

Измерение количественных характеристик стайного движения рыб методами компьютерного зрения

В.И. Бужакс¹, М.Д. Глотов¹, А.С. Селюков¹, Т.А. Малютина²

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия

² Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН (ЦП), Москва, 119071, Россия

Аннотация

При исследовании механизмов стайного поведения рыб возникает необходимость обработки больших объемов визуальной информации. Ранее такая обработка проводилась в значительной степени вручную. В работе рассматривается возможность автоматизации обработки результатов наблюдений с помощью пакета компьютерного зрения *open CV*. Обработывались как отдельные кадры, так и фрагменты кино (видео) наблюдений. Для обработки отдельных кадров была написана программа автоматического подсчета количества особей в стае, программы определения положения особей и степени поляризации группы особей. Введено понятие степени испуга стаи. При обработке фрагментов наблюдений (сцен) рассматривались сцены испуга стаи и сцены взаимодействия хищника и стаи. При исследовании сцены испуга были построены программы вычисления: скоростей движения особей, кинетической энергии отдельной движущейся особи, кинетической энергии группы особей. Предложен метод численного измерения испуга, вызванного коротким локальным возмущением движения стаи. При исследовании сцены взаимодействия хищника и стаи построена программа отслеживания движения отдельной особи в стае. Предложенные методы могут быть использованы при построении и идентификации параметров математических моделей стайного движения рыб.

Ключевые слова

Компьютерное зрение, Open CV, стая рыб, коллективные маневры, потоки движения в группе, обработка наблюдений, измерение испуга.

Measurement of Quantitative Characteristics of Schooling Movement of Fish by Computer Vision Methods

V.I. Bujakas¹, M.D. Glotov¹, A.S. Selyukov¹, T.A. Malyutina²

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

² A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences (CP), Moscow, 119071, Russia

Abstract

In the study of the mechanisms of schooling behavior of fish, it becomes necessary to process large amounts of visual information. Early this processing was done mostly by hand. The paper study the possibility of automating the processing of observation results using the open CV computer vision package. Both individual frames and video fragments (scenes) of observations were processed. To process individual frames, a program was written for automatically counting the number of fishes

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: bujakas@yandex.ru (В. И. Бужакс); maxglotov1998@yandex.ru (М.Д. Глотов); selyukovas@lebedev.ru (А.С. Селюков); maliytina@mail.ru (Т.А. Малютина)

ORCID: 0000-0002-2243-2539 (В. И. Бужакс); 0009-0008-0624-5830 (М.Д. Глотов); 0000-0002-4007-6291 (А.С. Селюков); 0009-0005-3961-3853 (Т.А. Малютина)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

in a school, another programs were written for *determining the position of fishes* and the *degree of polarization* of a group. During processing *fragments of observations* (scenes) the *video scenes of fright* of the school and *video scenes of interaction between the predator and the school* were considered. When studying the fright scene, a program for determining the *speed* of movement of individuals, a programs for calculating the *kinetic energy of an individual* moving and the *kinetic energy of a group* of fishes were built. The concept of the fright's magnitude caused by a short local perturbation is introduced, and a method is proposed for *numerically measuring the magnitude of the fright*. When studying the scene of interaction between a predator and a school, a program for tracking the movement of an individual in a school was built. The proposed methods can be used in constructing and identifying the parameters of mathematical models of schooling fish movement.

Keywords

Computer vision, Open CV, school of fish, collective maneuvers, movement flows in a group, observation processing, fright measurement.

1. Введение

Многие виды рыб постоянно или в определенный период жизни образуют стаи без доминирования одной особи над другими [1, 2]. Биологические эксперименты показывают [3], что стаи без доминирования на сравнительно коротких интервалах времени демонстрируют сходные реакции на идентичные внешние воздействия.

Примерами таких реакций могут служить *потоки движения* [2], возникающие в группе рыб при переходе из состояния покоя в состояние движения; *волны возбуждения* [4], обнаруживаемые в стае после воздействия кратковременным пугающим раздражителем; *«мельницы»* [5] – вращательное движение стай, наблюдаемое при определенных обстоятельствах в природе и в натурных экспериментах, *Ф-маневры* [6] – характерный тип движения, возникающий при встрече стаи с хищником. Важно отметить, что на качественном уровне эти реакции слабо зависят от вида рыб и количества особей в стае. Прилагаемые видеофайлы *«Испуг стаи леща.тр4»* [7], *«Взаимодействие леща и щуки .тр4»* [8] и *«Взаимодействие модели хищника и стаи.тр4»* [9] демонстрируют типичные примеры возникновения потока движения в стае рыб и взаимодействия хищника и стаи (Ф-маневры).

Теоретическим и экспериментальным исследованиям стайного поведения рыб посвящено огромное количество работ [10, 11, 15-17]. Ранее нами был предложен новый подход к задаче математического моделирования стайного маневрирования [12, 13]. В основу подхода была положена, наблюдаемая в экспериментах, зависимость поведения особи в стае от поведения соседей (склонность к подражанию [14]). Такая зависимость создает в стае локальное взаимодействие, что позволяет рассматривать стаю как физическую среду. Для описания новых сред использовались уравнения в конечных разностях и уравнения в частных производных. Было показано, что подбором законов локального взаимодействия можно получать среды (уравнения), решения которых на качественном уровне соответствуют наблюдаемым стайным явлениям. Подбор параметров моделей осуществлялся обработкой киноплёнок экспериментальных наблюдений. Обработка проводилась вручную на проекционной установке ПРК и была очень трудоемкой. Современные методы компьютерного зрения позволяют автоматизировать решение задач обработки, формулировать и решать новые задачи обработки результатов наблюдения стайного маневрирования рыб.

Конкретно в этой работе мы исследуем *потоки движения* в стае рыб, и приводим результаты работы программы, *выделяющей движение одной особи стаи при Ф-маневре* (встрече стаи с хищником).

В качестве исходного материала рассматриваются киноплёнки натурных экспериментов, выполненных на базе Института биологии внутренних вод РАН им. И.Д. Папанина (п. Борок). Эксперименты проводились в мелких бассейнах, исследовались двумерные движения стаи. Киноплёнки наблюдений оцифровывались и обрабатывались с помощью пакета компьютерного зрения *open CV*.

Для обработки результатов наблюдений использовалась открытая библиотека компьютерного зрения *Open CV*. Программы обработки написаны на языке Python.

2. Поток движения в стае рыб

Рассмотрим сцену испуга стаи, представленную в [7] видеофайлом «Испуг стаи леца.тр4». В начальный момент стая находится в состоянии относительного покоя (хаотичном состоянии, *swarm state* в английской терминологии). Далее под действием короткого, локального возмущения небольшая часть особей начинает согласованное перемещение. К ним присоединяются соседние рыбы, подражая движущимся особям. В стае *возникает поток движения*, который может либо затухнуть, либо охватить всю стаю. На основе технологий компьютерного зрения мы предлагаем новый инструмент (tool, device) численного измерения степени испуга стаи.

По каждому *отдельному кадру видеосъемки* технологии компьютерного зрения позволяют автоматически определять:

1. Количество особей в стае n .
2. Положения центров особей. Мы исследуем движение стаи в мелком бассейне, поэтому в *графическом формате* каждому центру особи соответствует точка на плоскости. В *цифровом формате* положению центров особей стаи соответствует двумерный массив, размерность которого равна числу особей в стае - $c(i) = (c_1(i), c_2(i))$, $i = 1, 2, \dots, n$. Здесь $c_1(i), c_2(i)$ – координаты центра i -й особи.
3. Направления тел особей. Определяются одномерным массивом $\alpha(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, размерность которого равна числу особей в стае. Здесь $\alpha(i)$ – угол наклона направления тела i -й особи к оси OX_1 .
4. Степень поляризации (упорядоченности) группы, которая определяется выражением [10]:

$$Q_p = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n u_i \right| \quad (1)$$

Здесь n – количество особей в группе, u_i – единичный вектор, направленный вдоль тела i -й особи в сторону головы, $|\cdot|$ – норма (длина) вектора. Степень поляризации меняется от 0 (неупорядоченное состояние, *swarm state*) до 1, когда все векторы u_i коллинеарны (согласованное движение, *polarized state*).

На рисунке 1. показана последовательность обработки одного кадра наблюдений с целью вычисления степени поляризации группы (1). Здесь **a.** Исходное изображение (оригинал). **b.** Результат фильтрации исходного изображения – построение контрастного негатива. Каждая особь представлена в виде капли (blob), **c.** Построение аппроксимирующих эллипсов, **d.** Выделение центров особей, **e.** Построение единичных векторов, направленных вдоль тела особей. В результате вычисления степени поляризации она оказывается равной $Q_p = 0,058$.

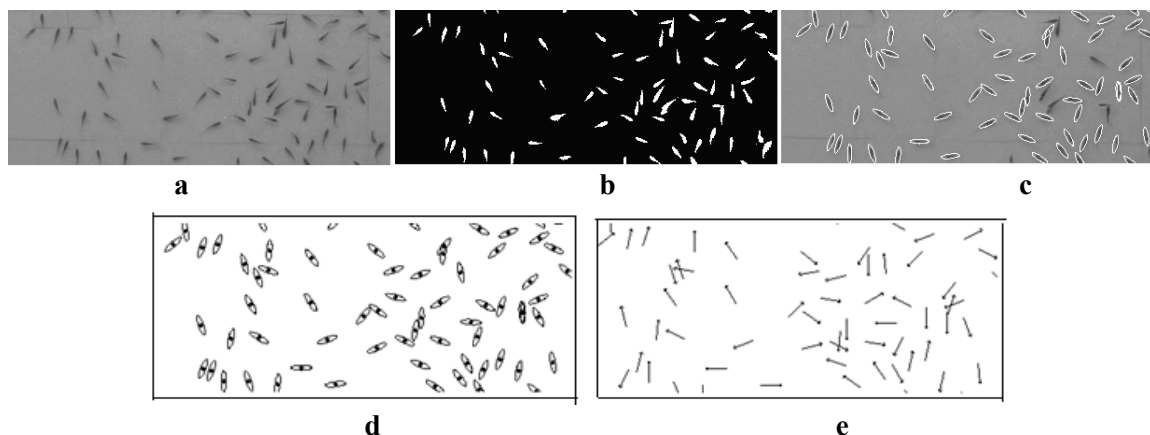


Рисунок 1 – Последовательность обработки кадра стаи в состоянии покоя (*swarm state*)
a. Оригинал, **b.** Негатив, **c.** Построение аппроксимирующих эллипсов, **d.** Выделение центров особей, **e.** Построение единичных векторов, направленных вдоль тела особей. Результат вычисления степени поляризации $Q_p = 0,058$

Аналогичные вычисления для группы особей, совершающих согласованное перемещение (polarized state) приводят к $Q_p = 0,68$. На рисунке 2 представлены два кадра видеонаблюдения стаи в различных состояниях и результаты вычисления степеней поляризации групп.

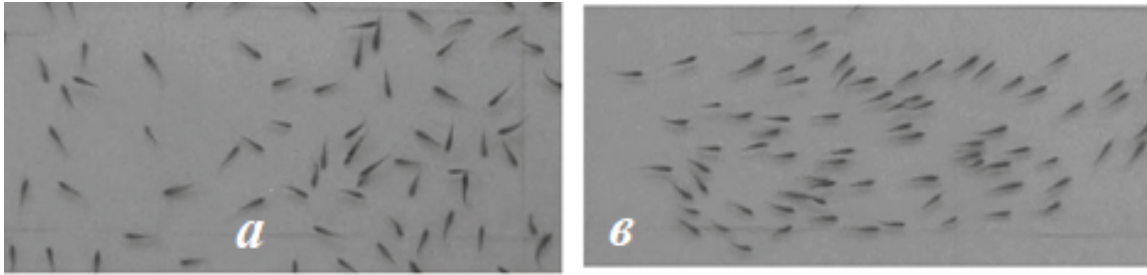


Рисунок 2 – а – стая в состоянии покоя (swarm state) $Q_p = 0,058$; б – стая в состоянии согласованного движения (polarized state) $Q_p = 0,68$

Программа вычисления степени поляризации стаи приведена в [18].

Для обнаружения особей в программе использовались следующие критерии.

Для обнаружения особи на фоне дна используется разница в цвете. Яркость каждого пикселя в обрабатываемом изображении задаётся значением от 0 до 255. В самом простом случае, когда освещённость кадра равномерная, можно простым способом отделить особей от фона, задав порог яркости. Для рисунка 1а этот порог составляет 120. Результат после фильтрации показан на рисунке 1б.

Но часто в реальных условиях освещение на кадре неравномерно и простой пороговый фильтр не эффективен. В таких случаях применяется адаптивный фильтр `cv2.adaptiveThreshold` входящий в библиотеку `OpenCV2`. Он автоматически определяет порог фильтрации на небольшом участке изображения. Однако в таком случае в области без особей возникают ложные объекты. Для этого в фильтре задаётся минимальный размер объекта.

После отделения объектов от фона получается бинарное изображение (рисунок 1б). При помощи функции `cv2.findContours`, входящей в библиотеку `OpenCV2`, получаем многомерный массив контуров. Точки в нём группируются по принадлежности к конкретному контуру. Контур, имеющие размер менее 6 точек и более 60, исключаются.

Для нахождения центра особи по её контуру применяется функция `cv2.fitEllipse`, входящая в библиотеку `OpenCV2`. Эта функция позволяет получить параметры эллипса, вписанного в контур особи. Центр эллипса соответствует центру масс особи.

Для вычисления направлений тел особей использовался следующий алгоритм определения направления «хвост-голова».

Определение направления особи происходит по положению её хвоста. Из-за каплевидной формы тела центр масс смещён к голове. Тогда, если измерить расстояние от центра масс до точек контура, наиболее удалённая точка будет являться кончиком хвоста. По координатам центра масс и хвоста можно вычислить угол поворота тела особи.

По каждой паре соседних или достаточно близких кадров технологии компьютерного зрения позволяют вычислить:

5. Вектора скоростей перемещения центров тела особей – двумерный массив, определяющий направления и величину скоростей центров особей. Размерность массива равна числу особей в стае: $v(i) = (v_1(i), v_2(i)), i = 1, 2, \dots, n$.

6. Полагая, что все особи одинаковые и имеют единичную массу, вычислить кинетическую энергию движения особей – одномерный массив

$$E(i) = \left(\frac{(v_1(i))^2 + (v_2(i))^2}{2} \right), i = 1, 2, \dots, n.$$

7. Вычислить общую кинетическую энергию группы особей в текущий момент времени:

$$E_s = \sum_{i=1}^n E(i).$$

Здесь суммирование ведется по элементам группы.

8. Определить изменение кинетической энергии группы во времени и проанализировать процесс диссипации.

Для вычисления скоростей перемещения особей использовался следующий алгоритм. После обработки некоторой последовательности кадров получаем многомерный массив координат особей. Требуется привязать координаты к конкретной рыбке. Если рассмотреть два соседних кадра, то расстояние перемещение рыбки на них будет существенно меньше расстояния до соседней особи. Таким образом, если взять массивы двух соседних кадров и найти во втором массиве точку, наиболее близкую к выбранной точке из первого массива, можно сказать, что это точки центра масс одной особи. По такому принципу формируется новый массив, в котором к каждой рыбке прикреплен свой индекс, под которым можно найти точки её центра масс на разных кадрах.

Для определения скорости перемещения используется перемещение особей за N кадров. Использовать два соседних кадра для вычисления скорости перемещения нецелесообразно по причине малого перемещения рыбки за столь короткий интервал времени (рисунок 3). В представленном алгоритме $N = 5$.

Назовем *степенью испуга стаи* численное значение изменения кинетической энергии движения группы особей, вызванное коротким, локальным возмущением (разность между максимальной кинетической энергией испуганной стаи и начальной энергией стаи в состоянии покоя). Программа обработки и анализа испуга стаи приведена в [18].

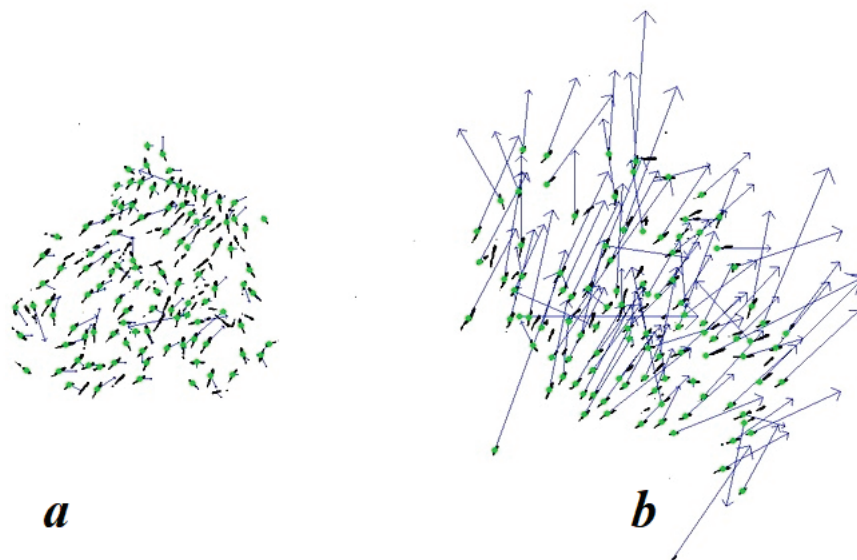


Рисунок 3 – Два кадра обработки видеосцены испуга стаи

a – стая в состоянии покоя (кадр № 19 из видео [7]), *b* – стая в движении (кадр № 53 из видео [7]) Зеленым цветом выделены отслеживаемые особи в стае, синим цветом окрашены стрелки, указывающие направление и величину скоростей отслеживаемых особей

Величина скачка кинетической энергии группы на рисунке 4 определяет степень испуга стаи. Насколько нам известно, метод измерения степени испуга стаи в настоящей работе предлагается впервые.

3. Взаимодействие хищника и стаи

Исследование взаимодействия хищника и стаи проводилось на примере видеофайла «Взаимодействие леща и щуки.тр4», представленного в [7]. Была написана программа отслеживания движения отдельной особи в процессе Ф-маневра.

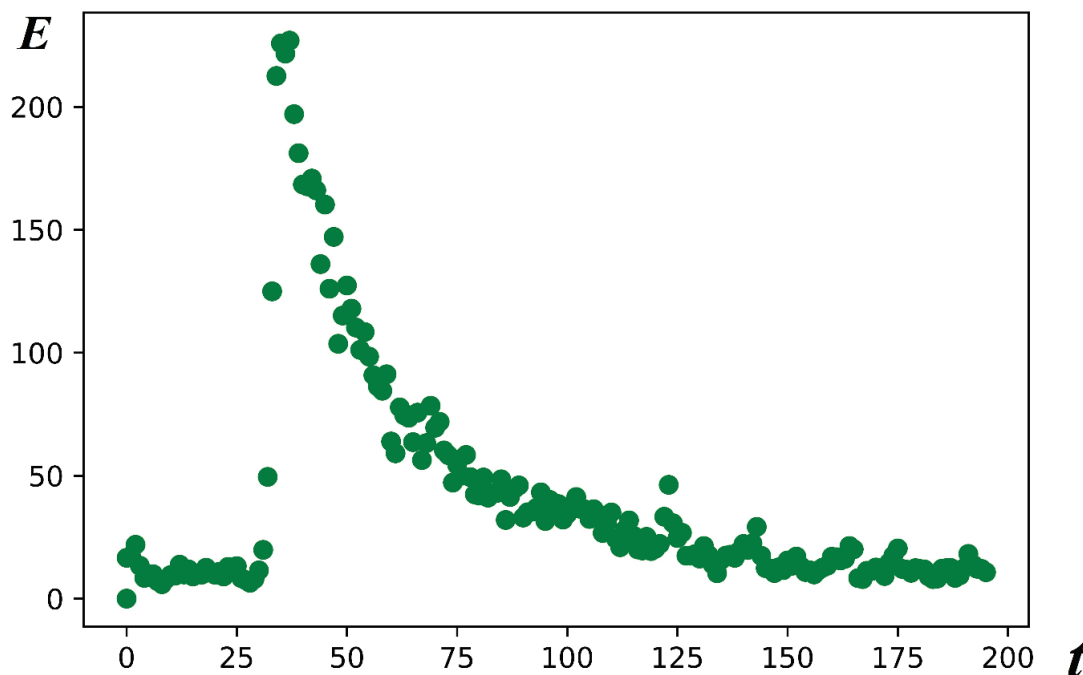


Рисунок 4 – Изменение кинетической энергии движущейся стаи при испуге
По оси t отложены номера кадров

Последовательность кадров с траекторией отслеживаемой особи представлена на рисунке 5. Зеленым цветом выделена траектория движения особи.



Рисунок 5 - Отслеживание траектории движения отдельной особи в процессе Ф-маневра

Программа отслеживания траектории отдельной особи при встрече стаи с хищником приведена в [19].

4. Заключение

Предложен метод измерения количественных характеристик стайного движения рыб, наблюдаемых в процессе натуральных экспериментов, методами компьютерного зрения. На языке Python написаны программы обработки результатов наблюдений, использующие открытую библиотеку компьютерного зрения Open CV. Введено понятие степени испуга стаи, приведены результаты измерения степени испуга стаи при возникновении потока движения в стае леща. Приведены результаты работы программы отслеживания траектории движения отдельной особи стаи при встрече с хищником.

5. Список источников

- [1] *Breder Jr, C. M.* Studies on social groupings in fishes// Bull. Am. Museum Nat. Hist., 1959, 117, 397-481.
- [2] *Радаков Д.В.* Стайность рыб как экологическое явление// Наука, 1972.

- [3] Павлов Д.С., Касумян А.О. Стайное поведение рыб// 2018, ISBN:978-5-907099-12-8.
- [4] Gerlotto F., Gautrai J., Couzi I.D., Theraulaz G. Waves of agitation inside anchovy schools observed with multibeam sonar// *ICES Journal of Marine Science*, 2006, 63 (8).
- [5] Abaid N., Porfiri M. Fish in a ring: spatio-temporal pattern formation in one-dimensional animal groups// *J R Soc Interface*. 2010, 7(51):1441-53. doi: 10.1098/rsif.2010.0175.
- [6] Demsa J., Hemelrijk, C. K., Hildenbrandt, H., & Bajec, I. L. 2015. Simulating predator attacks on schools// *Ecological Modelling*. 304, 22-33.
- [7] Яндекс.Диск. «Испуг стаи леща» [Видеофайл]:
URL: <https://disk.yandex.com/am/i/-TUiKwkWlQH4sA> (дата обращения 07.09.2023).
- [8] Яндекс.Диск. «Взаимодействие леща и щуки» [Видеофайл]:
URL: <https://disk.yandex.com/am/i/NIouaBq6oe7Y8g> (дата обращения 07.09.2023).
- [9] Яндекс.Диск. «Взаимодействие модели хищника и стаи» [Видеофайл]:
URL: <https://disk.yandex.com/am/i/rVJRcCzAfXsQyg> (дата обращения 07.09.2023).
- [10] Poel W., Daniels B. C., et all. 2022. Subcritical escape waves in schooling fish. *Science Advance*. 2022 Jun 24;8(25), doi: 10.1126/sciadv.abm6385.
- [11] Davidson J.D., Couzin I.D., et all. 2021 Collective detection based on visual information in animal groups. // *J. R. Soc. Interface* 18: 20210142.
- [12] Буякас В.И., Дарков А.А., Радаков Д.В., Чекулаев Ю.В. 1978. Математическая модель движения стаи рыб// *Вопросы ихтиологии*. 18, 5, 924-934.
- [13] Буякас В.И. 1981. Математическая модель взаимодействия хищника и стаи// *Доклады Академии Наук (ДАН)*. 261, 1, 252-256.
- [14] Герасимов В.В. 1964. Специфичность подражания у рыб// *Труды Мурманского морского биологического института*, т. 2, вып. 5(9), издательство “Наука”.
- [15] Lope U., Gautrai J., Couzi I.D., Theraulaz G. 2012. From behavioral analyses to models of collective motion in fish. // *Interface Focus*. 2, 693–707.
- [16] Tunström K, Katz Y, et al. 2013. Collective States, Multistability and Transitional Behavior in Schooling Fish. // *PLoS Comput Biol* 9(2). doi:10.1371/journal.pcbi.1002915.
- [17] Terayama K., Hioki H., Sakagami M-A. 2015. Measurement Method for Speed Distribution of Collective Motion with Optical Flow and Its Applications to School of Fish. // *International Journal of Semantic Computing* V. 9, № 2, 143–168. DOI: 10.1142/S1793351X15400012.
- [18] Яндекс.Диск. Программа вычисления степени поляризации стаи [Электронный ресурс]:
URL: <https://disk.yandex.com/am/d/RO0PoAMWuz21fQ> (дата обращения 07.09.2023).
- [19] Яндекс.Диск. Программа обработки и анализа испуга стаи [Электронный ресурс]:
URL: <https://disk.yandex.com/am/d/bs0uMgYjOrAtvQ> (дата обращения 07.09.2023).