УДК 534.222:681.883

Бакланов Евгений Николаевич
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
Россия, Владивосток
Доцент кафедры «Судовождение»,
E-Mail: baklanoven@mail.ru

Стародубцев Павел Анатольевич
Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал Владивосток)
Россия, Владивосток
Заведующий кафедрой Физики (и общетехнических дисциплин)
Доктор технических наук, профессор
E-Mail: spa1958@mail.ru

Стародубцев Евгений Павлович
Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал Владивосток)
Россия, Владивосток
Преподаватель кафедры Физики (и общетехнических дисциплин)
E-Mail: spa1958@mail.ru

Некоторые элементы проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды и их возможные гипотетические объяснения

Аннотация: В данной научной статье изучаются вопросы гипотетических объяснений процесса проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды. Показывается, что детерминированный хаос в рыбных косяках, как элементах морской биотики, 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. Для правильного понимания приводимых в статье гипотетических рассуждений о процессе проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды было введено новое, ранее не применяемое в промышленном рыболовстве определение «установившееся состояние морской биотики» (сокращенно УСМБ), показывающее состояние рыбного косяка при его перемещении из одной точки кормления в другую. Для других биосистем, наблюдаемых в природе, данное состояние рассмотрено учеными достаточно подробно.

За основу предложенных в статье гипотетических объяснений проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды преимущественно были взяты аналогии, когда свойство, характерное некоторому классу природных объектов или физических явлений, присуще и другому классу. При этом, выдвигаемые гипотезы, имея теоретический характер, обладают достаточно серьезным прикладным значением для вопросов промышленного рыболовства. В статью также 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; биотика; установившееся состояние морской биотики; турбулентное движение; фазовое пространство; критерий хаотичности; оптимальное энергетическое поведение; экспоненциальная неустойчивость движения; коллективное поведение.

Идентификационный номер статьи в журнале 113TVN613

Baklanov Evgeny
Far Eastern State Technical Fisheries University
Russia, Vladivostok
E-Mail: baklanoven@mail.ru

Starodubtsev Pavel
Military educational centre of science of Navy fleet « the Naval academy of a name of Admiral of Fleet of Soviet Union of N.G.Kuznetsova » (branch Vladivostok)
Russia, Vladivostok
E-Mail: spa1958@mail.ru

Starodubtsev Eugeny
Military educational centre of science of Navy fleet « the Naval academy of a name of Admiral of Fleet of Soviet Union of N.G.Kuznetsova » (branch Vladivostok)
Russia, Vladivostok
E-Mail: spa1958@mail.ru

Some elements of display of the determined chaos in a biotic of the sea environment and their possible hypothetical explanations

Abstract: In this scientific article questions concerning the hypothetical explanations of the manifestation of deterministic chaos process in biotics of the marine environment take up. It is asserted that the deterministic chaos in stocks as parts of marine biotics 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. For proper understanding of hypothetical reasoning of the manifestation of deterministic chaos process in biotics of the marine environment given in this article the new definition was represented: steady state of the marine biotics. This is a state of stock moving from one place where fish was feeding to another place of feeding. This definition was not used before in the industrial fishing sphere. Similar state of others observed biosystems was described by scientists in details.

Basically analogies were used in the hypothetical explanations of the manifestation of deterministic chaos process in biotics of the marine environment: some quality peculiar to some class of natural objects or physical phenomenon also belongs to another class of objects. 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.

Keywords: Deterministic chaos; nonlinear system; stock; biotics; steady state of the marine biotics; eddy; phase space; chaos criterion; optimal energy behavior; exponential instability of moving; collective behavior.

Identification number of article 113TVN613

Введение

В основе предложенных в статье гипотетических объяснений проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды преимущественно используются аналогии, когда свойство, характерное некоторому классу природных объектов или физических явлений, присуще и другому классу, поскольку те имеют ряд одинаковых свойств с первыми. При этом, выдвигаемые авторами гипотезы, имея теоретический характер, обладают прикладным значением для вопросов промышленного рыболовства и опираются преимущественно на их опыт и интуицию (*Стародубцев П.А., Шевченко Е.В*. 2005). Для пояснения сути дальнейших рассуждений кратко остановимся на двух наиболее ярких и часто наблюдаемых моментах в жизни рыб. Первый момент: мировая практика изучения процесса поведения рыб в море показала, что они при движении используют, по крайней мере, два способа плавания: волнообразно извиваясь всем телом или двигая только хвостом. Рыбы, имеющие змееобразную форму (угри), плавают первым способом, отталкивая назад воду, в результате чего движутся вперёд.

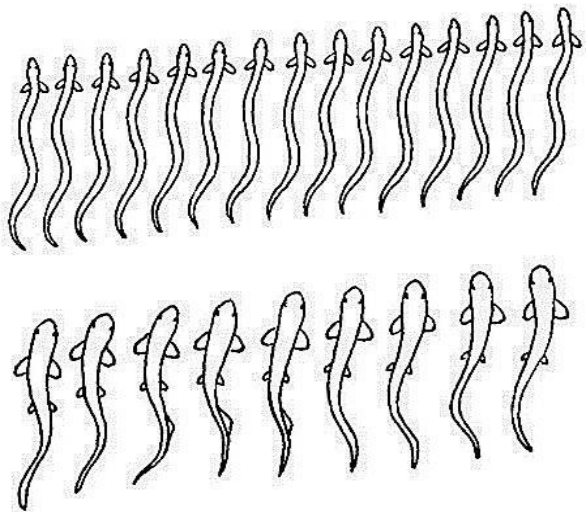

Рис. 1. *Два способа плавания рыб – волнообразное (верх) и использующее только движение хвоста (низ) (Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А. 2008; Пичугин К.А. 2008)*

При втором способе воду отталкивает назад только быстро распрямляющийся хвост рыбы (*Стародубцев П.А., Шевченко Е.В*. 2005; *Стародубцев П.А.* 2008). Для примера на рис.1 представлены оба способа: первый (вверху) и второй (внизу).

Второй момент: одно из самых красивых зрелищ в природе - это синхронное движение рыб в составе рыбного косяка (РК). Сотни тысяч рыб движутся в унисон, гипнотизируя наблюдателя (см. рис.2).

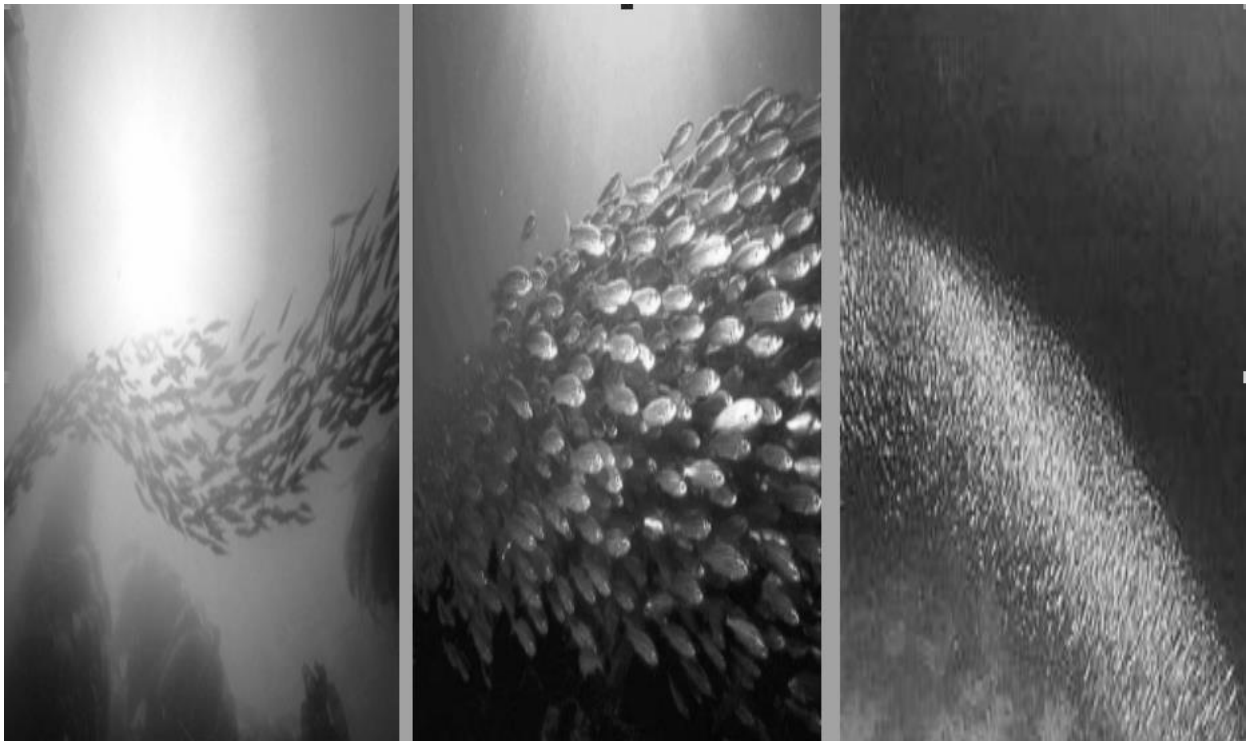

Рис. 2. *Синхронное движение рыб в составе РК (Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А., Карасев В.В. и др. 2008; Пичугин К.А. 2008)*

Биологи Эндрю Брирли и Мартин Кокс из университета Святого Эндрю (Великобритания) впервые в мире применили многолучевой гидролокатор для изучения процесса возникновения трехмерной структуры РК сардин. Оказалось, что в РК строго поддерживается отношение площади его поверхности к объему: примерно 3,3 обратных метра, в то время как количество особей и плотность их в РК меняются очень сильно. Кроме того, по своей форме РК сардин не схож со «сферой» или «яйцом», а напоминает нерегулярный кристалл при постоянстве линейных параметров (*Стародубцев П.А. и др.* 2008). Изучение другими биологами поведения прочих рыб в РК продемонстрировало несколько другую картину (см. рис.3).Такое компактное состояние РК, как показано на рисунке 3, оберегает их и сильно осложняет действия хищников (в данном случае от китов).

Атаковать рыб, которые сбились в «защитный» РК, абсолютно бесперспективно. Результат будет отрицательный. Но хищникам приходится совершать нападения на РК. Как ведет себя РК в таком случае? Во многом это зависит от характера атаки хищника.

Рис. 3*. Трехмерная структура РК (Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А. и др. 2008; Пичугин К.А. 2008)*

Если она происходит неожиданно и с большой скоростью, то РК попросту кидается врассыпную, проявляя элементы хаоса (см. рис.4), но спустя какое-то время снова собирается по логике детерминированности.

Рис. 4. *Распад РК при нападении хищника (Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А., Пичугин К.А. и др. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2008)*

Рис. 5. *Фонтанный эффект в РК (начальный этап) (Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А. и др. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2008)*

Если же хищник замечен вовремя, то рыбы РК чаще всего отвечают на его приближение специальными слаженными действиями. Наиболее распространенным является

так называемый «фонтанный эффект», или Ф-маневр (см. рис.5 и рис. 6). Та сторона РК, откуда появился хищник, образует впячивание, которое затем углубляется, и РК как бы пропускает агрессора сквозь себя, вновь смыкаясь позади него.

Рис. 6*.Фонтанный эффект в РК (конечный этап)*
(Стародубцев П.А., Шевченко Е.В. 2005; Стародубцев П.А. и др. 2008;
Стародубцев П.А. и др. 2008)

Эффективность подобных действий настолько высока, что чаще всего хищник после двух-трех бесплодных атак вообще прекращает нападение. Ф-маневр - не единственное средство спасения от хищников. В арсенале РК имеются и различные другие приемы, позволяющие снизить эффективность охоты хищников.

Для правильного понимания дальнейших гипотетических рассуждений проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды, представленных в статье, введем новое определение состояния РК при его перемещении из одной точки кормления в другую, ранее не применяемое в промышленном рыболовстве, и назовем как«установившееся состояние морской биотики», сокращенно 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. Как было отмечено при натурных наблюдениях, РК в УСМБ может встречаться в случаях его перехода к месту нереста или кормления. Плыть в таком состоянии для рыб не только безопаснее от хищников, но и энергетически выгоднее, если держаться точно за виляющим впереди хвостом, который оставляет после себя завихрения (см. рис.7), подталкивающие вперёд тех, кто плывёт сзади.

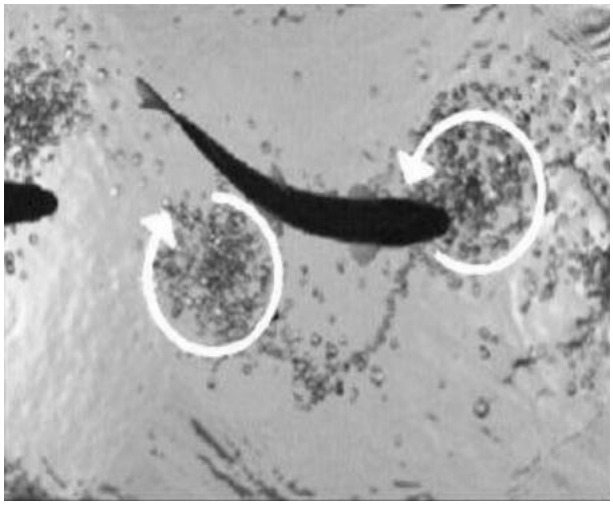

Рис.7*. Кольца завихрений, облегчающие рыбам движение вперёд (Стародубцев П.А. и др. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2008; Шевченко Е.В. 2007)*

Двигаться так, чтобы оказаться точно между двумя завихрениями, оставленными впереди плывущей рыбой, помогают специальные рецепторы боковой линии - высокочувствительные датчики давления.

Кольца завихрений в РК при УСМБ облегчают рыбам движение вперёд. Как показала практика морских наблюдений за ними, при небольшой скорости такое движение является ламинарным, когда потоки воды, омывая их, перемещаются слоями без перемешивания.

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 (*Шевченко Е.В.*2007; *Пичугин К.А.* 2008).

Результаты и обсуждения

Для РК при УСМБ любое кратковременное внешнее (хищник) или долговременное внутреннее (изменение стратификации морской среды или остановка РК для кормления) воздействие, приводит к изменению его направления, скорости движения и возникновению в нем детерминированного хаоса.

При этом для таких состояний РК детерминированный хаос гипотетически необходимо рассматривать как нерегулярное или хаотическое движение, порожденного нелинейной системой, для которой динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния всей системы в целом (воздействие хищника) или отдельной особи (изменение стратификации морской среды или остановка для кормления) при известной предыстории.

При этом оба частных состояния РК при УСМБ имеют свою собственную специфическую эволюцию развития и в вопросах промышленного рыболовства, теории поведения биосистем авторами рассматриваются гипотетически впервые, что требует дополнительных достаточно серьезных теоретических и натурных исследований.

На такие изменения РК при УСМБ и переход его в данные состояния рыбами тратится много энергии из-за увеличения скорости движения. Лобовое сопротивление для них резко возрастает, и возникают частная (отдельная особь) и общая (РК в целом) турбулентности (см. рис.8). При этом, возникновение «хаоса поведения» приводит к конечному изменению

траекторий движения, как отдельных особей, так и РК в целом в «фазовом» пространстве *(Шевченко Е.В.*2007; *Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010).

Законы перехода потока движения жидкости вокруг РК из ламинарного состояния (УСМБ) в турбулентное (см. рис.8) известны достаточно давно и описываются числом Рейнольдса $Re = \rho Vd/\mu$, где V-скорость движения РК, d-диаметр отдельной рыбы, ρ- плотность морской воды, μ-вязкость морской воды. Если параметры омывающего рыбу потока морской воды таковы, что число Рейнольдса меньше критического ($Re<Re_{кр}$), то режим течения вокруг них остается ламинарным, если же $Re>Re_{кр}$, то режим омывающего рыбу потока должен быть гипотетически «турбулентный». Число Рейнольдса для небольших рыб, которые и являются предметом всех предыдущих и последующих гипотетических рассуждений в данной статье, более 100.

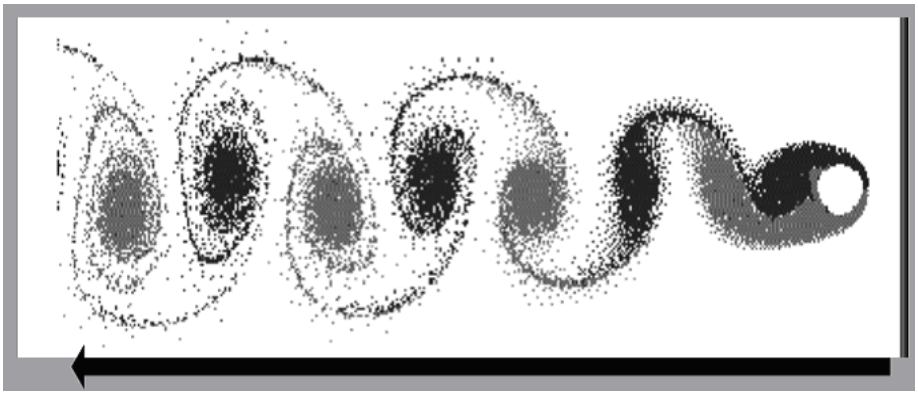

Рис. 8. *Гипотетическая частная турбулентность в виде вихревой дорожки, как результат движения рыбы при уклонении от преследования хищника (Шевченко Е.В. 2007; Пичугин К.А. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2010)*

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 уравнениями (см. рис.4,5,6).

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 *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010).

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 (см. рис. 4,5,6) 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 (см. рис.2). Поэтому траектория движения РК при УСМБ и его отдельных особей не должна выходить за границы этой

области, и обязана иметь квазиосцилляторный характер (см. рис. 5) *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008)**.**

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 другим траекториям, противоположным экспоненциальной неустойчивости движения их первоначального состояния (см. рис. 6) *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008)**.**

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) *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008). 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 (см. рис.5, 6, 8). Оно, однако, вовсе не означает практическую возможность долговременного прогноза эволюции процесса потери УСМБ РК и перехода в другие состояния *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010)**.**

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 *(Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010)**.**

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 ее 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 (*Стародубцев П.А. и др.* 2010)**.**

Проводя такие эксперименты, ученые изучают коллективное поведение рыб, какие внешние факторы могут повлиять на их поведение и какие существуют мотивы. Управляя роботом-рыбой в искусственном водоеме, ученые получили большое количество новой информации. Когда роботизированная рыба передвигалась по водоему, РК следовала за ней,

однако, от скорости движения робота поведение остальных рыб не зависело. В будущем ученые планируют спасать редкие виды рыб при помощи внедрения в РК робота в качестве лидера. Например, робот смог бы увести РК редких рыб подальше от места разлива нефти во время техногенной катастрофы.

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 (см. рис. 9) (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010):

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

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

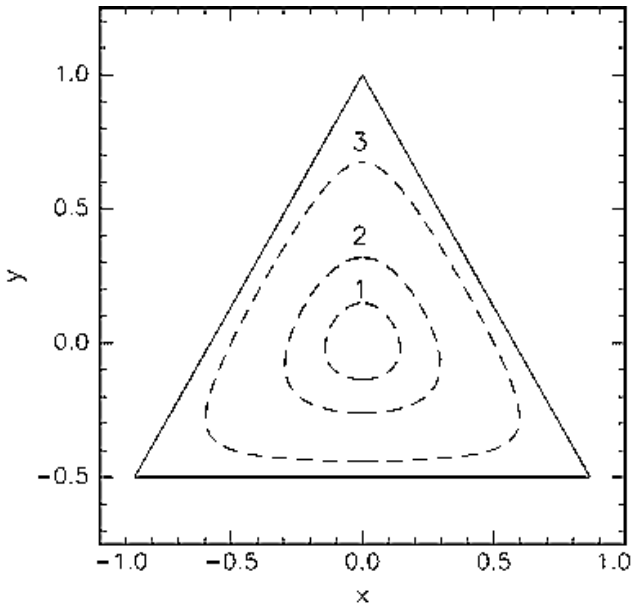

Рис. 9. *Область финитного движения для модели Хенона-Хейлеса (пунктирные линии представляют собой эквипотенциальные кривые U = const. 1 - U = 0.01, 2-U = 0.04, 3 - U = 0.125) (Пичугин К.А. 2008; Стародубцев П.А. и др.2010)*

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. Представим некоторую аналогию: пусть отдельная особь РК представляет собой частицу массы $m = 1$, которая движется в двумерном потенциале (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010)

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

По сути, это два одинаковых гармонических осциллятора с нелинейным взаимодействием между ними (аналогия, см. рис.7). 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 рисунке 10 (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010).

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-х мерном фазовом пространстве (x, y, p_x, p_y) крайне нерегулярным образом (см. рис. 10). Так, если взять только те моменты времени, когда траектория пересекает плоскость $x = 0$, то значение координаты y и импульса p_y изображены в эти моменты точками (см. рис.10) образуют сечение Пуанкаре (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010).

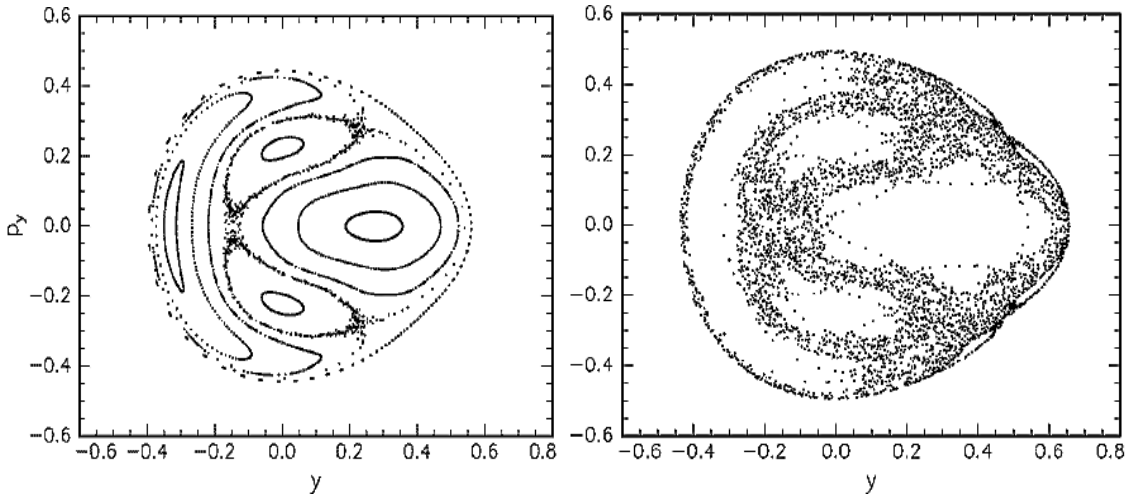

Рис. 10. *Сечение Пуанкаре (y,p_y) модели Хенона-Хейлеса при энергии частицы E = 1/10 (слева) и E = 1/8 (справа) (Пичугин К.А. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2010)*

Анализ данных (см. рис.10) может вполне быть аналогом доказательства существования детерминированного хаоса, когда поведение лидера является хаотическим, а поведение других особей РК, которые ориентируются на него, детерминированным.

Дополнительно необходимо отметить, что и в поведении лидера при знании гидрологических условий района, где наблюдается РК, отчасти будут проявляться элементы детерминированности (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010; *Халаев Н.Л. и др.* 2012).

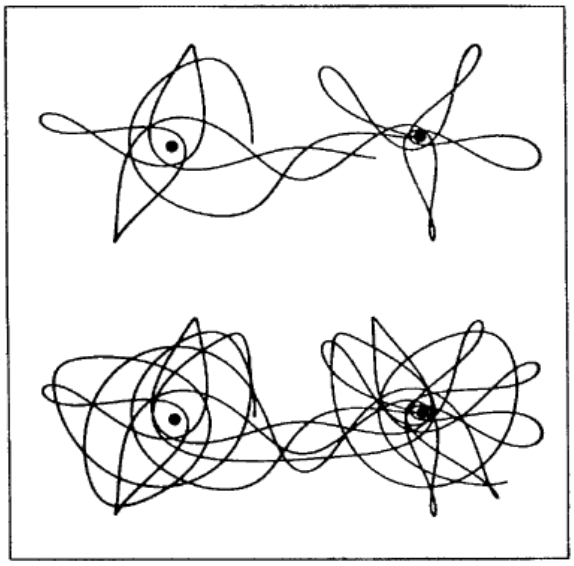

Рис. 11. *Движение «пробной» точки вблизи двух одинаковых неподвижных точек. Вверху показана начальная часть траектории, а внизу ее продолжение (Пичугин К.А. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2010)*

С точки зрения гипотетических рассуждений и аналогии, частным случаем вышеизложенного или внутреннего (изменение стратификации морской среды или остановка для кормления) воздействие на РК с потерей УСМБ может, является 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 (см. рис. 11) выглядит чрезвычайно сложной и запутанной. Она то обвивается вокруг одной из точек, то неожиданно перескакивает к другой. Первоначально близкие траектории очень быстро расходятся.

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 учёные (см. рис. 12), одну из рыб приняли за некую константу, на рисунке ей присвоен номер 1. Другие рыбы двигались по траекториям, обозначенным цифрами 2, 3 и 4. (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010; *Халаев Н.Л. и др.* 2012).

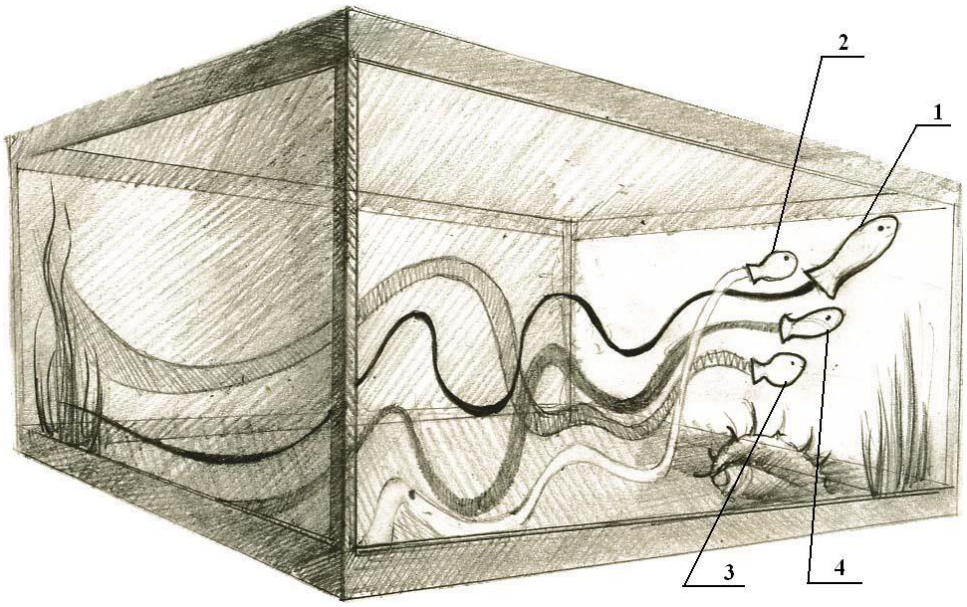

Рис. 12. *Результаты наблюдений за четырьмя гамбузиями в аквариуме (Пичугин К.А. 2008; Стародубцев П.А. и др. 2010; Халаев Н.Л. и др. 2012)*

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 нём руководствуются несколькими простыми правилами. Во-первых, каждая рыба старается держаться на какой-то минимальной дистанции от той, что плывёт 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 (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.*2010):

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

где $\dot{}$ «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 $Z(t)$) определяют 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 (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010).

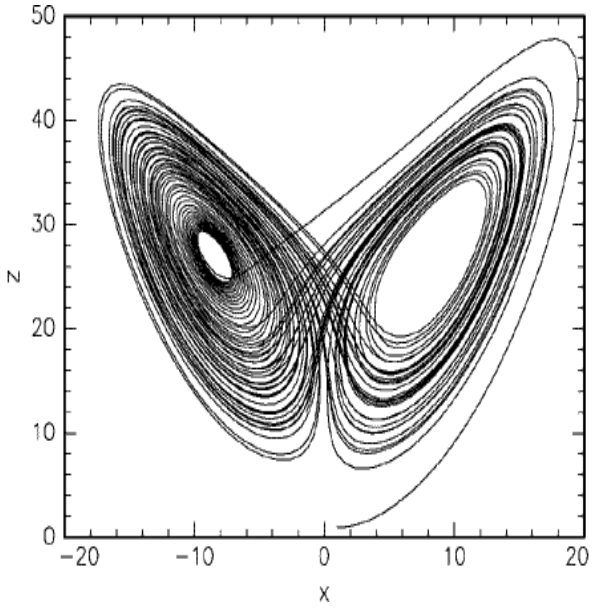

Рис.13. *Траектория, отвечающая хаотическому решению уравнений Лоренца, с параметрами, приведенными в тексте, и начальными условиями X(0) = Y(0) = Z(0) = 1 (Стародубцев П.А. и др. 2010)*

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 плоских, перепутанных сложным образом спирали (см. рис. 13).

На рисунке 13 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 так далее. 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 (см. рис. 8). Причем часто различие нарастает со временем экспоненциально, то есть чрезвычайно быстро (см. рис.14).

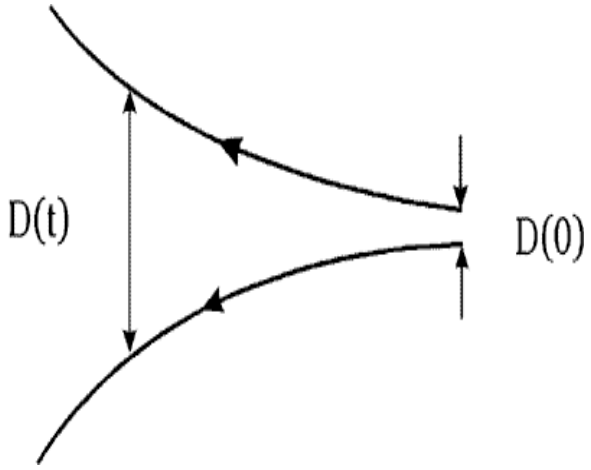

***Рис.14**. Две первоначально близкие траектории в фазовом пространстве расходятся со временем в результате локальной неустойчивости (Стародубцев П.А. и др. 2010)*

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

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 (*Пичугин К.А.* 2008; *Стародубцев П.А. и др.* 2010).

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.

В эволюции поведения РК можно отметить, как аналогию еще одно интересное подобие или совпадение. Великий французский математик Анри Пуанкаре в 1904 г. сформулировал свою знаменитую гипотезу следующим образом: всякое односвязное компактное трехмерное многообразие без края гомеоморфно трехмерной сфере.

Смысл заключается в следующем: односвязное компактное трехмерное многообразие» - это любой объект без дырок. Например, простейший шар, или куб, или лист бумаги.

Гомеоморфизм (от греческого «похожий с виду») - это возможность из одной фигуры получить другую, сжимая или вытягивая какие-либо ее части. Так вот гипотеза Пуанкаре утверждает, что всегда найдется способ любое трехмерное тело без разрезания и склеивания превратить в шар. Как показано на рис.15 рыбы бокачио, сбившиеся тугим комом полностью подтверждают данную гипотезу.

Рис.15*. Рыбы бокачио, сбившиеся тугим комом под кормой небольшого судна (Стародубцев П.А. и др. 2010; Халаев Н.Л. и др. 2012)*

Этот необычный снимок, сделанный близ острова Каталина (Карибское море, Доминиканская Республика) иллюстрирует редкий тип скопления рыб. Обычно в такой шар сбивается потревоженный и перепуганный РК, когда каждая особь стремится спрятаться за своего товарища. На поверхности шара оказывается наименьшее число рыб, которым грозит непосредственная опасность**.**

Заключение

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 (*Шевченко Е.В.* 2007; *Пичугин К.А.* 2008), 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 поведения биотики морской среды (*Халаев Н.Л.и др.* 2012). Теория поведения (РК) авторами рассматриваются гипотетически впервые, что требует дополнительных достаточно серьезных теоретических и натурных исследований.

Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы, поясняющие некоторые элементы проявления детерминированного хаоса в биотике морской среды и их возможные гипотетические объяснения:

1. Детерминированный хаос в биотике морской среды есть сущность предсказуемого порядка.
2. Детерминированный хаос есть организационное состояния РК, когда рыба-лидер является генератором хаотического поведения, а остальные особи причиной его детерминированности.

3. Одной из основных характерных особенностей всех систем, в которых наблюдается детерминированный хаос, является то, что они описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

4. Критериями хаотичности и качества выхода РК из УСМБ в другие состояния являются: сплошной спектр решения (означающий присутствие в нем бесконечного числа различных периодических составляющих); однородность спектра решения (т.е. отсутствие выделенных частот); быстрое затухание корреляций (т.е. «забывание» системой своей предыстории).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пичугин К.А.* 2008. Современная интерпретация физических основ формирования рыбных скоплений как объекта дальнего гидроакустического обнаружения: Канд. дис., Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 152 с.
2. *Стародубцев П.А., Шевченко Е.В*. 2005. Возмущения водной среды, созданные движением стаи рыб // Сборник материалов региональной научно-технической конференции, посвященной 115-летию морского образования на Дальнем Востоке. Владивосток. 2005. Типография Морского государственного университета имени адмирала Г.И.Невельского. с.129-135.
3. *Стародубцев П.А*. 2008. Детерминированный хаос в рыбных скоплениях и причины его возникновения // Сборник научных трудов № - 20. Владивосток. 2008. Типография Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. с.130-141.
4. *Стародубцев П.А., Пичугин К.А., Стародубцев Е.П.* 2008. Фрактальные модели как форма перемещения рыбного косяка в статическом объеме водного пространства // Сборник научных трудов кафедры «Промышленное рыболовство». Владивосток. 2008. Типография Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. с.128-134.
5. *Стародубцев П.А., Карасев В.В., Пичугин К.А*. 2008. Некоторые современные технологии дальнего обнаружения рыбных косяков и их теоретические объяснения // Известия ТИНРО, т.152, с. 267-278.
6. *Стародубцев П.А., Карасев В.В., Пичугин К.А., Алифанов Р.Н.* 2010. Современные технологии обнаружения рыбных косяков и их теоретические объяснения. Владивосток. Издательский дом Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. 130 с.
7. *Халаев Н.Л., Стародубцев П.А., Димидов В.Е.* 2012. Некоторые концептуальные положения процесса мониторинга океанской среды. Владивосток. Издательский дом Дальневосточного федерального университета. 224 с.
8. *Шевченко Е.В.* 2007. Дальнее обнаружение сформированных рыбных косяков маломощными низкочастотными просветными сигналами: Канд. дис., Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 134 с.
9. *Стародубцев П.А.* Фрактальная форма представления рыбного косяка при его перемещении в статическом объеме водного пространства (статья). Сб.мат. VI международной научно-практической конф.-Владивосток. ДВГТУ. Проблемы открытого образования, 2008 г.- С.44-50.
10. *Карасев В.В., Алифанов Р.Н., Стародубцев П.А.* Анализ исследований гидроакустических средств обнаружения биологических объектов. Материалы Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы развития судоходства в Дальневосточном регионе». Владивосток, Дальрыбвтуз, 2011 г.- С. 24-28.

Рецензент: Войлошников Михаил Владиленович, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, главный научный сотрудник НИИ МТ, доктор технических наук, профессор.

REFERENCES

1. Pichugin K.A. 2008. Sovremennaja interpretacija fizicheskih osnov formi-rovanija rybnyh skoplenij kak ob#ekta dal'nego gidroakusticheskogo obna-ruzhenija: Kand. dis., Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tehnicheskij rybo-hozjajstvennyj universitet, 152 s.
2. Starodubcev P.A., Shevchenko E.V. 2005. Vozmushhenija vodnoj sredy, soz-dannye dvizheniem stai ryb // Sbornik materialov regional'noj nauchno-tehnicheskoj konferencii, posvjashhennoj 115-letiju morskogo obrazovanija na Dal'nem Vostoke. Vladivostok. 2005. Tipografija Morskogo gosudarst-vennogo universiteta imeni admirala G.I.Nevel'skogo. c.129-135.
3. Starodubcev P.A. 2008. Determinirovannyj haos v rybnyh skoplenijah i prichiny ego vozniknovenija // Sbornik nauchnyh trudov № - 20. Vladivostok. 2008. Tipografija Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo rybo-hozjajstvennogo universiteta. c.130-141.
4. Starodubcev P.A., Pichugin K.A., Starodubcev E.P. 2008. Fraktal'nye modeli kak forma peremeshhenija rybnogo kosjaka v staticheskom ob#eme vod-nogo prostranstva // Sbornik nauchnyh trudov kafedry «Promyshlennoe ry-bolovstvo». Vladivostok. 2008. Tipografija Dal'nevostochnogo gosudarst-vennogo tehnicheskogo rybohozjajstvennogo universiteta. c.128-134.
5. Starodubcev P.A., Karasev V.V., Pichugin K.A. 2008. Nekotorye sovremen-nye tehnologii dal'nego obnaruzhenija rybnyh kosjakov i ih teoreticheskie ob#jasnenija // Izvestija TINRO, t.152, c. 267-278.
6. Starodubcev P.A., Karasev V.V., Pichugin K.A., Alifanov R.N. 2010. So-vremennye tehnologii obnaruzhenija rybnyh kosjakov i ih teoreticheskie ob#jasnenija. Vladivostok. Izdatel'skij dom Dal'nevostochnogo gosudarst-vennogo tehnicheskogo rybohozjajstvennogo universiteta. 130 s.
7. Halaev N.L., Starodubcev P.A., Dimidov V.E. 2012. Nekotorye konceptu-al'nye polozhenija processa monitoringa okeanskoj sredy. Vladivostok. Izdatel'skij dom Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 224 s.
8. Shevchenko E.V. 2007. Dal'nee obnaruzhenie sformirovannyh rybnyh kosja-kov malomoshhnymi nizkochastotnymi prosvetnymi signalami: Kand. dis., Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tehnicheskij rybohozjajstvennyj uni-versitet, 134 s.
9. Starodubcev P.A. Fraktal'naja forma predstavlenija rybnogo kosjaka pri ego peremeshhenii v staticheskom ob#eme vodnogo prostranstva (stat'ja). Sb.mat. VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konf.-Vladivostok. DVGTU. Problemy otkrytogo obrazovanija, 2008 g.- S.44-50.
10. Karasev V.V., Alifanov R.N., Starodubcev P.A. Analiz issledovanij gidroakusticheskih sredstv obnaruzhenija biologicheskih ob#ektov. Materia-ly Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii "Aktual'nye proble-my razvitija sudohodstva v Dal'nevostochnom regione». Vladivostok, Dal'-rybvtuz, 2011 g.- S. 24-28.