n-1$ – целочисленный массив значений склеритограммы, полученный в направлении луча максимального радиуса. Пример такой склеритограммы от чешуи кеты представлен на рисунке 1.

Тогда коэффициенты ряда Фурье:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i) \cos \frac{2\pi ki}{n}, \quad k=1, \dots, \frac{n}{2}-1$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i) \sin \frac{2\pi ki}{n}, \quad k=0, \dots, \frac{n}{2}$$

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i), \quad a_{n/2} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i)(-1)^i.$$

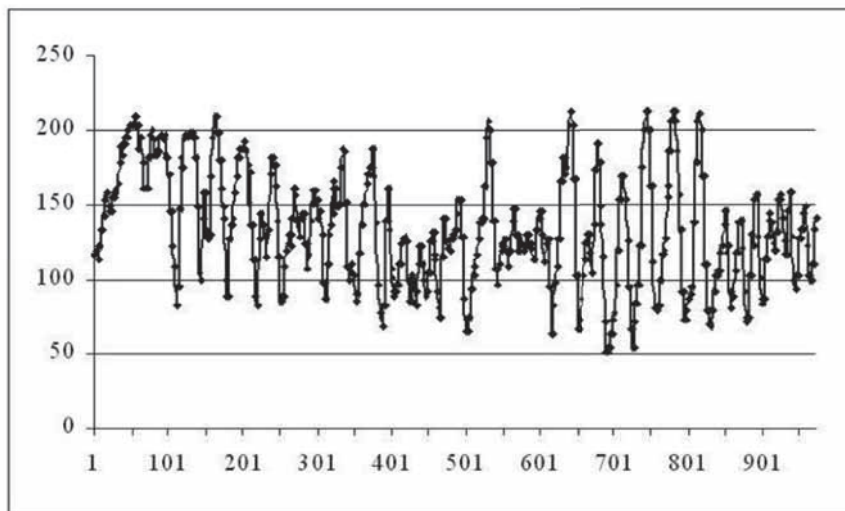


Рис. 1. Склеритограмма чешуи кеты, снятой в направлении луча максимального радиуса

Для последующего анализа используются значения периодограммы, которые рассчитываются как:

$$c_k = \sqrt{a_k + b_k}, \quad k = 0, \dots, \frac{n}{2}.$$

Значения спектральной плотности получены преобразованием исходных значений периодограммы сглаживающим окном с весами:

где $w_{\pm j} = 0.5 - 0.5 \cos(\pi j / p)$, $j = 0, \dots, p$, где p – ширина окна. Ширина окна в данной работе принята равной $p=9$.

Предварительно, для уменьшения «рассеяния» периодограммы, из ряда значений склеритограммы удалялись значения линейного тренда и производилось косинус-сглаживание, по которому входной ряд точек умножается на коэффициенты:

$$w_i = 0.5 - 0.5 \cos(\pi(i - 0.5)/m), \quad i = 0, \dots, m-1$$

$$w_i = 0.5 - 0.5 \cos(\pi(n - i - 0.5)/m), \quad i = n-m, \dots, n-1$$

в данной работе $m = n/2$.

Пример периодограммы и полученной по ней графика спектральной плотности представлен на рисунке 2.

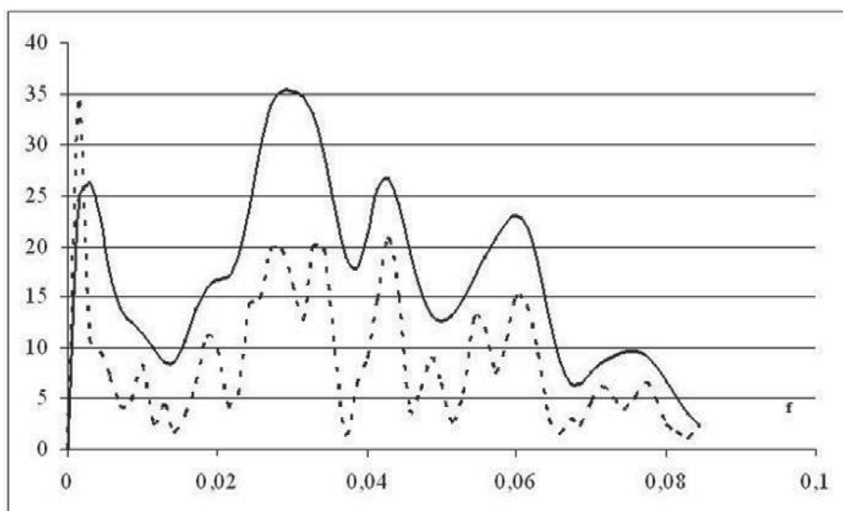


Рис. 2. Периодограмма и вычисленная по ней спектральная плотность; пунктирная линия – периодограмма; сплошная линия – спектральная плотность

Поскольку проведение луча максимального радиуса определяется вычислительными аспектами и полученная по нему склеритограмма может не нести в себе периодических закономерностей из-за наличия на чешуе различных дефектов, полученные значения периодограммы проверялись на соответствие экспоненциальному распределению тестом Колмогорова–Смирнова, с уровнем значимости $p=0.05$. В случае принятия гипотезы соответствия производится поиск ближайшей к лучу максимального радиуса склеритограммы, где условие экспоненциальности распределения периодограммы не выполняется.

2. Анализ изменчивости межсклеритных расстояний

Анализируя дендрограммы сходства российских популяций кеты, построенные отдельно для каждого из исследуемых годов возврата, можно отметить, что для всех трех лет (1997, 2003 и 2004 гг.) наблюдается устойчивая во времени тенденция к отделению группы популяций Восточной Камчатки от Западной. Однако дендрограмма сходства, определенная суммарно для всех трех лет, позволяет сделать вывод о гораздо более высокой степени межгодовой изменчивости по сравнению с межпопуляционной, поскольку в данном случае не наблюдается факта отделения Западной Камчатки от Восточной. Такое положение несомненно объясняется сильной зависимостью характера распределения межсклеритных расстояний от экологической обстановки отдельно взятого года. В пользу этого говорит и образование отдельного кластера, состоящего преимущественно из популяций 2003 г. возврата. Вероятно, доминирующие возрастные группы этого года подвергались действию одного или нескольких природных факторов. Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, необходимо выполнить аналогичный анализ с учетом возрастной структуры возвращающихся популяций, что предполагается сделать в ходе дальнейших работ.

Таким образом, на основании полученных данных о характере изменения межсклеритных расстояний у кеты, можно с достаточной долей уверенности говорить о разделении ее восточных и западных камчатских группировок. Возможно, некоторое изменение применяемой методики, а именно – использование дополнительных лучей, а не только луча максимального радиуса по которому производилось снятие склеритограмм, а также учет возрастной структуры популяций, позволит более детально исследовать изменчивость межсклеритных расстояний.

ЛИТЕРАТУРА

- Ваганов Е.А.** 1978. Склеритограммы как метод анализа сезонного роста рыб. Новосибирск: Наука. 138 с.
- Грачев Л.Е.** 1983. Дифференциация азиатских стад горбуши // Биол. основы развития лососевого хоз-ва в водоемах СССР. М.: Наука. С. 84–97.
- Каев А.М.** 1998. Идентификация происхождения и история жизни охотморской кеты *Oncorhynchus keta* по чешуе // Вопр. ихтиологии. Т. 38. № 5. С. 650–658.
- Куликова Н.И.** 1970. Структура чешуи и характер роста кеты различных стад // Изв. ТИНРО. Т. 74. С. 81–93.
- Куликова Н.И.** 1975. Определение локальных стад кеты в море по структуре чешуи и некоторым морфологическим признакам // Тр. ВНИРО. Т. 106. С. 49–51.
- Николаева Е.Т., Семенец Н.И.** 1983. К методике дифференциации стад кеты, *Oncorhynchus keta* (Walbaum) (Salmonidae) по структуре чешуи первого года роста // Вопр. ихтиологии. Т. 23. Вып. 5. С. 735–745.

Терсков И.А., Ваганов Е.А., Спиров В.В. 1976. Микрофотометрический анализ чешуи некоторых пресноводных рыб // Изв. Сиб. отд. АН СССР. № 10. Сер. биол. наук. Вып. 2. С. 95–102.

Major R.L., Mosher K.H., Mason J.E. 1972. Identification of stocks of Pacific salmon by means of scale features // In: Simon, R.C. and P.A. Larkin [eds.] “The stock concept in Pacific salmon”. MacMillan H.R. Lectures in Fisheries, Inst. Fish., Univ. British Columbia, Vancouver, B.C., Canada. P. 209–231.

Mason J.E. 1973. A semi-automatic machine for counting and measuring circuli on fish scales // Ageing of Fish, Proc. Sympos. Reading. P. 87–102.

Robertson S.G., Hagen P.T., Wilcock J.A., Bloomquist R. 2004. Evaluating the efficacy of Probabilistic Neural Networks to determine stock structure in sockeye salmon using Fourier transformed luminance profiles of scale Circuli // NPAFC Tech. Rep. № 5. P. 125–128.