ИХТИОЛОГИЯ. ЭКОЛОГИЯ

УДК 534.222:681.883

Е.Н. Бакланов[1], Е.П. Стародубцев[2], П.А. Стародубцев[2]
[1]Дальневосточный государственный технических рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б
[2]Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия имени адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал, г. Владивосток), 690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЯСНЕНИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА В БИОТИКЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Рассматриваются варианты проявления детерминированного хаоса в поведении скоплений рыб. Показывается, что эти явления гипотетически можно рассматривать как нерегулярное или хаотическое движение, порожденное нелинейной системой, для которой динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния всей системы в целом или отдельного его элемента при известной предыстории. Выдвигаемые гипотезы, имея теоретический характер, обладают прикладным значением для вопросов промышленного рыболовства. Включены выводы соответствующих результатов численных и морских наблюдений за поведением рыбных косяков как авторов статьи, так и других исследователей.

Ключевые слова: *детерминированный хаос, нелинейная система, рыбный косяк, морская биотика, турбулентное движение, фазовое пространство, критерий хаотичности, оптимальное энергетическое поведение, экспоненциальная неустойчивость движения, коллективное поведение.*

E.N. Baklanov, E.P. Starodubtcev, P.A. Starodubtcev

POSSIBLE EXPLANATIONS OF DETERMINED CHAOS IN A BIOTIC OF THE SEA ENVIRONMENT

Questions concerning the explanations of the manifestation of deterministic chaos process in fish environment take up. It is asserted that the deterministic chaos hypothetically maybe esteemed as the irregular or chaotic movement induces by nonlinear system for which dynamic laws unequivocally define evolution of a whole system state in process of time in general or of one of its part considering its background. Given hypothesizes are mostly theoretical, but they have very important practical value in the industrial fishing sphere. The numerical values of observations of moving stocks in the sea were included into this article. These numerical results were made not only by the authors of this article, but also by the other scientists.

Key words: *deterministic chaos, nonlinear system, stock, biotic, steady state of the marine biotic, eddy, chaos criterion, optimal energy behavior, exponential instability of moving, collective behavior.*

Введение

При изучении характера поведения рыбных скоплений выявлена способность косяка сохранять компактное состояние, что защищает его от действий хищников. При атаке извне косяк или кидается врассыпную, проявляя элементы хаоса, но спустя некоторое время вновь собирается по логике детерминированности, или отвечает на нападение специальными слаженными действиями, сводящими на нет эффективность попытки нападающего. Для правильного понимания рассуждений о проявлениях детерминированного хаоса в биотике морской среды, представленных в статье, введем новое определение состояния рыбного косяка (РК) при его перемещении из одной точки кормления в другую, ранее не применяемое в промышленном рыболовстве, «установившееся состояние морской биотики» (УСМБ). Для других биосистем, наблюдаемых в природе, данное состояние рассмотрено учеными достаточно подробно.

Для примера, в качестве УСМБ будет рассматриваться одно из многочисленных состояний РК, когда все его элементы (отдельные особи или рыбы) двигаются в одном направлении и с одинаковой скоростью. Количество элементов в УСМБ при этом может насчитываться от нескольких штук до нескольких миллионов. Такое УСМБ и его движение определено принципом «оптимального энергетического поведения» отдельной особи или рыбы.

Так как начальное состояние РК при УСМБ как некой физической системы не может быть задано абсолютно точно, то вышеизложенное можно рассматривать как некоторую область ее начальных условий. При этом неустойчивость или чувствительность по отношению к начальным условиям такой УСМБ, когда малое их изменение во времени приводит к большим изменениям динамики всей системы в целом, можно считать причиной появления в ней детерминированного хаоса [1, 8].

Результаты и их обсуждение

Наблюдая за поведением РК в открытом море и процессом потери им УСМБ при появлении хищника, можно увидеть, что каждое следующее его состояние однозначно детерминируется предыдущим состоянием и соответствующим законом динамики, который может выражаться дифференциальным или разностным уравнением.

По гипотетическому мнению авторов, переход РК из УСМБ в такое динамическое состояние при определенных условиях имеет сложный, шумоподобный характер с непрерывным Фурье-спектром.

Так, согласно предположениям, которые были сделаны Б.В. Чириковым, такого рода хаотическое поведение системы, сообразуясь с принципом «оптимального энергетического поведения» (это от авторов статьи), возникает не вследствие случайного внешнего шумового воздействия (или внутренней неопределенности), не из-за большого числа степеней свободы (требующего вероятностного описания), а при выполнении всего двух условий [7].

Первое из них – это экспоненциальная неустойчивость движения (эволюции) УСМБ, когда малое отклонение от исходной траектории всего одной особи приводит к хаосу и экспоненциально растет со временем. Или другими словами, две траектории отдельных особей, выходящие из двух близко расположенных в начальный момент точек в УСМБ, с течением времени экспоненциально разбегаются, становясь все более непохожими друг на друга.

Второе условие состоит в том, что множество положений отдельных особей РК при УСМБ должно быть сосредоточено в ограниченной области. Поэтому траектория движения РК при УСМБ и его отдельных особей не должна выходить за границы этой области и обязана иметь квазиосцилляторный характер.

Морские наблюдения подтверждают эти факты с единственным дополнением: РК при УСМБ в общем возвращается в исходное состояние после окончания внешнего воздействия на него. При этом отдельные его элементы (особи) осуществляют турбулентное движение в другие точки исходного пространства по траекториям, противоположным экспоненциальной неустойчивости движения их первоначального состояния.

Опираясь на сочетание этих двух условий, гипотетически возможно порождение апериодической сложной траектории, неотличимой по своим статистическим характеристикам (например, по автокорреляционной функции) от реализации случайного шумоподобного процесса (аналогия с реальным физическим явлением). С данными выводами очень сложно не согласиться.

Точки таких траекторий, перемешиваясь, плотно заполняют некоторую область в фазовом пространстве. Выявлено, что подобным поведением могут обладать только нелинейные системы, к которым можно отнести гипотетически и переход УСМБ в новое состояние при появлении хищника.

Продолжая рассуждения, можно отметить, что в основе нерегулярного, хаотического поведения всего УСМБ в целом лежит детерминированное описание. Оно, однако, вовсе не означает практическую возможность долговременного прогноза эволюции процесса потери УСМБ РК и перехода в другие состояния [1, 6, 8].

Во многих случаях в природе система, обнаруживающая на практике хаотическое, непредсказуемое поведение, допускает (например, поведение колонии муравьев) тем не менее вполне детерминированное математическое описание. Было трудно поверить в то, что «случайный» процесс может быть решением одного или нескольких, часто с виду простых, дифференциальных уравнений.

Одним из самых неожиданных результатов анализа поведения таких систем является вывод о практической непредсказуемости долговременного поведения детерминированных хаотических систем и необходимости использования статистического описания.

Но как показали исследования на конкретных биосистемах, данный вывод может быть и уточнен. Итальянские ученые совместно с американскими коллегами создали робота для изучения поведения РК. В ходе экспериментов робот не только успешно внедрился в РК, но и стал его лидером. Робот визуально напоминал рыбу лишь отдаленно, сходство достигалось наличием хвоста с характерным плавником. Над проектом работали ученые Национального исследовательского совета Италии совместно с исследователями из Университета Нью-Йорка. Робот-рыба был помещен в искусственный водоем, в котором обитало несколько РК. Через некоторое время роботизированная рыба была принята в один из РК. Еще через некоторое время рыбы этого РК стали следовать за роботизированным собратом. Таким образом, роботу удалось стать настоящим лидером РК. Исходя из этого, ученые сделали вывод, что рыбы принимают в свой РК новых членов, не основываясь на их внешнем виде [6].

Переходя от данного примера к теории, необходимо отметить, что проявление статистических закономерностей у динамических систем связано с большим числом степеней свободы последних и возможности усреднения по ним. В физике такие системы принято называть макроскопическими, где регулярное, предсказуемое поведение является скорее исключением, чем правилом. В результате такого усреднения равновесное поведение определяется лишь небольшим числом параметров – интегралов движения отдельных особей. Аналогом вышеприведенных гипотетических рассуждений может служить распределение Гибса в классической статистике [1]:

$$\rho(p,q) = A\exp\left(-\frac{E(p,q)}{T}\right), \tag{1}$$

где $E(p, q)$ – энергия системы как функция ее импульсов и координат; T – температура.

Опираясь на выводы, полученные авторами из натурных наблюдений РК, можно гипотетически воспользоваться еще одним из классических примеров для объяснения поведения отдельной особи при любом внешнем (например, в виде хищника) или внутреннем на нее воздействии. Таким объяснением может являться система Хенона-Хейлеса, открытая в 1964 г. (рис. 1). Представим некоторую аналогию: пусть отдельная особь РК представляет собой частицу массы $m = 1$, которая движется в двухмерном потенциале [1, 6]:

$$U(x,y) = \frac{x^2+y^2}{2} + x^2 y - \frac{1}{3}y^3 . \tag{2}$$

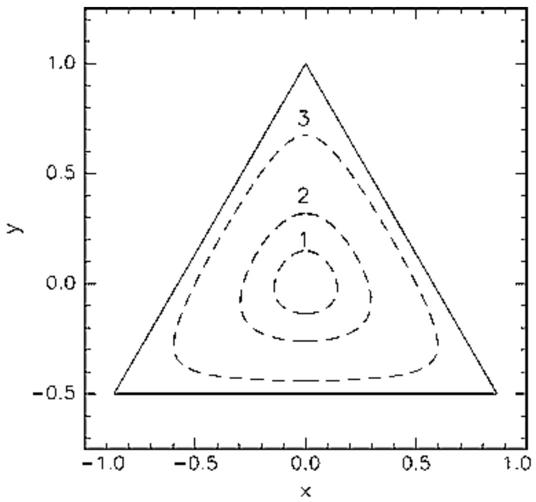

Рис. 1. Область финитного движения для модели Хенона-Хейлеса (пунктирные линии представляют собой эквипотенциальные кривые U = const. 1 – U = 0,01; 2 – U = 0,04; 3 – U = 0,125)
Fig. 1. Area of finite motion for Henon-Heiles model (the dotted lines represent equipotential curves U = const. 1 – U = 0,01; 2 – U = 0,04; 3 – U = 0,125)

По сути, это два одинаковых гармонических осциллятора с нелинейным взаимодействием между ними. Если полная энергия этой системы $0 < E < 1/6$, то ее движение финитно и происходит внутри треугольной области (потенциальной яме) на плоскости «$x - y$», как показано на рис. 2 [6].

При энергиях E, близких к нулю, система совершает обычные гармонические колебания, однако если величина E не очень мала, то большая часть траекторий этой системы (с двумя степенями свободы) блуждает по изоэнергетической гиперповерхности в 4-мерном фазовом пространстве (x, y, p_x, p_y) крайне нерегулярным образом (рис. 2). Так, если взять только те моменты времени, когда траектория пересекает плоскость $x = 0$, то значения координаты y и импульса p_y изображены в эти моменты точками (рис. 2) и образуют сечение Пуанкаре [1, 6].

Анализ данных (рис. 2) может вполне быть аналогом доказательства существования детерминированного хаоса, когда поведение лидера является хаотическим, а поведение других особей РК, которые ориентируются на него, детерминированным.

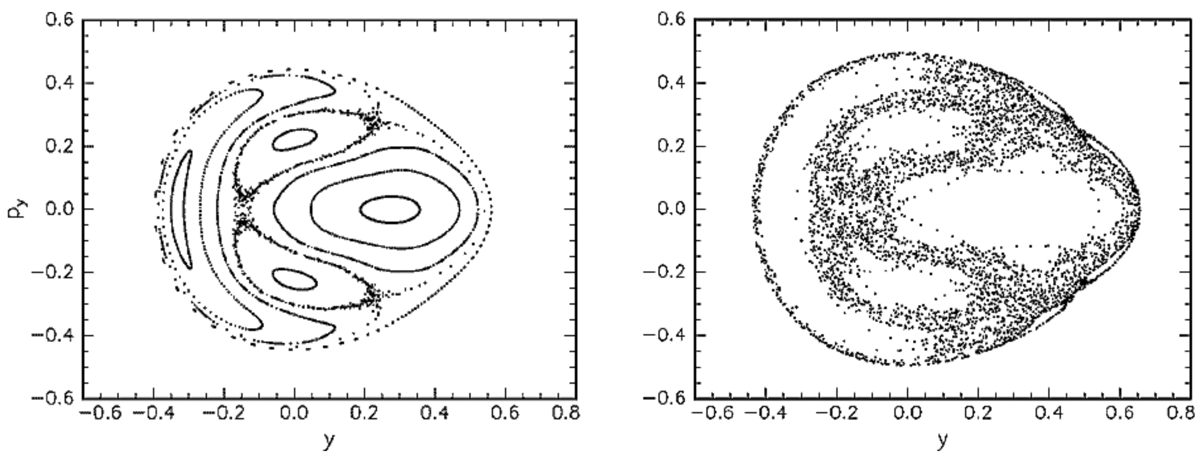

Рис. 2. Сечение Пуанкаре (y,p_y) модели Хенона-Хейлеса при энергии частицы E = 1/10 (слева) и E = 1/8 (справа)
Fig. 2. Poincaré section (y,p_y) of Henon-Heiles model at the energy of the particle E = 1/10 (left) and E = 1/8 (right)

Дополнительно необходимо отметить, что и в поведении лидера при знании гидрологических условий района, где наблюдается РК, отчасти будут проявляться элементы детерминированности [1, 7].

С точки зрения гипотетических рассуждений и аналогии, частным случаем вышеизложенного или внутреннего (изменение стратификации морской среды или остановка для кормления) воздействия на РК с потерей УСМБ может являться движение «пробной» точки в гравитационном поле двух неподвижных точек (представим, что это отдельная особь РК). Даже если движение происходит в одной плоскости, траектория «пробной» точки (рис. 3) выглядит чрезвычайно сложной и запутанной. Она то обвивается вокруг одной из точек, то неожиданно перескакивает к другой. Первоначально близкие траектории очень быстро расходятся.

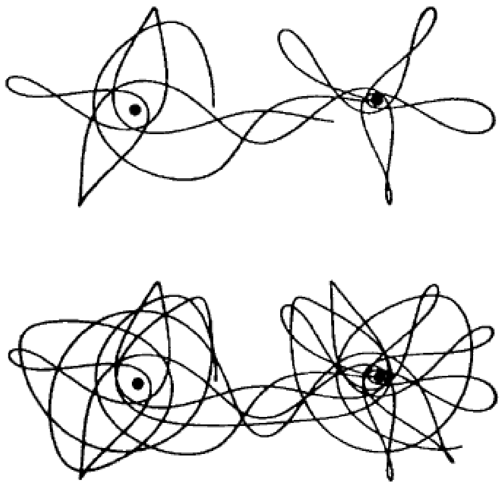

Рис. 3. Движение «пробной» точки вблизи двух одинаковых неподвижных точек. Вверху показана начальная часть траектории, а внизу – ее продолжение
Fig. 3. Movement of "test" point near two identical fixed points. Above shows the initial part of the trajectory, and at the bottom – its continuation

Математики из Университета Уппсалы (Швеция) вместе с биологами из Сиднейского университета (Австралия) сумели узнать, какими правилами руководствуются рыбы в РК. Исследователи построили математическую модель на основании наблюдений за четырьмя рыбами гамбузиями в аквариуме. На записи, которую сделали ученые (рис. 4), одну из рыб приняли за некую константу, на рисунке ей присвоен номер 1. Другие рыбы двигались по траекториям, обозначенным цифрами 2, 3 и 4 [1, 6, 7].

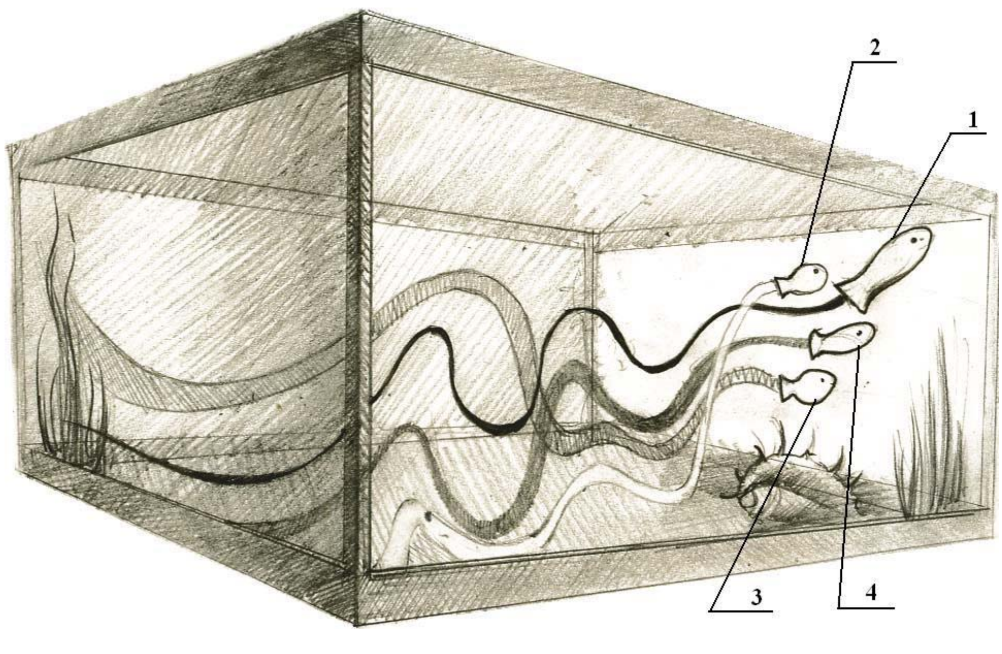

Рис. 4. Результаты наблюдений за четырьмя гамбузиями в аквариуме
Fig. 4. Observations of four mosquito fish in the aquarium

В статье, опубликованной в ведущем американском журнале для публикации оригинальных научных исследований в различных естественных областях *PNAS* (*Proceedings of the National Academy of Sciences*), авторы делают следующее заключение: при всей сложности движений РК отдельные особи в нем руководствуются несколькими простыми правилами. Во-первых, каждая рыба старается держаться на какой-то минимальной дистанции от той, что плывет впереди. Во-вторых, каждый слушается движений ближайшего соседа, поворачивая туда же, куда и он.

Это прямое доказательство существования детерминированного хаоса, когда поведение лидера является хаотическим, а поведение других особей РК, которые ориентируются на него, детерминированным. Поведение лидера из-за замкнутости аквариума отчасти обладает элементами детерминированности.

Решая задачу движения «пробной» точки вблизи двух одинаковых неподвижных точек, Лоренц случайно наткнулся на то, что даже сравнительно простая система из трех связанных нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка может иметь решением совершенно хаотические траектории. Эта система уравнений, ставшая теперь классической, имеет вид [1, 6]:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= -\sigma X + \sigma Y, \\ \dot{Y} &= rX - Y - XZ, \\ \dot{Z} &= XY - b, \end{aligned} \tag{3}$$

где «точка» обозначает дифференцирование по времени t. Переменная X пропорциональна скорости конвективного потока, Y – описывает разность температур для потоков вверх и вниз, а Z – характеризует отклонение профиля температуры от линейного в продольном направлении, вдоль приложенного градиента температуры.

Величина последнего характеризуется управляющим параметром r, а σ и b – некоторые безразмерные константы, характеризующие систему. Решение этих уравнений (функции $X(t)$, $Y(t)$ и $Z(t)$) определяет в параметрическом виде траекторию системы в трехмерном «фазовом» пространстве X, Y, Z. Ввиду однозначности функций, стоящих в правых частях этих уравнений, траектория себя никогда не пересекает.

Лоренц исследовал вид этих траекторий при разных начальных условиях и значениях параметров $r = 28$, $\sigma = 10$ и $b = 8/3$. Он обнаружил, что при этом траектория хаотическим образом блуждает из полупространства $x > 0$ в полупространство $x < 0$, формируя две почти плоские, перепутанные сложным образом спирали (рис. 5).

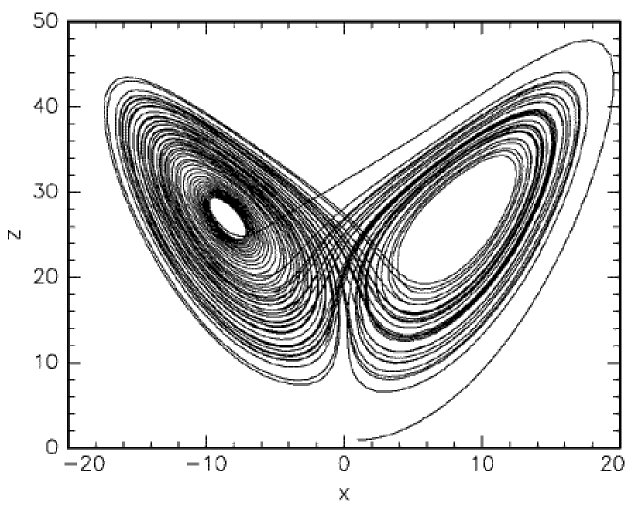

Рис. 5. Траектория, отвечающая хаотическому решению уравнений Лоренца, с параметрами, приведенными в тексте, и начальными условиями X(0) = Y(0) = Z(0) = 1
Fig. 5. Trajectory corresponding to a chaotic solution of Lorenz equations, with the parameters given in the text, and the initial conditions X(0) = Y(0) = Z(0) = 1

На рис. 5 показана проекция этих спиралей на плоскость XZ для некоторого начального условия. Траектория сначала делает 1 оборот справа, затем 20 слева, затем опять 1 справа, затем 4 слева и т.д. Похожее поведение было найдено и при других значениях параметров. Хаотичность решения означает, что если мы заранее выберем каким угодно способом цепочку переходов системы (для нас УСМБ) из одного полупространства в другое, то у системы Лоренца найдется решение, которое в точности эту цепочку воспроизведет.

Причина непредсказуемости поведения УСМБ заключается не в правильности математической теоремы о существовании и единственности решения при заданных начальных условиях, а в необычайной чувствительности решения к этим начальным условиям. Близкие начальные условия поведения отдельных особей со временем приводят к совершенно различным конечным состояниям системы. Причем часто различие нарастает со временем экспоненциально, т.е. чрезвычайно быстро (рис. 6).

$$D(t) = D(0)e^{ht}, \tag{4}$$

где инкремент неустойчивости h является функцией точки в фазовом пространстве. Причина очевидна – она заключается в неустойчивости начального состояния УСМБ, с которого оно стартует. Малое изменение от первоначального состояния даже отдельной рыбы сильно меняет его последующее движение и, как следствие, конечное состояние.

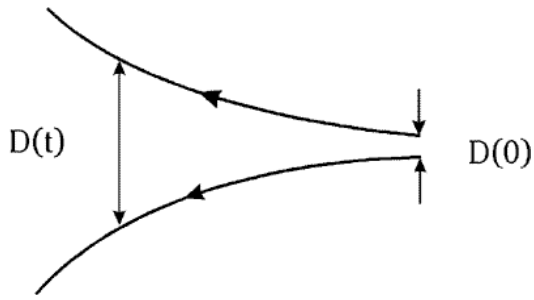

Рис. 6. Две первоначально близкие траектории в фазовом пространстве расходятся со временем в результате локальной неустойчивости
Fig. 6. Two initially close trajectories in phase space diverge over time as a result of local instability

Иными словами, сколь угодно малые возмущения начальных условий приводят с течением времени к сильному отклонению траектории от своего невозмущенного положения. Если фазовое пространство системы является конечным, то фазовые траектории не могут разойтись из-за неустойчивости более чем на характерный размер области движения, и начинается их запутывание. Предсказать поведение отдельных особей РК тогда оказывается практически невозможным.

Заключение

Из вышеизложенного можно сделать выводы, что детерминированный хаос в биотике морской среды есть сущность предсказуемого порядка, когда рыба-лидер является генератором хаотического поведения, а остальные особи – причиной его детерминированности. Системы, в которых наблюдается детерминированный хаос, описываются дифференциальными уравнениями.

В данной работе авторы не претендуют на то, что они дали полный обзор научно обоснованных гипотетических представлений о нелинейных эффектах и детерминированном хаосе в РК для УСМБ. Это было отчасти предметом исследований, представленных в [1, 8], где один из авторов являлся научным руководителем.

Цель была сугубо аналого-гипотетическая: показать, что невозможно игнорировать детерминированный хаос при разработке поведенческих концепций отдельных особей в РК, и продемонстрировать привлекательность нелинейной динамики для анализа и синтеза новых стратегий в поведении биотики морской среды [7]. Теория поведения (РК) авторами рассматривается гипотетически впервые, что требует дополнительных достаточно серьезных теоретических и натурных исследований.

Список литературы

1. Пичугин К.А. Современная интерпретация физических основ формирования рыбных скоплений как объекта дальнего гидроакустического обнаружения: дис. … канд. техн. наук. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008. – 152 с.

2. Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. Возмущения водной среды, созданные движением стаи рыб // Сб. материалов регион. науч.-техн. конф., посвященной 115-летию морского образования на Дальнем Востоке. – Владивосток, 2005. – С. 129–135.

3. Стародубцев П.А. Детерминированный хаос в рыбных скоплениях и причины его возникновения // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2008. – № 20. – С. 130–141.

4. Стародубцев П.А., Пичугин К.А., Стародубцев Е.П. Фрактальные модели как форма перемещения рыбного косяка в статическом объеме водного пространства // Сб. науч. тр. кафедры «Промышленное рыболовство». – Владивосток, 2008. – С. 128–134.

5. Стародубцев П.А., Карасев В.В., Пичугин К.А. Некоторые современные технологии дальнего обнаружения рыбных косяков и их теоретические объяснения // Изв. ТИНРО. – 2008. – Т. 152. – С. 267–278.

6. Стародубцев П.А., Карасев В.В., Пичугин К.А., Алифанов Р.Н. Современные технологии обнаружения рыбных косяков и их теоретические объяснения. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2010. – 130 с.

7. Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Димидов В.Е. Некоторые концептуальные положения процесса мониторинга океанской среды. – Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. – 224 с.

8. Шевченко Е.В. Дальнее обнаружение сформированных рыбных косяков маломощными низкочастотными просветными сигналами: дис. … канд. техн. наук. – Владивосток, 2007. – 134 с.

9. Стародубцев П.А. Фрактальная форма представления рыбного косяка при его перемещении в статическом объеме водного пространства // Проблемы открытого образования: сб. мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: ДВГТУ, 2008. – С. 44–50.

Сведения об авторах: Бакланов Евгений Николаевич, доцент,
e-mail: baklanoven@mail.ru;
Стародубцев Евгений Павлович, email: spa1958@mail.ru;
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор,
e-mail: spa1958@mail.ru.