

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1   ПЕРВАЯ ГЛАВА .....</b>	<b>7</b>
1.1   Групповые явления в жизни животных .....	7
1.1.1   Методы наблюдения и сбора информации .....	7
1.1.2   Основные результаты наблюдений .....	9
1.2   Компьютерные модели групповой динамики .....	11
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>12</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### flocking behavior SPP

Считается, что впервые задача моделирования поведения «разумно» взаимодействующих объектов была поставлена и удовлетворительно решена К. Рейнольдсом в 1987 году [1]. Его модель носила исключительно прикладной характер, и использовалась для моделирования поведения стай птиц, групп животных или даже космических кораблей при создании анимационных фильмов.

С другой стороны, интерес к поведению роев насекомых, стай птиц или животных можно проследить как минимум на столетие назад, к примеру [2]. Для исследователей того времени, однако, были доступны лишь простейшие методы наблюдения (а именно, визуальные). Не смотря на это, выводы сделанные из наблюдений позволили выделить перемещения взаимодействующих, интеллектуальных объектов в отдельный класс динамики систем «частиц», которые позже станут известны как самодвижущиеся частицы.

Концепция таких частиц была впервые предложена Т. Вичеком и коллегами [3]. Наиболее интересным с физической точки зрения в их модели оказалось наличие явления фазового перехода от разупорядоченного к упорядоченному поведению частиц, крайне похожего на поведение птичьих стай. С тех пор было предложено некоторое количество аналогичных моделей, к примеру [4–9], было проведено множество симуляций с различными параметрами систем (наиболее полную информацию можно найти в одной из последних работ Т. Вичека [10], и в приведенном списке литературы), а также была получен богатый экспериментальный материал касательно поведения стай птиц [], косяков рыб [11], были обнаружены проявления групповой динамики у бактерий [] и даже у неорганических систем при определенных условиях [].

## ГЛАВА 1

### ПЕРВАЯ ГЛАВА

#### 1.1 Групповые явления в жизни животных

Если сто бегунов как один бегут,  
Это можно назвать так и сяк.  
У лошадей это будет табун,  
У рыб это будет косяк.

---

Машина Времени

##### 1.1.1 Методы наблюдения и сбора информации

Главной сложностью в выполнении экспериментального наблюдения за группой животных или, тем более, насекомых, заключается в трудности отслеживания траекторий отдельных особей. Это связано с тем что рассматриваемые колонии или группы

- состоят из множества индивидов, которые
- выглядят очень похоже
- и в основном очень быстро перемещаются

Кроме того, необходимо учитывать крайнее разнообразие живых организмов, за перемещением которых необходимо наблюдать, поскольку, как уже говорилось во введении, изменение поведения при объединении в группы наблюдается для широкого разнообразия типоразмеров животных - начиная от бактерий в пробирке [12, 13] и заканчивая китами на океанских просторах [14]. Несмотря на совсем неочевидные методы решения этих проблем, изучению стадного поведения (flocking behavior) на протяжении многих лет посвящалось значительное внимание. Можно заметить что особенно остро (хоть и не в такой формулировке) этот вопрос стоял в 20-е годы XIX столетия на территории Одесской области, которая подвергалась массовым нашествиям саранчи, однако без компьютерного оборудования или без до-

стижения теории ренормализационных групп достичь каких-либо результатов было невозможно.

Итак, возвращаясь к теме этого пункта, вкратце рассмотрим использующиеся сейчас методы регистрации траекторий индивидов в стаде (стае). Условно, их можно разделить на две неравные группы: в одну отнесем так или иначе методы с использованием визуальных средства (т.е. фото- и видео-камер, в комбинации с различного рода маячками или метками), а в другую сравнительно недавно начавшие применяться методы с использованием GPS-систем. И если применение методов из второй группы не вызывает никаких технических вопросов (кроме, очевидно, закрепления такого рода устройств на исследуемых индивидах), то на методах первой группы следует остановиться подробнее.

Классическим может считаться метод измерения скорости по изображениям частиц [15]. Обычно он применяется для измерения скорости потока жидкости или газа: в исследуемую среду вводится краситель, состоящий из броуновских частиц, и наблюдая за перемещением этого вещества становится возможным определять линии тока в исследуемой среде. Применимо к самодвижущимся частицам метод успешно был применен Czirók и соавторами [12], которые при помощи фазово-контрастной микроскопии исследовали групповое движение молекул.

Когда речь заходит об исследовании стай птиц (стад животных), размер индивидов больше, однако в отличие от бактерий область перемещения слабо ограничена. Тогда движение записывается напрямую на камеру, с тем чтобы в дальнейшем восстановить отдельные траектории. К примеру, в 70-х годах аерофотосъемка использовалась для определения расположения отдельных индивидов во время сбивания африканских буйволов в стадо [16]. Однако использования одной камеры для фиксирования перемещений группы рыб или птиц явно недостаточно, поскольку как-то необходимо учитывать расстояние от камеры до особи. Чтобы обойти эту сложность, например, Бекко и соавторы [17] ограничили движение рыб по высоте используя плоский и широкий аквариум.

Использование нескольких камер для съемки стай с разных точек в дальнейшем требовало трудоемкой обработки результатов для получения трехмерной картины. Получение стереографических изображений с последующей обработкой позволило определить расстояния между соседними индивидуумами в стаях скворцов и чернозобиков [18]. В менее давних исследованиях был обработан метод преобразования фотографий стаи в трехмерные компьютерные модели, что позволило получить мгновенные снимки положения сотен скворцов в стае [19], однако в задаче восстановления траекторий движения все еще остается поле для исследования.

По мере развития технологий, стало возможным создать маячки GPS, достаточно маленькие, чтобы их можно было закрепить на животном или птице не мешая ему. К сожалению, с увеличением количества отслеживаемых индивидов возрастает и стоимость исследования. С другой стороны, такого рода устройства обладают ограниченной точностью в определении местоположения. Несмотря на приведенные выше ограничения, были проведены исследования пар [20, 21], или даже шестерок [22] тренированных голубей.

Помимо вышесказанного, в настоящее время увеличение точности сонаров и разработка определенной технологии применения, в которой океан выступает в роли акустического волновода позволило использовать их для единовременного наблюдения за огромными количествами рыб на больших территориях океанического шельфа. [23]

Подводя итоги, можно отметить увеличение роли компьютера в накоплении и обработке экспериментальных данных. Текущая динамика позволяет надеяться что со временем будут получены данные не меньшей точности, чем получаемые во время численных экспериментов по различным моделям.

### **1.1.2 Основные результаты наблюдений**

Поскольку экспериментальное наблюдение стадных явлений не является темой данной работы, мы не будем останавливаться подробно результа-

тах полевых или лабораторных исследованиях, тем более что всестороннее освещение этого вопроса дано в работе Вичека [10]. Однако для лучшего понимания распространенности в природе стадных явлений будет приведен краткий обзор наиболее характерных, с нашей точки зрения, работ, сгруппированных по исследуемому материалу. Итак, в разные годы объектами исследования становились:

- а) Внутриклеточные соединения [13, 24]
- б) Колонии бактерий [12, 25]
- в) Насекомые [26]
- г) Птицы [2, 18–22]
- д) Рыбы [11, 14, 27]
- е) Млекопитающие, к примеру буйволы [16]

Особняком в этом ряду стоят наблюдения за океаническим планктоном [28], и превышающие по своей численности наблюдения за любым другим типом объектов наблюдения за поведением групп людей, например [29, 30].

Кроме того, в совершенно отдельную группу необходимо выделить лабораторные эксперименты, проводимые с неживыми объектами - нематической жидкостью, колеблющимися металлическими стержнями, нано частицами в жидкости, микро роботами и тому подобным. [31–33]

Теперь, приведем основные результаты, полученные в ходе наблюдений. Для начала, необходимо четко разделять работы в которых исследования велись на плоскости (все кроме указанных далее), и в которых наблюдения велись в трехмерном пространстве [14, 18, 19, 34]. Хотя, как выяснилось, для рыб такое разделение не вполне необходимо. Но обо всем по порядку.

Главный вывод, который в общем-то и не нуждается в подтверждении - это то, что существует отдельный класс перемещений группы индивидов как целого, и при этом перемещения отдельных индивидов оказываются упорядочены. То есть, при определенных условиях (чаще всего рассматривается различная плотность на единицу площади, или обеспеченность ресурсами в широком смысле слова) происходит спонтанное нарушение симметрии, и хаотическое движение сменяется упорядоченным. Как уже говорилось, это наблюдается на всех масштабах природы, и более того -

совершенно не обязательно при этом прямое (визуальное или тактильное) взаимодействие между особями, и бывает достаточно опосредствованного взаимодействия через среду обитания [10, с. 119]. Следующее наблюдение на которое указывают многие авторы - при нарушении симметрии возникает и дальний порядок связи, к примеру, рыбы могут изменять общее направление движения практически мгновенно [11], а птицы так-же быстро принимать решения о посадке. [18, 35].

## 1.2 Компьютерные модели групповой динамики

Позабыты хлопоты, остановлен бег -  
Вкалывают роботы, а не человек.

---

Ю. Энтин - “Вкалывают роботы”

Как было сказано в разделе 1.1, основной сложностью в исследовании процессов, происходящих в рое является невозможность уследить сразу за всеми представителями. В первую очередь проблема заключается в высокой технической сложности гарантированно отличить одну особь от другой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reynolds C. W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model // *SIGGRAPH Comput. Graph.* 1987. Vol. 21, no. 4. P. 25–34. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/37402.37406>.
2. Selous E. Thought-transference (or What?) in Birds. R.R Smith, 1931. LCCN: 32001018.
3. Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E. et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles // *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 75, no. 6. P. 1226. URL: [http://prl.aps.org/abstract/PRL/v75/i6/p1226\\_1](http://prl.aps.org/abstract/PRL/v75/i6/p1226_1).
4. Grégoire G., Chaté H. Onset of collective and cohesive motion // *Physical review letters*. 2004. Vol. 92, no. 2. P. 025702. URL: <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v92/i2/e025702>.
5. Schubring D., Ohmann P. R. Density-independent model of self-propelled particles // *Phys. Rev. E*. 2013. Vol. 88, no. 3. P. 032108. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.88.032108>.
6. Kümmel F., ten Hagen B., Wittkowski R. et al. Circular Motion of Asymmetric Self-Propelling Particles // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110, no. 19. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.198302>.
7. Huepe C., Aldana M. New tools for characterizing swarming systems: A comparison of minimal models // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2008. Vol. 387, no. 12. P. 2809–2822. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037843710800109X>.
8. Chaté H., Ginelli F., Grégoire G. et al. Modeling collective motion: variations on the Vicsek model // *The European Physical Journal B*. 2008. Vol. 64, no. 3-4. P. 451–456. URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1140/epjb/e2008-00275-9>.



9. Tu Y. Phases and phase transitions in flocking systems // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2000. Vol. 281, no. 1–4. P. 30 – 40. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437100000170>.
10. Vicsek T., Zafeiris A. Collective motion // *Physics Reports*. 2012. Vol. 517, no. 3-4. P. 71–140. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157312000968>.
11. Cambuí D. S., Rosas A. Density induced transition in a school of fish // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391, no. 15. P. 3908–3914. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437112002282>.
12. Csahók Z., Czirók A. Hydrodynamics of bacterial motion // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1997. Vol. 243, no. 3–4. P. 304 – 318. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437197002835>.
13. Keller E. F., Segel L. A. Model for chemotaxis // *Journal of Theoretical Biology*. 1971. Vol. 30, no. 2. P. 225–234. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022519371900506>.
14. Makris N. C., Ratilal P., Jagannathan S. et al. Critical Population Density Triggers Rapid Formation of Vast Oceanic Fish Shoals // *Science*. 2009. Vol. 323, no. 5922. P. 1734–1737. URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1169441>.
15. Raffel M. *Particle image velocimetry a practical guide*. Heidelberg; New York: Springer, 2007. ISBN: 9783540723080 3540723080 9783540723073 3540723072. URL: <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=337572>.
16. Sinclair A. R. E. The African buffalo: a study of resource limitation of populations. Wildlife behavior and ecology. Chicago: University of Chicago Press, 1977. ISBN: 0226760308.
17. Becco C., Vandewalle N., Delcourt J., Poncin P. Experimental evidences of a structural and dynamical transition in fish school // *Physica A:*

- Statistical Mechanics and its Applications*. 2006. Vol. 367. P. 487–493. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437105012689>.
18. Major P. F., Dill L. M. The three-dimensional structure of airborne bird flocks // *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 1978. Vol. 4, no. 2. P. 111–122. URL: <http://link.springer.com/10.1007/BF00354974>.
  19. Ballerini M., Cabibbo N., Candelier R. et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105, no. 4. P. 1232–1237. URL: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0711437105>.
  20. Biro D., Sumpter D. J. T., Meade J., Guilford T. From compromise to leadership in pigeon homing // *Current biology: CB*. 2006. Vol. 16, no. 21. P. 2123–2128. PMID: 17084696.
  21. Nagy M., Ákos Z., Biro D., Vicsek T. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks // *Nature*. 2010. Vol. 464, no. 7290. P. 890–893. URL: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature08891>.
  22. Dell’Ariccia G., Dell’Omo G., Wolfer D. P., Lipp H. Flock flying improves pigeons’ homing: GPS track analysis of individual flyers versus small groups // *Animal Behaviour*. 2008. Vol. 76, no. 4. P. 1165–1172. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347208002595>.
  23. Makris N. C. Fish Population and Behavior Revealed by Instantaneous Continental Shelf-Scale Imaging // *Science*. 2006. Vol. 311, no. 5761. P. 660–663. URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1121756>.
  24. Chowdhury D. Collective effects in intra-cellular molecular motor transport: Coordination, cooperation and competition // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2006. Vol. 372, no. 1. P. 84–95. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437106005851>.
  25. Czirók A., Schlett K., Madarász E., Vicsek T. Exponential Distribution of

- Locomotion Activity in Cell Cultures // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 81, no. 14. P. 3038–3041. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.81.3038>.
26. Buhl J. From Disorder to Order in Marching Locusts // *Science*. 2006. Vol. 312, no. 5778. P. 1402–1406. URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1125142>.
  27. *Individual decisions, traffic rules, and emergent pattern in schooling fish* // *Animal Groups in Three Dimensions* / Ed. by J. K. Parrish, W. M. Hamner. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. P. 126–142. URL: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511601156A066>.
  28. Seuront L. Small-scale turbulence in the plankton: low-order deterministic chaos or high-order stochasticity? // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2004. Vol. 341. P. 495–525. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437104005527>.
  29. Parisi D. R., Gilman M., Moldovan H. A modification of the Social Force Model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2009. Vol. 388, no. 17. P. 3600–3608. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437109004075>.
  30. Moussaid M., Helbing D., Theraulaz G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. Vol. 108, no. 17. P. 6884–6888. URL: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1016507108>.
  31. Schaller V., Weber C., Semmrich C. et al. Polar patterns of driven filaments // *Nature*. 2010. Vol. 467, no. 7311. P. 73–77. URL: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature09312>.
  32. Turgut A. E., Çelikkanat H., Gökçe F., Şahin E. Self-organized flocking in mobile robot swarms // *Swarm Intelligence*. 2008. Vol. 2, no. 2-4. P. 97–120. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11721-008-0016-2>.
  33. Blair D., Neicu T., Kudrolli A. Vortices in vibrated granular rods // *Physical Review E*. 2003. Vol. 67, no. 3. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.67.036101>.

10.1103/PhysRevE.67.031303.

34. Cullen J., Shaw E., Baldwin H. A. Methods for measuring the three-dimensional structure of fish schools // *Animal Behaviour*. 1965. Vol. 13, no. 4. P. 534–543. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000334726590117X>.
35. Lukeman R., Li Y., Edelstein-Keshet L. Inferring individual rules from collective behavior // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107, no. 28. P. 12576–12580. URL: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1001763107>.