

ФИЗИКА И СОЦИОФИЗИКА.

Ч. 1. Физические основы социальных явлений.

Влияние солнечной активности на процессы в обществе.

Движение в системе «живых частиц»

Ю.Л. СЛОВОХОТОВ

Представлен систематический обзор зарубежных и российских работ по социофизике: новому научному направлению, изучающему социальные явления методами теоретической и экспериментальной физики. В первой части кратко рассмотрены основные области пересечения физики с общественными дисциплинами и некоторые проблемы социальной динамики, вошедшие в круг ее интересов: влияние климата и солнечной активности на исторические события, моделирование автомобильного трафика и других систем «живых частиц», дискретные состояния и спонтанные переходы в таких системах. В следующих частях будут представлены структура и динамика сетей социальных взаимодействий, физическое описание экономики (эконофизика), формальные модели социологии, культурологии, политологии, лингвистики и математической истории; обсуждены академические и прикладные аспекты социофизических исследований.

Ключевые слова: междисциплинарные физические исследования, моделирование социальных систем, социофизика.

ВВЕДЕНИЕ

Общей тенденцией развития знания в XX веке, перешедшей и в новое столетие, является все более глубокое проникновение идей и методов физики как в естественные, так и в традиционно гуманитарные дисциплины. Начиная с 1950-х гг., методы математического, а затем и физического моделирования активно используются в таких науках, как экономика, демография, социология, лингвистика. Помимо академических задач, эти же методы широко применяются в прикладных областях планирования и управления. В последние десятилетия физические и квазифизические аргументы проникают в историю и политологию. Во всех перечисленных дисциплинах усиливается стремление к объективному и, желательно, количественному описанию самых разнообразных социальных явлений.

В истории естествознания зафиксировано постепенное включение в физику ряда смежных с ней

формализованных областей (материаловедения, кристаллографии, физической химии, классических инженерных дисциплин). В настоящее время та же тенденция затрагивает математизированные разделы наук об обществе и «социальную инженерию» в ее современном понимании (формальные модели здравоохранения, снабжения, городского хозяйства и др.). В этом смысле физика служит постоянно расширяющимся и обновляемым фундаментом всех академических и прикладных направлений, где используют объективные измерения и количественные данные.

Применимость моделей теоретической физики сначала к биологическим, а затем и к социальным процессам впервые констатировала *синергетика* — скорее течение научной мысли, чем определенная академическая дисциплина [1–3]. С середины 1990-х гг. работы физиков, вначале посвященные анализу биржи, а затем охватившие более широкий круг явлений в экономике, объединяются под общим названием *эконофизика*. Развитие математических методов в социологии, политологии, те-



ории транспортных потоков и других разделах социальной динамики также постепенно переводит эти темы исследований из гуманитарных и инженерных наук в междисциплинарные приложения физики. В литературе последних лет за всеми такими направлениями закрепляется термин *социофизика*, т. е. «физика общества». Главная задача этой новой области естествознания заключается в поиске объективных, поддающихся количественному описанию закономерностей, которыми направляются социальные процессы.

Работы социофизического содержания публикуются в ряде физических и специализированных журналов — таких как «Physica A», «Physical Review E», «European Physical Journal», «Complexity», «Advances in Complex Systems», «Quantitative Finance» и др. По данной тематике издана монография [4], ей посвящены главы в современном учебнике «Физика стохастических процессов» [5], большая серия статей в 11-томной энциклопедии сложных систем [6], ряд недавно вышедших книг [7—9] и обзоров [10—14], интернет-ресурсы [15, 16]. По самым приблизительным оценкам, число публикаций, посвященных различным аспектам «физики общества», в последнее десятилетие достигло 3—4 тыс. и продолжает быстро расти.

Тем не менее, новые интересы физики сложных систем вряд ли можно считать закономерным этапом свободного развития естествознания, характерного для XX века. В нынешних условиях зарождению социофизики сопутствует стагнация целого ряда академических дисциплин — таких как «чистая» математика, химия, неоклассическая экономическая теория и др., включая большинство направлений собственно физики. Почти не увеличивая, можно утверждать, что фронтальный прогресс науки, происходивший в течение трех последних столетий, к настоящему времени сменился «точечным» развитием ее отдельных прикладных направлений, обслуживающих потребности высокоразвитых стран. В этом неприятном следствии глобализации проявляются главные приметы двух последних десятилетий: замедление технического и социального развития человечества, явный упадок культуры и перераспределение мировых ресурсов в пользу государств «золотого миллиарда». На фоне такого «конца истории» быстрая экспансия физики в общественные науки, наблюдаемая именно в этих государствах, не выглядит самоочевидной и требует объективного анализа.

Расхожее объяснение такой динамики — переход армии физиков и математиков, невостребованных после окончания «холодной войны», в другие области знания — весьма идеологизировано и отражает лишь часть объективной ситуации. Оно плохо согласуется с разработкой новых систем во-

оружий, сохранением острой конкуренции в производстве товаров для богатых (комфортного жилья, автомобилей, электроники), ростом строительства и транспорта, опережающим развитием компьютерных, телекоммуникационных и биомедицинских дисциплин. И хотя во многих направлениях «устойчивого развития» доминирующих благополучных государств лишь реализуются технологические идеи XX века (такие как, например, Интернет), спрос на науку в них остается высоким. В прессе, включая научную, также практически не упоминается проблема конверсии другого массового наследия «холодной войны»: армии идеологов и пропагандистов, которые в основном продолжают управлять общественным сознанием (в том числе через такой развитый сегмент постиндустриального общества, как рекламу). Наконец, в свете прежних представлений о связи науки с жизненными потребностями человечества, поворот физики к анализу социальных систем вместо, например, ускоренной разработки управляемого термоядерного синтеза или создания внятной теории высокотемпературной сверхпроводимости выглядит не вполне логичным. Парадоксальный дефицит свежих идей в новых междисциплинарных приложениях физики (см. далее) заставляет подозревать, что современная физическая теория еще не вполне готова работать с такой сложной системой, как социум. Поэтому само появление этих работ в нынешних условиях требует анализа и пояснений.

В настоящем обзоре мы попытаемся установить явления и объекты, изучаемые социофизикой, и определить эту дисциплину более точно, чем совокупность статей по общественным наукам, публикуемых в физических журналах. Мы обозначим основные области пересечения физики с социальными процессами, перечислим существующие (и, возможно, возникающие) направления социофизики, кратко упомянем ее академические и прикладные задачи — так, как они представляются автору. Хотя в XX в. многие исследователи предлагали описывать общество как физическую систему, мы рассмотрим прежде всего текущую литературу (монографии, журнальные статьи и интернет-публикации последнего десятилетия) и лишь выборочно станем цитировать более ранние работы.

Из-за большого объема, отражающего обилие и разнообразие социофизической литературы, наш обзор разбит на три части. В первой части, публикуемой в этом номере журнала, обсуждаются общие механизмы проявления физических факторов в социуме, кратко рассмотрено влияние солнечной активности (т. е. *внешних* физических воздействий) на социальную динамику и анализируются аналоги фазовых состояний, порожденные *внутренними* взаимодействиями в системе движущихся «живых частиц», включая автомобильный и пеше-

ходный трафик. Во второй части будут рассмотрены работы по количественному представлению системы взаимодействующих агентов сетевой структурой и теоретическому описанию явлений в сетях социальных взаимодействий, а также физические и квазифизические модели процессов в экономике («эконофизика»). Третья часть обзора посвящена применению методов физики сложных систем в задачах социологии и политологии; в ней также будут кратко перечислены некоторые новые приложения физических идей в лингвистике, демографии и математической истории.

1. СОЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ФИЗИКА

Будем называть *социальной системой* совокупность большого числа ($N \gg 1$) взаимодействующих индивидов, которые находятся в некоторой внешней среде и подвержены ее воздействиям. Природа индивидов, в литературе часто называемых *агентами*¹, в разных социальных системах может существенно различаться: это люди в различных аспектах их деятельности, группы людей, выступающие как единое целое (например, экономические субъекты), участники дорожного движения, общественные животные и другие «живые частицы». Различные стороны их взаимодействия с внешней средой и друг с другом приводят к большому разнообразию типов социальных систем: экологических, политических, экономических и др. Для систем каждого типа в рамках соответствующей дисциплины обычно учитывают лишь определенные виды взаимодействий между агентами и агентов со средой (обмен в экономике, покупка и продажа акций на бирже и т. д.). Прочие возможные взаимодействия агентов не рассматриваются или включаются во внешние воздействия среды. *Социофизика* анализирует структуру и динамику всех существующих разновидностей социальных систем, используя идеи и методы, заимствованные из теоретической и экспериментальной физики. Методы моделирования социальных явлений, примыкающие к физическим (феноменологические, технические, информационные и т. д.), близки к этой дисциплине и вливаются в нее по мере роста их строгости и объективности, тем самым модифицируя и саму теорию общества.

Таким образом, социальная система — это широкое и не вполне определенное понятие, в рав-

ной мере приложимое к совокупности государств некоторого региона в историческом времени, электорату в определенном городе, населению муравейника или колонии бактерий. Количество индивидов в социальных системах лежит в интервале от десятков и сотен (насекомые в улье, игроки на бирже, трафик на участке шоссе) до численности современного населения Земли ($\sim 7 \cdot 10^9$ чел.) и максимальной емкости «Всемирной паутины» ($10^{11} - 10^{12}$ узлов). Характеристическое время системы (т. е. среднее время, за которое ее состояние значительно изменяется) варьируется от секунд и минут (биржа) до десятков и сотен лет (смена поколений и приоритетов в человеческом обществе). Природа взаимодействий также не вполне поддается формализации; именно поэтому в каждом типе социальных систем выделяется определенный идеализированный вид деятельности агентов. Поскольку широкому определению социальных систем, в частности, удовлетворяют группы людей, изучаемые социологией, сам термин может вызвать некоторую путаницу. В литературе используются и другие названия: системы «живых» (living), «моторных» (driven) «самодвижущихся» (self-propelled) либо (реже) «мотивированных» частиц [14]. Во всех случаях имеется в виду совокупность большого числа взаимосвязанных агентов с достаточно сложным индивидуальным поведением.

В заданный момент времени агенты могут иметь (но могут и не иметь) некоторую схему своей будущей деятельности: *стратегию*. Это сближает социофизику с многочисленными теоретико-игровыми моделями экономики и политологии [11, 17], хотя ее теории лучше всего разработаны для систем агентов с простейшими стратегиями (такими как быстрое и безопасное движение для водителей на шоссе). Довольно запутанный общий вопрос о пределах измеримости состояния социальной системы и воспроизводимости результатов измерений в литературе по социофизике обсуждается редко [18]. Обычно его обходят, выбирая в качестве параметров системы такие величины, которые действительно поддаются измерению с некоторой объективно оцениваемой погрешностью (численность населения, стоимость акций, средний доход и т. д.).

Несмотря на довольно расплывчатое определение социальных систем, они все чаще рассматриваются как физические объекты, эволюцию которых во времени можно регистрировать, предсказывать и даже с некоторым успехом направлять. Эта эмпирическая точка зрения основана на опыте регулирования (хотя бы некоторых) параметров некризисного социума и на структурном подобии систем, сильно различающихся по природе составляющих их агентов. Так, например, явные аналогии в основах структуры человеческого общества

¹ Одним из средств математического описания социума служат *агентные модели*, в которых совокупность взаимосвязанных индивидуумов отражается набором *агентов*, действующих по заданным правилам. Поскольку темой обзора является именно формализация социальных явлений, мы будем употреблять термины «агент» и «индивидуум» (либо «индивид») как синонимы.



(разделение видов деятельности, иерархия, обмен, направленный перенос информации) и «социума» муравьев или термитов, не имеющих головного мозга [19], заставляет искать причины структурирования за пределами сознания индивидов. Однотипный характер перемещения бактерий в колонии на чашке Петри и людей в толпе на площади [20] также указывает на внеразумную и даже внебиологическую основу динамики человеческих масс. А поскольку у очень многих «неживых» многочастичных систем со сложной фазовой диаграммой нет точного (и тем более аналитического) описания межчастичных взаимодействий, само наличие взаимосвязей между агентами считается достаточным для физической трактовки социальных явлений. При этом обычно полагают, что действие окружения и среды на «живую частицу» содержит случайную составляющую, которая еще увеличивается благодаря «свободе воли» агента, и применяют к анализу социальных систем методы физики стохастических процессов [5].

Отметим, что статистические данные о социальных системах используются во многих «классических» общественных науках, социофизика же обычно анализирует их на основе идей и понятий статистической физики. Однако с физической точки зрения социальные системы не являются *макроскопическими* совокупностями очень большого числа частиц ($N \sim 10^{20} - 10^{25}$), к которым относится большинство приложений статистической физики к неживой природе. Их аналогами скорее являются *мезоскопические* ($N \sim 10^4 - 10^{10}$) и даже *микроскопические* системы (от десятков и сотен до нескольких тысяч «неживых» частиц), имеющие целый ряд качественных отличий [21]. Применимость к подобным системам таких «предельных» ($N \rightarrow \infty$) физических понятий, как фазовые состояния и фазовые переходы, энтропия, температура и т. д., не всегда очевидна, но в литературе по «физике общества» используется именно эта терминология.

В широком понимании «физики общества» к ней должны относиться все примеры существенного влияния физических факторов (исключая неизменные влияния вроде земного притяжения или наличия атмосферы) на состояния социальных, т. е. «живых» мультиагентных систем. С этой точки зрения в основе новой науки лежат следующие существенно разные обстоятельства (факторы).

- Диссипативный характер системы земной биосферы (включающей в себя подсистему «человечество на Земле в историческом времени» и все другие, более частные примеры социальных систем), которым определяется критическая зависимость любых социальных процессов от потока внешней энергии.

- Упомянутый ранее «многочастичный» (мультиагентный) характер социальных систем, предположительно позволяющий анализировать их методами статистической физики.
- Объективный характер процессов, протекающих в человеческом сознании, их материальная обусловленность явлениями окружающего мира.

В области общественных наук первому из перечисленных факторов отвечают работы по физической климатологии (еще одной из немногих «точек роста» нынешнего естествознания), реконструкции климата в историческом прошлом и корреляциям климатических изменений с историческими событиями. Применимость методов статистической физики к анализу социальных процессов — второй фактор — можно считать основным постулатом социофизики. На третьем факторе (по существу фиксирующем полную победу научного материализма) основаны как многочисленные схемы когнитивного планирования и информационного управления [22—24], так и квазифизические модели в политологии, культурологии и лингвистике.

Далее мы кратко рассмотрим главные направления социофизики (кроме преимущественно прикладных когнитивных технологий и «классического» моделирования в военных науках [25]). Мы попытаемся показать, как в соответствующих социальных системах проявляются общие законы физики и в чем состоит специфика таких систем. Многообразии социальных явлений, вызванных физическими (т. е. объективными, моделируемыми и предсказуемыми) факторами, и разная степень их формализации в научной литературе делают наше изложение неизбежно фрагментарным, а границу между «физическими» и иными формальными способами описания общества весьма нечеткой. Этот недостаток отражает не только ограниченную информированность автора, но и некоторую неопределенность всей рассматриваемой нами бурно растущей области знаний.

2. СОЛНЦЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

2.1. Медленные флуктуации солнечной постоянной в историческом времени

Физические и физико-химические компоненты погоды и климата обсуждаются в рамках геофизических теорий с привлечением данных космических наблюдений и компьютерного моделирования [26]. Измерения, выполненные космическими аппаратами начиная с 1980-х гг., показали корреляцию квазипериодической магнитной активности Солнца (хорошо известные циклы продолжительностью от 8—9 до 16—17 лет при средней длительности около 11 лет) с количеством его лучистой энергии, падающей на единицу площади вблизи

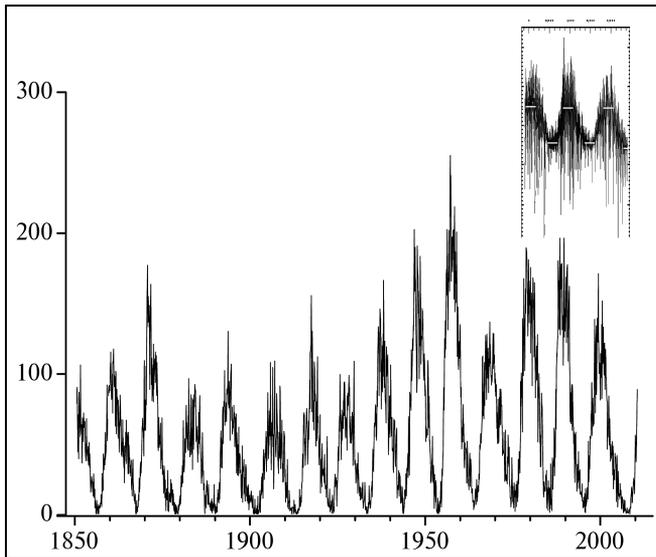


Рис. 1. Циклы солнечной активности в 1850—2010 гг. по среднемесячному количеству пятен. Адаптировано из <http://solar-science.msfc.nasa.gov>. На врезке — данные прямых измерений солнечной постоянной космическими аппаратами [27]

земной орбиты — «солнечной постоянной» S_0 , которая возрастает в максимуме ~ 11 -летнего солнечного цикла на $\sim 0,1\%$ по отношению к минимуму [27] (рис. 1). Результаты систематических наблюдений за пятнообразованием на Солнце, отражающим его магнитную активность (более 300 лет), и мировые метеорологические данные (за последние 150 лет) указывают на еще более значительные изменения «солнечной постоянной» в масштабах столетий, предположительно коррелирующие с ходом среднегодовой температуры в различных регионах Земли [28].

Реконструкция солнечной активности за всю историю человечества по содержанию космогенных изотопов (^{14}C в годичных кольцах деревьев, ^{10}Be в ледниках Антарктиды и Гренландии) выявила флуктуации излучаемой солнечной энергии с интервалом в 1—2 столетия между максимумом и соседним минимумом. В согласии с письменными историческими источниками, эти медленные в масштабе смены поколений изменения «солнечной постоянной» в пределах $0,2\text{--}0,3\%$ от ее среднего значения ($\sim 1360 \text{ Вт/м}^2$) могли приводить к варьированию среднегодовой температуры Земли с амплитудой $\sim 1^\circ\text{C}$ и значительному перераспределению годовой температуры и влажности в разных регионах планеты [29, 30]. Теплым периодам с наибольшей солнечной активностью в I—II вв. (*римский максимум*) и XII—XIII вв. н. э. (*средневековый максимум*) соответствовали рост населения и быстрое развитие локальных цивилизаций в ряде ре-

гионов планеты. Периоды глобального похолодания, предшествовавшие минимумам солнечной активности в VI—VII вв. (*средневековый минимум*), XV—XVI вв. (*минимум Шперера*) и XVII веке н. э. (*минимум Маундера*, совпадающий с «малым ледниковым периодом» в Европе) сопровождалась голодом, эпидемиями, массовой миграцией людей и длительными войнами во всех регионах, оставивших письменные источники. Менее продолжительный минимум *Дальтона* (1780—1820 гг.) с понижением среднегодовой температуры на $\sim 0,5^\circ\text{C}$ приходится на период Великой французской революции и наполеоновских войн в Европе (рис. 2).

Масштаб климатических изменений в историческом прошлом служит предметом острой и очень политизированной дискуссии [27, 29], фактическим вопросом в которой являются антропогенные либо внешние геофизические причины современного глобального потепления. Тем не менее, многие историки считают изменения климата и особенно сопутствовавшие им флуктуации погоды (аномально морозные зимы и летние заморозки, засухи, наводнения и т. д.) одним из ключевых факторов, определявших уровень жизни сельскохозяйственных цивилизаций — и соответственно сильно проявлявшихся в исторических событиях вплоть до промышленной революции Нового времени. Учет погодных и климатических условий в конкретном историко-географическом контексте [32] вместе с привлечением других количественных данных (площадь государств, численность населения, насыщенность культурного слоя и др.) и

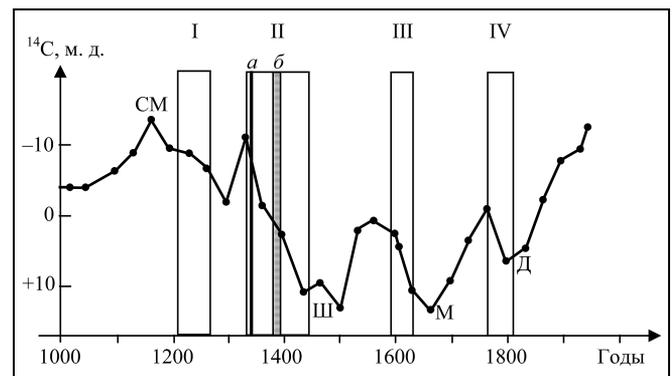


Рис. 2. Доля изотопа ^{14}C в годичных кольцах деревьев, $\times 10^9$ (снижается при росте солнечной активности; Д, М и Ш — соответственно минимумы Дальтона, Маундера и Шперера, СМ — средневековый максимум, см. текст) [31] и **крупные политические события во 2-м тысячелетии н.э.** Полосы: I — монгольские завоевания, II — Столетняя война в Европе, ослабление и падение Византии; а — эпидемии чумы (1347—1350 гг.) и б — крестьянские войны (1390-е гг.) в Европе, III — Смутное время на Руси, Тридцатилетняя война в Европе, революция в Англии, падение династии Мин в Китае; IV — война за независимость США, Великая французская революция, наполеоновские войны



применением компьютерного моделирования [33] являются важными особенностями современной исторической науки.

2.2. Активность Солнца и «общественная температура»

Изменения погоды на Земле, по-видимому, не коррелируют с 11-летними солнечными циклами благодаря большой тепловой инерции водно-воздушно-континентальной оболочки планеты и сложности протекающих в ней физико-химических процессов [26]. Однако максимумы пятнообразования на Солнце в 1850—2010 гг., показанные на рис. 1, совпадают по времени с целым рядом крупных событий европейской и мировой истории (франко-прусская война 1870—1871 гг., 1-я русская революция 1905—1907 гг., мировой экономический кризис 1929 г., начало Второй мировой войны и «холодной войны», крушение колониальных империй, разрушение СССР). По данным историометрических таблиц, составленных и опубликованных в 1924 г. А.Л. Чижевским [34], на трехлетние промежутки максимальной активности в солнечных циклах приходится около 60 % всех зафиксированных исторических событий за 500-летний период (при всем отмеченном в работе [34] несовершенстве такой характеристики). В 1930-е гг. Чижевский и его зарубежные единомышленники нашли причину повышенной массовой возбудимости в максимумах солнечных циклов, установив их корреляцию с подъемом заболеваемости и всплесками психических расстройств (рис. 3). Циклы политической деятельности, коррелирующие с солнечными, были зафиксированы в истории ряда стран [36, 37].

Количественной мерой возбудимости человеческих масс может служить *общественная температура*: интенсивность «стохастической» деятельности людей на малых отрезках исторического времени. Изменения такого параметра за 2—3 последних столетия в ряде государств поддаются полуколичественной оценке — в частности, по статистике правонарушений. Сильное влияние на уровень «общественной температуры», помимо магнитных бурь и других геофизических явлений, оказывают локальные социально-экономические факторы в сообществе людей [34, 35]. В свою очередь, повышение «температуры» размывает структуру общественной системы и может приводить к кризису: быстрому (в историческом масштабе времени) изменению этой структуры. Циклы солнечной активности таким образом вносят квазипериодическую модуляцию в социально-исторические процессы. Рассмотренные выше вековые флуктуации потока солнечной энергии в масштабах смены поколений приводят к «адиабатическим», т. е. медленным изменениям внешних условий (пого-

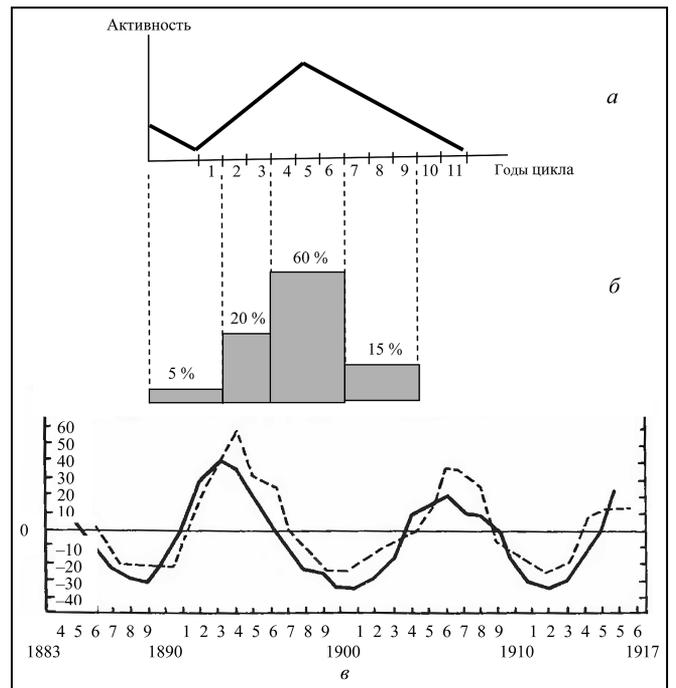


Рис. 3. Влияние солнечной активности на «общественную температуру»: а — ход активности Солнца в 11-летнем цикле, б — плотность исторических событий в фазах солнечного цикла [34], в — пятнообразование на Солнце (сплошная кривая) и колебания заболеваемости возвратным тифом в Москве с 1883 по 1918 г. (штриховая линия, график сдвинут на –1 год) [35]

ды и климата), которые сопровождаются более быстрой перестройкой (релаксацией) социальных систем.

2.3. Другие периодические явления

Обычные суточные, недельные и годовые жизненные циклы также модулируют экономическую и общественную динамику, являясь при этом, в отличие от солнечных циклов, строго периодическими. В противоположность суточным и годовым циклам, недельные циклы имеют не астрономическое, а эндогенное происхождение. Причины появления «внутренних» циклов жизни (в разное время у разных народов продолжавшихся от 3 до 10 дней) и перехода человечества к семидневной неделе [38] в рамках социофизики еще не рассматривались. Суточные и годовые циклы обычно относят к прикладной области (колебания потребления, транспортных и пешеходных потоков и др.), их анализируют в эконометрике и в инженерных дисциплинах [39, 40]. Физики уделяют незаслуженно мало внимания этим самым регулярным и хорошо документированным циклическим процессам в социуме.

Указанные регулярные циклы выявляются на *периодограммах*, получаемых Фурье-преобразова-

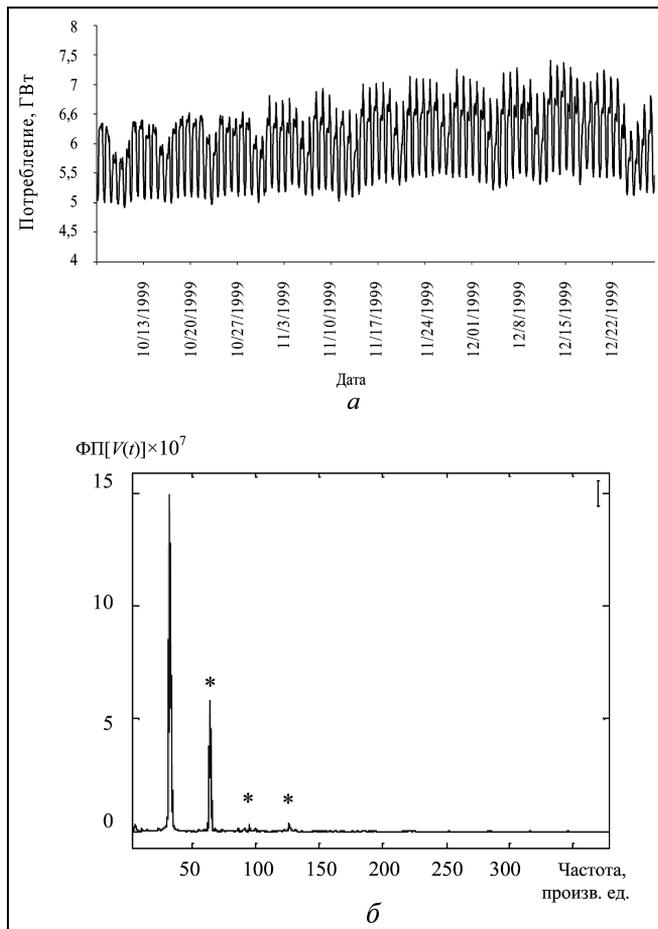


Рис. 4. Суточные и недельные циклы потребления электроэнергии в штате Альберта (Канада) в октябре—декабре 1999 г. [39] (а). Фурье-преобразование (ФП) динамики потребления воды $V(t)$ в Испании (октябрь—ноябрь 1996 г.); звездочкой отмечены гармоники $n/\text{сут}$, $n = 2, 3, 4$ [40] (б)

нием рядов данных по динамике энергопотребления, потребления воды и других характеристик городского снабжения (рис. 4, а). Присутствие на периодограммах высших гармоник, кратных основной частоте, не обязательно отражает «скрытую» периодичность в общественной и экономической жизни: такие гармоники возникают и из-за несинусоидального характера периодической зависимости (рис. 4, б). (При обсуждении многочисленных «длинных» периодов флуктуаций солнечной постоянной [28], тоже полученных гармоническим анализом, это обстоятельство почему-то не упоминается). Между тем детальный анализ формы вынужденных колебаний энергопотребления, сопоставленный с ходом периодической вынуждающей силы (дневной температуры, освещенности и др.), способен выявить обобщенные квазимеханические параметры — аналоги массы, плотности, трения — для соответствующей социальной систе-

мы: города, региона или всей национальной экономики. Данный круг академических и прикладных задач также очень мало обсуждается в современной социофизической литературе.

Признание медленных флуктуаций климата и (в меньшем числе работ) 11-летних солнечных циклов существенными экзогенными факторами, влияющими на ход человеческой истории (в англоязычной литературе «forcings»), фактически означает отказ от замкнутого построения общественных наук, при котором все «гуманитарные» явления обязаны быть следствием только «гуманитарных» причин и могут обсуждаться лишь в соответствующих терминах. Развитием данного принципа мог бы стать анализ автоколебаний и автоволн в социальных системах, поскольку само существование этих систем в конечном счете определяется потоком солнечной энергии. (Подобные процессы в «живых» экосистемах давно исследует биофизика [41]). В этом случае автоколебательными могут оказаться, по крайней мере, некоторые циклические явления в экономике, а исторические периоды экспансии народов и государств приобретают вид автоволн, распространяющихся в сложном социально-географическом ландшафте. Хотя в нынешней социофизической литературе такая точка зрения почти не представлена (немногие исключения будут рассмотрены в последней части обзора), ее реализация может сделать моделирование социальных процессов более последовательным и строгим.

Перечисленные примеры геофизического воздействия на процессы в человеческом обществе, ввиду большой сложности этих процессов, пока не имеют формализованного описания. В настоящее время их исследуют на эмпирическом уровне и обычно не включают в круг интересов социофизики, где в основном рассматриваются системы, поддающиеся расчетному моделированию. Однако успешные приложения физического аппарата к некоторым частным разновидностям социальных систем, которые будут рассмотрены далее, свидетельствует в пользу фундаментальной связи явлений истории и экономики с внешними физическими факторами.

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЦИОФИЗИКИ

Физические модели социума примыкают к обширной и неоднородной области математических моделей экономики, эволюционной биологии, экологии, теории управления и многих других дисциплин. От обычных имитационных моделей их отличают более фундаментальное обоснование и вытеснение «стилизованных фактов» объективно измеряемыми (т. е. экспериментальными) данными. Теоретические положения социофизики, как



правило, заимствованы из уже развитых разделов физики «неживых» систем (гидродинамики, физики магнитных явлений, теории фазовых переходов, физико-химической кинетики и др.). Учитывая дополнительную сложность поведения «живых частиц», такое описание с неизбежностью оказывается фрагментарным и ограничено немногими частными задачами, которые удается формализовать.

Наиболее распространенные в литературе примеры физического моделирования в основном касаются таких социальных систем, динамику которых удается свести к варьированию одной (дискретной или непрерывной) переменной величины — в исключительном случае нескольких таких переменных. Поскольку, в отличие от «неживых» многочастичных систем, индивидуальное поведение агента в принципе не поддается точному описанию, главным инструментом теории служат стохастические модели [5, 10, 14]. В литературе двух последних десятилетий можно выделить следующие социофизические направления:

- моделирование механического движения «живых частиц» (автомобильный трафик, рыбы и птицы, пешеходное движение);
- изучение, моделирование и контроль поведения массы людей;
- моделирование процессов в сетях социальных взаимодействий и исследование устойчивости общественных структур;
- физическое и квазифизическое описание экономических явлений (эконофизика);
- исследование динамики общественного мнения, физическая политология;
- исследование эволюции языковых и культурных норм, физическая социология;
- моделирование социальных и демографических процессов, математическая история.

В большинстве пунктов этого перечня имеются очевидные прикладные задачи (среди которых наиболее мирной выглядит оптимизация движения дорожного транспорта). Кроме того, в перечисленных видах социальных систем весь спектр сложного поведения агентов (обычно людей) характеризуется малым количеством измеримых параметров — таких как голосование «за» или «против» кандидатов определенной партии на выборах, число значений слов на разных этапах эволюции языка, скорость квазиодномерного движения и плотность потока автомобилей на шоссе, изменения территории и численности населения государства. Таким образом, динамику систем в указанных направлениях социофизики действительно можно формализовать. Далее мы кратко рассмотрим эти направления и перечислим достигнутые в них результаты.

3.1. Движение «живых частиц»

3.1.1. Автомобильный трафик

По физическому моделированию автомобильного трафика имеется обширная литература, цитируемая здесь лишь очень выборочно [5, 42—56]. Это один из немногих разделов социофизики, где средние характеристики системы, т. е. потока автомобилей, удается вывести из микроскопических уравнений движения отдельных частиц в рамках моделей «следования» (car-following models) [5], например,

$$\begin{aligned} dx_i(t + \tau)/dt &= v_{\text{opt}}[\Delta x_i(t)] = \\ &= v_{\text{max}}(\Delta x_i)^2/[d_0^2 + (\Delta x_i)^2], \end{aligned} \quad (1)$$

$$d^2x_i/dt^2 = \tau^{-1}[v_{\text{opt}}(\Delta x_i) - dx_i/dt],$$

где Δx_i — дистанция от данного (i -го) автомобиля до ближайшей машины впереди (мы будем называть ее «лидером»), d_0 — безопасная дистанция, v_{max} и v_{opt} — соответственно максимальная и оптимальная скорости, τ — время реакции водителя. В представленной уравнениями (1) модели оптимальной скорости стратегия водителей сводится к коррекции скорости движения по текущему расстоянию до лидера Δx_i , а множитель $[d_0^2 + (\Delta x_i)^2]^{-1}$ в выражении для оптимальной скорости имеет вид потенциала отталкивания частиц с «твердым ядром» размера d_0 . В модели оптимальной дистанции

$$\begin{aligned} d^2x_i/dt^2 &= dv_i/dt = (k/\Delta x_i)\{-[\Delta x_0(v_i)/\Delta x_i]^4 + \\ &+ [\Delta x_0(v_i)/\Delta x_i]^2\} + a_0(1 - v_i/v_{\text{max}}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta x_0 = d_0 + c_0 v_i^2$$

(где k , d_0 , c_0 — эмпирически подбираемые параметры) ускорение автомобиля в момент времени t задается стартовым ускорением a_0 , текущей скоростью v_i и потенциалом леннард-джонсовского типа (выражение в фигурных скобках), который отражает стремление водителя к максимальной скорости и оптимальной дистанции до лидера Δx_0 (рис. 5). Отметим, что первое слагаемое в выражении (2) имеет смысл силы, корректирующей движение частицы единичной массы в «потенциале» лидера, но эта сила действует лишь в одном направлении (от лидера к следующей за ним частице) — т. е. в моделях следования, несмотря на их подобие уравнениям классической механики, не выполняется третий закон Ньютона [5].

Помимо упомянутых микроскопических моделей, разработаны макроскопические (поток машин как сжимаемая жидкость) и мезоскопические теории дорожного движения, а также его микро-

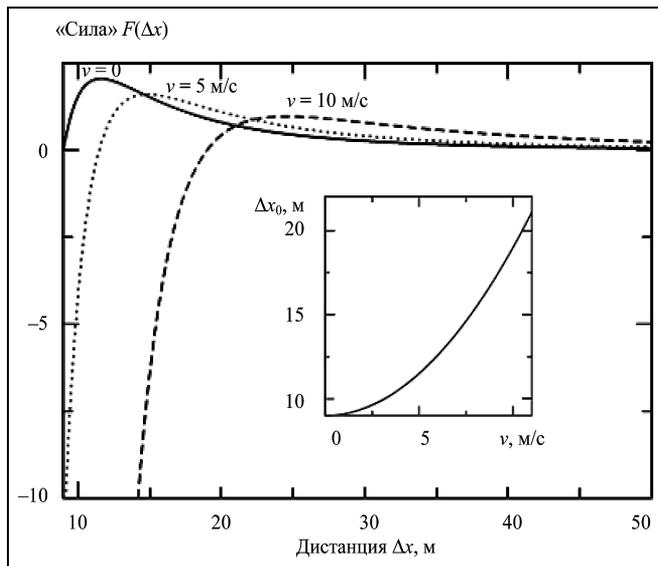


Рис. 5. Зависимость «корректирующей силы» от расстояния до автомобиля впереди в стратегии оптимальной дистанции. На врезке — зависимость оптимальной дистанции Δx_0 от скорости движения [5]

моделирование в приближении *клеточных автоматов* [52, 56]. В большинстве всех этих моделей стратегии агентов задают аналитические функции, куда обычно включаются стохастические компоненты, отражающие случайные изменения поведения водителей. Для ансамбля из N самодвижущихся частиц модели следования позволяют рассчитать *фундаментальную диаграмму* [53]: зависимость потока q (числа проходящих машин в единицу времени) от плотности ρ автомобилей на шоссе ($q = \langle v \rangle \rho$, где $\langle v \rangle$ — средняя скорость) (рис. 6, а) в качественном соответствии с результатами мониторинга реальных транспортных потоков (рис. 6, б).

Различные области фундаментальной диаграммы соответствуют свободному («газоподобному») движению автомобилей на шоссе, «конденсированной фазе» (пробке) и нескольким видам перегруженного потока (congested movement). Вблизи «замерзания» потока моделирование воспроизводит такие хорошо известные явления, как синхронизированное движение, нестабильное, или прерывистое, движение (stop-and-go movement), волны плотности движущихся машин [54]. При неизменной плотности частиц в системе увеличение их виртуальных размеров при усилении стохастического «шума» (мезоскопического аналога температуры) снижает пропускную способность дороги и может приводить к изменению режима движения от свободного к стесненному и далее к пробке. Подобные аналоги фазовых переходов, индуцированных шумом (noise-induced transitions) характерны для многих социальных систем с кон-

курентией агентов за ограниченный ресурс — в данном примере за место в движущемся потоке [5].

Поскольку в перегруженном потоке пробки могут образоваться из-за малых возмущений — например, остановки одного автомобиля — стесненному движению на фундаментальной диаграмме отвечает обширная область «рассеянных состояний». В переходной области от свободного к стесненному движению (т. е. от восходящей к нисходящей ветви диаграммы) отмечается гистерезис (см. рис. 6), а вблизи оптимальной микростратегии агентов имеются многочисленные «динамические ловушки» (dynamic traps): квазистационарные состояния, параметры которых отличаются от оптимальных на величину, сравнимую с порогом реакции водителя. Отнюдь не все наблюдаемые особенности движения удается описать с помощью моделей. Прекрасное введение в теорию автомобильного трафика представлено в статье И.А. Лубашевского и соавт. [52].

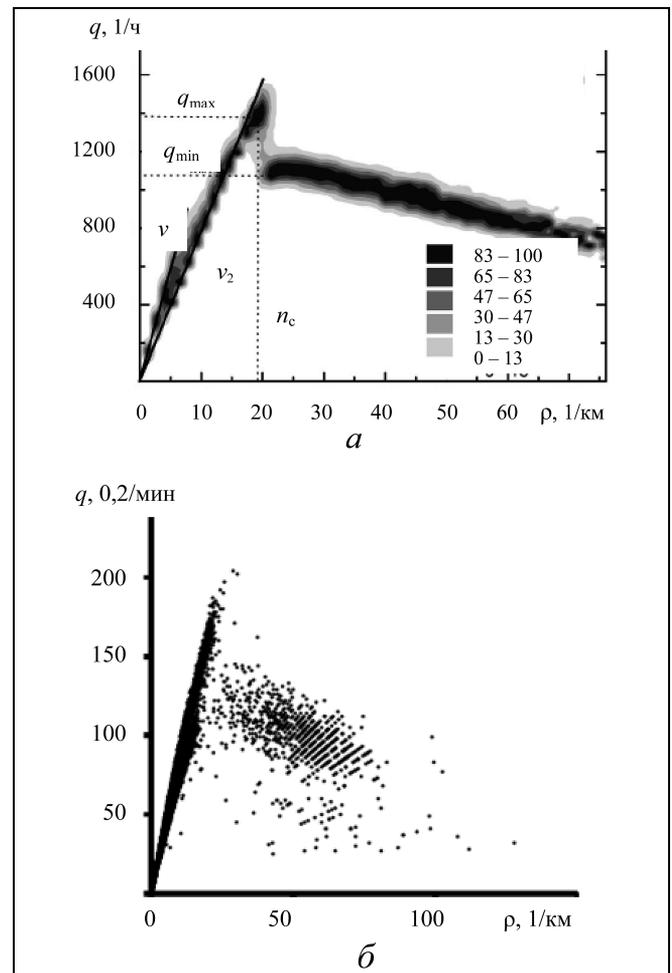


Рис. 6. Расчетная фундаментальная диаграмма дорожного движения [46] (а); данные видеонаблюдений, Японии [51] (б)



Богатство «фазовой диаграммы» дорожного движения вызвано мезоскопическим характером системы движущихся частиц, поскольку ключевой параметр системы — количество взаимозависимых автомобилей на участке шоссе в заданный момент времени — в любом случае не превышает 1–2 тыс. Этим определяется высокая чувствительность стесненного автомобильного потока к неформализуемым возмущениям, вызванным неоднородностью его состава и «свободой воли» водителей. В моделях крайне трудно учесть такие общеизвестные факторы, как разные габариты участников движения, светофоры, погодные условия, иррациональное вождение, аварии и т. д. [14, 52]. Тем не менее, теории автомобильного трафика в последние десятилетия существенно изменили характер управления дорогами в высокоразвитых странах, где введены автоматический мониторинг скорости и плотности потока машин, ограничения скорости на перегруженных участках в реальном времени («slower is faster»), оповещение о пробках и спутниковая навигация. Отметим, что все эти меры, увеличивая пропускную способность шоссе, вероятно, снижают общую устойчивость оптимизированной транспортной системы к сильным возмущениям — таким как снегопады или гололед. В последние годы методы социофизики начинают применять к еще более сложным задачам моделирования городского транспорта [50, 53, 55, 56] и транспортных сетей (см. далее).

3.1.2. Двумерные и трехмерные системы движущихся частиц

При переходе от квазиодномерного движения машин по разделенному шоссе с небольшим числом полос к описанию перемещения «живых частиц» в двух и трех измерениях задачи теории, очевидно, усложняются. Микроскопические модели такого движения часто основаны на *уравнении Ланжевена* — втором законе Ньютона ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$) для систем с вязким трением и случайными возмущениями:

$$m(\partial^2 \mathbf{r} / \partial t^2) = -\nabla U - m\gamma \partial \mathbf{r} / \partial t + \mathbf{F}_R(t), \quad (3)$$

где m — масса частицы, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ — ее положение в пространстве, $\nabla U = (\partial U / \partial x, \partial U / \partial y, \partial U / \partial z)$ — градиент потенциала, γ — коэффициент трения, пропорционального скорости частицы, а \mathbf{F}_R — стохастическая составляющая внешних сил. Уравнение (3) описывает трехмерное движение классической частицы внутри плотной среды в поле заданного «детерминистского» потенциала $U(\mathbf{r})$ со случайными возмущениями. Если вязкое трение велико ($|\partial^2 \mathbf{r} / \partial t^2| \ll |\gamma \mathbf{v}|$), инерцией частиц можно пренебречь. Для такой системы, в физической литературе называемой *пердемпфированной*, уравне-

ние (3) переходит в уравнение движения «безмассовой» броуновской частицы

$$\partial \mathbf{r} / \partial t = \mathbf{v} = -\mu \nabla U + \sqrt{2D} \mathbf{F}_R, \quad (4)$$

где $\mu = 1/(\gamma m)$ — подвижность частицы, $D = k_B T / (\gamma m)$ — коэффициент диффузии, k_B — постоянная Больцмана, T — температура [5].

Помимо «неживых» броуновских частиц, уравнением (4) описывают «кусочно-хаотическое» передвижение бактерий, для которых в роли внешних сил могут выступать градиенты температуры, освещенности или концентраций питательных веществ и продуктов метаболизма (*хемотаксис*), а случайная сила \mathbf{F}_R задает как их собственные баллистические смещения за промежуток времени δt , так и броуновские блуждания [57]. В социофизике на уравнениях (3) и (4) основана микродинамика *броуновских агентов*, способных дрейфовать в модельном поле внешних сил $U(x, y, z)$ [58].

Состояние совокупности большого числа частиц со стохастическими взаимодействиями отражает непрерывная функция плотности вероятности $p(x_1, \dots, x_N, t)$, где координатами (x_1, \dots, x_N) (их число N велико) задаются микросостояния всех частиц в системе. Эволюцию такой системы во времени t описывает *уравнение Фоккера—Планка* («микроскопическим» следствием которого является уравнение Ланжевена):

$$\begin{aligned} \partial p / \partial t = & -\sum_i \partial / \partial x_i [D_i^{(1)}(x_1, \dots, x_n) p] + \\ & + \sum_{i,j} (\partial^2 / \partial x_i \partial x_j) [D_{ij}^{(2)}(x_1, \dots, x_n) p], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{D}^{(1)} = \{D_i^{(1)}\}$ — вектор сдвига распределения $p(x_1, \dots, x_n)$ под действием детерминистских внешних сил, а $\mathbf{D}^{(2)} = \{D_{ij}^{(2)}\}$ — стохастический тензор диффузии (в общем случае зависящие от состояния системы). В одномерной задаче при постоянстве внешнего поля ($\mathbf{D}^{(1)} = \langle \mathbf{v} \rangle = \text{const}$) в однородной среде ($\mathbf{D}^{(2)} = \langle \mathbf{D} \rangle = \text{const}$) соотношение (5) принимает форму уравнения диффузии

$$\partial p / \partial t = -v \partial p / \partial x + D \partial^2 p / \partial x^2, \quad (6)$$

где v — коэффициент сдвига, D — коэффициент диффузии. Этому уравнению подчиняется, например, оседание коллоидных частиц в поле силы тяжести. Решением уравнения (6) является гауссово распределение плотности вероятности, которое с течением времени сдвигается внешним потенциалом из исходного центра x_0 и «расплывается» под действием случайных сил: $p(x, t) = \sqrt{4\pi Dt} \exp[-(x - x_0 - vt)^2 / 4Dt]$ со средним положением $\langle x \rangle = x_0 - vt$ и дисперсией $\sigma^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 = 2Dt$

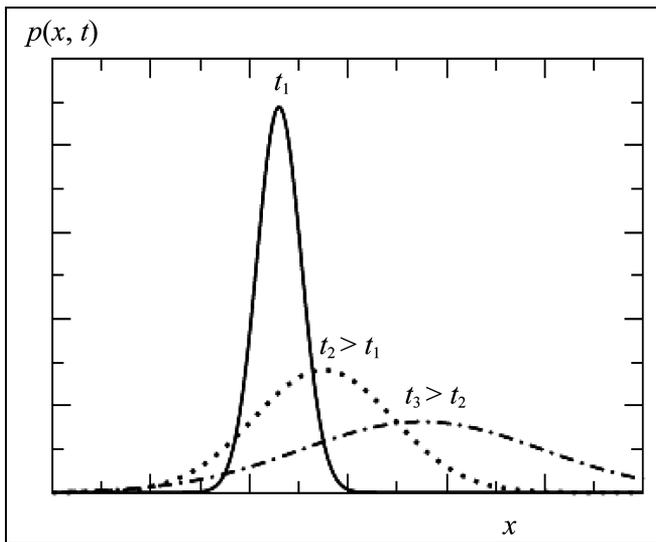


Рис. 7. Эволюция распределения плотности вероятности распределения частиц $p(x, t)$ во времени при нормальной одномерной диффузии [5]

(рис. 7). Если же в одномерной форме уравнения (5) средние значения $\langle v \rangle$ или $\langle D \rangle$ сами зависят от состояния системы, динамика плотности вероятности $p(x, t)$ отражает *аномальную диффузию*. В частности, при увеличении коэффициента D для «быстрых» частиц вместо броуновского случайного блуждания возникают негауссовы распределения $p(x, t)$ с большими флуктуациями смещения: *полет Леви* [5] (см. п. 3.3 во второй части обзора).

В тех задачах социофизики, где состояния системы описывают непрерывные переменные, уравнения Ланжевена и Фоккера—Планка служат основой для моделирования, соответственно, микродинамики агентов и изменений интегральных параметров. (Хотя, в столь же общей форме, квантовую химию можно считать основанной на приближенных решениях уравнения Шредингера, а статистическую термодинамику на распределении Гиббса, стремление «спрятать» всю сложность социальной системы в стохастические возмущения действительно присутствует в литературе). Степень соответствия построенных моделей фундаментальным положениям физики обычно не обсуждается (см. ньютоноподобную динамику автомобиля в моделях следования): главное достоинство теоретических конструкций заключается в согласии расчета с результатами наблюдений. Эти особенности нынешнего этапа развития социофизики проявляются и в других ее разделах.

Диффузионные модели применяли в исследованиях урбанизации [59, 60] и распространения земледелия в Европе [61]. В большинстве таких работ общую динамику роста «колонии» удавалось воспроизвести на основе естественного предположения

о том, что проникновение первых «агентов» (соответственно участков городской застройки или неолитических селений, перешедших к земледелию) в богатую ресурсами область облегчает ее дальнейшее освоение. Формальным результатом является возрастающая зависимость коэффициента диффузии от скорости, т. е. аномальная диффузия, приводящая к асимптотическим обратным степенным распределениям (в работе [59] это распределение участков городской застройки по площади). Обратные степенные распределения также дает часто используемая модель просачивания (*перколяции*) [60]. В работе [61] вместо уравнения Фоккера—Планка (6) использовалось кинетическое уравнение Фишера:

$$\partial p / \partial t = D \nabla^2 p + F(p),$$

где $D \nabla^2 p$ — диффузионный терм, $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ с функцией «источника» $F(p)$. В химической кинетике эта функция отражает возникновение частиц в ходе реакции, в цитируемой работе — рост популяции во времени. Кинетическое уравнение «реакции — диффузии», родственное уравнению (6) при нулевом векторе сдвига ($v = 0$) (в работе [61] усложненное авторами), нередко применяется для описания социальной экспансии.

Моделированию двумерного движения и возникающих распределений популяции в колониях бактерий посвящен большой раздел биофизики, нами здесь не рассматриваемый [41, 57]. (Тем не менее, многие лидеры современной социофизики в 1980-е и 1990-е гг. плодотворно занимались исследованием самоорганизации в микробиологии). В предложенной в 1995 г. Вишеком и соавт. модельной системе [62] «самодвижущиеся» агенты перемещались на квадратной решетке через дискретные интервалы времени с одинаковыми по модулю векторами скорости v_i , угол θ_i которых с осью x в каждый следующий момент $t + 1$ определялся суммарным направлением скоростей v_j частиц в ближайшем окружении в предыдущий момент t и случайными возмущениями η : $\theta_i(t + 1) = \langle \theta_j(t) \rangle_{\text{окружение}} + \eta$. Эта модель, близкая к двумерной спиновой модели Изинга [63] (см. п. 3.4 в третьей части обзора), предсказывает спонтанную ориентацию скоростей частиц, т. е. их согласованное коллективное движение, *ниже* некоторого критического уровня шума η . Зависимость общей картины перемещения от плотности частиц представлена на рис. 8.

Современный подход к моделированию системы взаимосвязанных «живых частиц», перемещающихся в трех измерениях (птицы и рыбы), сформулировал Рейнольдс в 1987 г. [64]. В его работе, посвященной компьютерной анимации, была предложена стратегия движения «птицои-

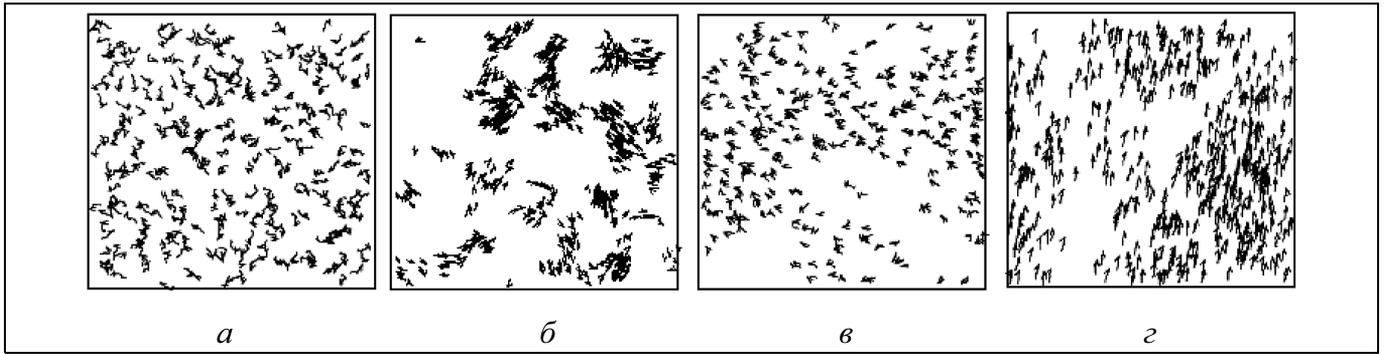


Рис. 8. Ориентация векторов скорости «живых» частиц в двух измерениях (показаны штрихами) в зависимости от плотности частиц и шума η [62]: *a* — исходное неупорядоченное движение; *б* — низкая плотность и низкий шум: неупорядоченное перемещение «сгустков» частиц (swarms); *в* — высокая плотность и высокий шум: частичная корреляция движения; *г* — высокая плотность и низкий шум: коллективное упорядоченное движение

дов» (boids), позволившая реалистически воспроизвести перемещение трехмерной стаи: корректировка скоростей по ближайшим соседям, притяжение к центру группы, избегание столкновений с соседними частицами и препятствиями (для чего вводился детерминистский потенциал отталкивания). В 1990-е гг. эти принципы стали основой для серии работ в математической биологии [65—67]. Как и в автомобильном трафике, интерес исследователей вызвали «фазовые переходы», в данном случае от покоя к несогласованному и согласованному движению — особенно для больших стай, где отсутствует лидер. Так, в работе [67] реакцию *i*-й особи на движение других «частиц» в стае определяла «сила»

$$\mathbf{f}_i = \sum_j [af_a(r_{ij})\mathbf{v}_j + bf_b(r_{ij})\mathbf{r}_{ij}] + \boldsymbol{\eta}_i,$$

где \mathbf{v}_j — вектор скорости *j*-й птицы в ближайшем окружении *i*-й, r_{ij} — ее расположение относительно *i*-й особи, *a* и *b* — варьируемые параметры, а вектор $\boldsymbol{\eta}_i$ единичной длины соответствовал случайным возмущениям. Упрощенные функции $f_a(r_{ij})$ (влияние скорости окружения на *i*-ю особь) и $f_b(r_{ij})$ (влияние конфигурации окружения) в цитируемой работе имели «твердое ядро» при $r < r_0$ и область притяжения (минимум) при $r \geq r_0$. В рассчитанной «фазовой диаграмме», зависящей от коэффициентов *a* и *b*, выделялись области некоррелированного движения частиц («газа») при малых *b*, упорядоченного и неупорядоченного покоя стаи («неподвижный кристалл» и «неподвижная жидкость») и области ее неупорядоченного («текущая жидкость») и упорядоченного движения («движущийся кристалл»). В недавней статье [68] представлен редко встречающийся анализ микродинамики полета «живых частиц»: сопоставлены стратегии набора высоты соколами и дельтапланеристами.

Потенциалы взаимодействия «живых частиц» в названных работах задавались эмпирически. Если на частицу воздействуют только ее ближайшие соседи, структуру движущейся группы удастся представить графом [67]. В 2000-е гг. «графы коммуникаций» движущихся агентов использовали в моделях стай [69, 70], а также автомобильного трафика [71], групп мобильных роботов [72], «формаций» беспилотных летательных аппаратов [73] и в других важных приложениях. Задачи управления такими системами смыкаются с обширной областью изучения и конструирования «роевого интеллекта» (swarm intelligence), или «распределенного интеллекта» [74, 75], которая в нашем обзоре также не рассматривается.

3.1.3. Движение пешеходов

Первые физические модели пешеходных потоков появились в 1970-х гг., а с середины 1990-х развивается микроскопическое описание такого движения в приближении клеточных автоматов и континуальные модели [10]. Эта область имеет много общего с исследованием автомобильного трафика [47]; из «микроскопических» уравнений движения людей здесь тоже выводится фундаментальная диаграмма потока [76]. В настоящее время моделирование пешеходного движения, направленное, в частности, на обеспечение безопасности массовых мероприятий — одна из наиболее развитых областей социофизики [76—87].

Континуальное микроскопическое описание динамики пешехода основано на теории социального поля [77]. Уравнение двумерного движения [78]

$$m_i d\mathbf{v}_i/dt = \mathbf{F}_i^{\text{инд}} + \mathbf{F}_i^{\text{общ}} + \boldsymbol{\eta}_i(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{инд}} = (m_i/\tau)(v_i^{(0)} \mathbf{e} - \mathbf{v}_i),$$

$$\mathbf{F}_i^{\text{общ}} = - \sum_{\text{цели}} \mathbf{f}_{ik} + \sum_{\text{стены}} \mathbf{f}_{ip} + \sum_j \mathbf{f}_{ij},$$

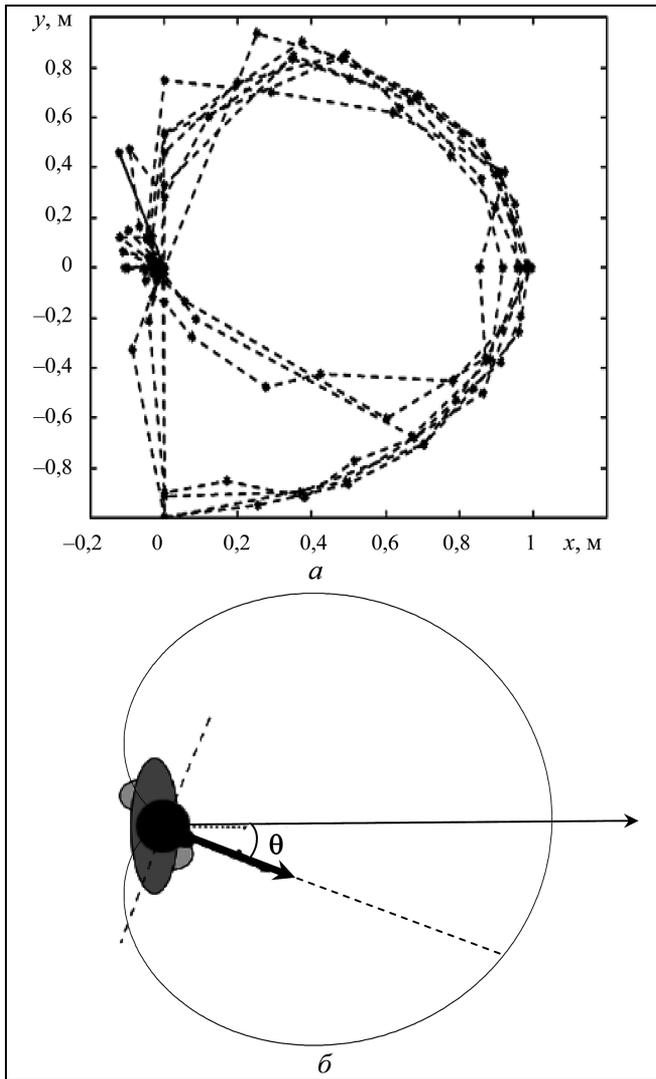


Рис. 9. Угловой терм потенциала действия «социального поля» на пешехода (вид сверху) $F(\mathbf{r}) = f(r)\Phi(\theta)$: a — по результатам анализа видеозаписи; b — модельный потенциал $\Phi(\theta) = (1/2)(1 + \cos\theta)$ в полярных координатах (по [82])

(где m_i — масса частицы, τ — время реакции, \mathbf{e} — единичный вектор в направлении движения) фактически представляет собой уравнение Ланжевена (3) с особыми видами вязкого трения $\mathbf{F}_i^{\text{инд}}$ и «детерминистского» потенциала ($-\nabla U = \mathbf{F}_i^{\text{общ}}$), а также со стохастическим возмущением $\eta_i(t)$. Стратегия движения агента задается в виде суммы корректирующих «сил»: внутренней $\mathbf{F}_i^{\text{инд}}$ и внешней $\mathbf{F}_i^{\text{общ}}$. Первая из них, заимствованная из моделей автомобильного трафика (см. уравнение (1)), отражает стремление частиц к предпочтительной скорости $v_i^{(0)}$. Внешняя сила $\mathbf{F}_i^{\text{общ}}$ сложной формы (действие социума) складывается из притяжения к

целевым объектам (переходам, магазинам, вывескам) и отталкивания от приближающихся препятствий — как от соседних движущихся частиц, так и от стен домов и др. Потенциал отталкивания часто выбирают в виде $A \exp[b(R_0 - r)]$, где r — расстояние до препятствия, R_0 — радиус частицы, A и b — эмпирические константы. (В отличие от автомобилей, пешеходы могут физически соприкасаться без разрушения потока, поэтому потенциал отталкивания имеет «твердое ядро», для пары частиц размером $2R_0$). В последние годы в уравнения (7) введена анизотропная угловая зависимость потенциала пешехода с максимумом в направлении движения, отражающая неравномерное восприятие целей и препятствий в секторе обзора (рис. 9).

Расчеты с помощью формул (7) и родственных моделей позволяют воспроизвести некоторые качественные особенности пешеходного трафика: обтекание препятствий, взаимное проникновение встречных потоков с их расщеплением на противоположно движущиеся «полосы» (рис. 10, a), попе-

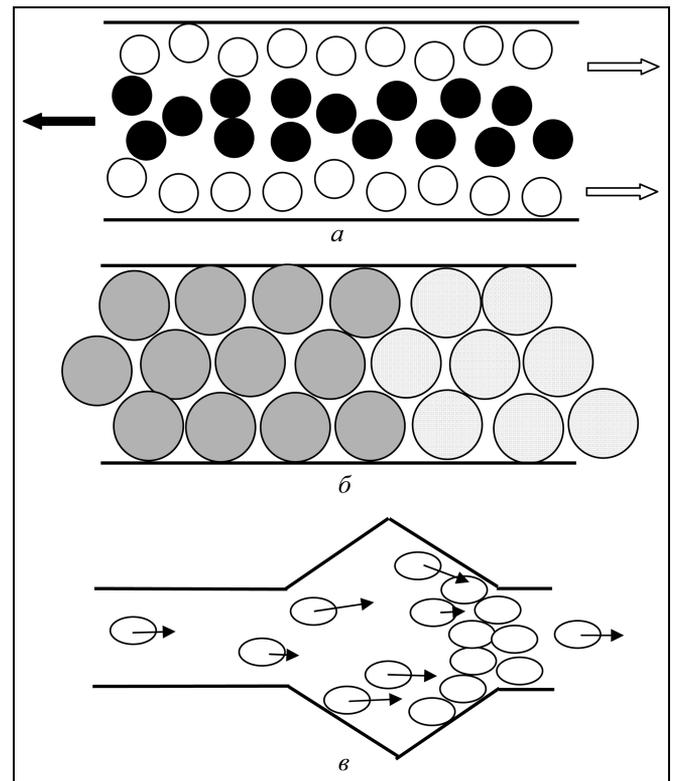


Рис. 10. Моделирование характера пешеходного движения: a — «ламинарное» течение противоположных потоков (цвет соответствует направлениям); b — образование пробки с плотной упаковкой при увеличении эффективных размеров агентов вследствие возрастания шума («freezing by heating») [47, 79]; c — образование затора в месте расширения прохода при панической эвакуации [83]



ременное прохождение противоположно направленных частиц через узкий проход. При достаточно высокой плотности противоположных потоков в проходе конечной ширины увеличение шумового термина η_p , как и для автомобильного трафика (см. выше), приводит к образованию «пробки» с плотной упаковкой неподвижных частиц (рис. 10, б). Это довольно очевидное возникновение метастабильного порядка под воздействием флуктуаций было названо авторами «замерзание при нагреве» (freezing by heating) [79]. На фундаментальной диаграмме пешеходного движения, рассчитанной разными авторами (см. работу [80]), как и на диаграмме автомобильного трафика, имеются области свободного (восходящая ветвь) и стесненного движения (нисходящая ветвь).

Для воспроизведения более сложных действий людей (переход улицы на светофоре, движение в супермаркете и др.), позволяющего оценивать пропускную способность различных узлов города, в модель (7) следует вводить дополнительные эмпирические поправки [50, 82]. Интерес физиков в последние годы вызвала «социальная структура» пешеходного потока: наличие в нем групп взаимодействующих людей, форма и особенности движения таких групп, их влияние на общий поток [81]. Для исследования этой проблемы, тесно связанной с задачами «управления толпой» (см. далее), а также для уточнения параметров модели общественного поля применяется компьютерная обработка данных видеосъемки [82].

В 2000 г. Хелбинг, Фаркаш и Вишек применили алгоритм «бессознательного» движения пешеходов к моделированию паники при аварийной эвакуации [83]. В этом случае во внутренний терм $F_i^{\text{инд}}$ модели (7) входит максимальная скорость движения $v_i^{(0)}$ (различная у разных частиц), а к внешним силам $F_i^{\text{общ}}$ могут добавляться стремление прочь от источника опасности, отталкивание частиц при физическом контакте со стенами и друг с другом и следование за соседними частицами, отражающее *стадное поведение* (herding). Такие расчеты можно использовать в проектировании путей эвакуации (где, в частности, недопустимы локальные уширения, на которых более быстрые агенты обгоняют медленных, образуя затор, рис. 10, в). По данной теме опубликованы обзоры (см. работу [84]); моделям эвакуации посвящен раздел в отечественной монографии [85].

Серию работ по безопасности массовых мероприятий вызвал трагический инцидент в Мине (Саудовская Аравия), где 12 января 2006 г. в давке погибли более 300 паломников [86, 87]. Данные с камер видеонаблюдения выявили качественные отличия стесненного движения толпы вблизи кри-

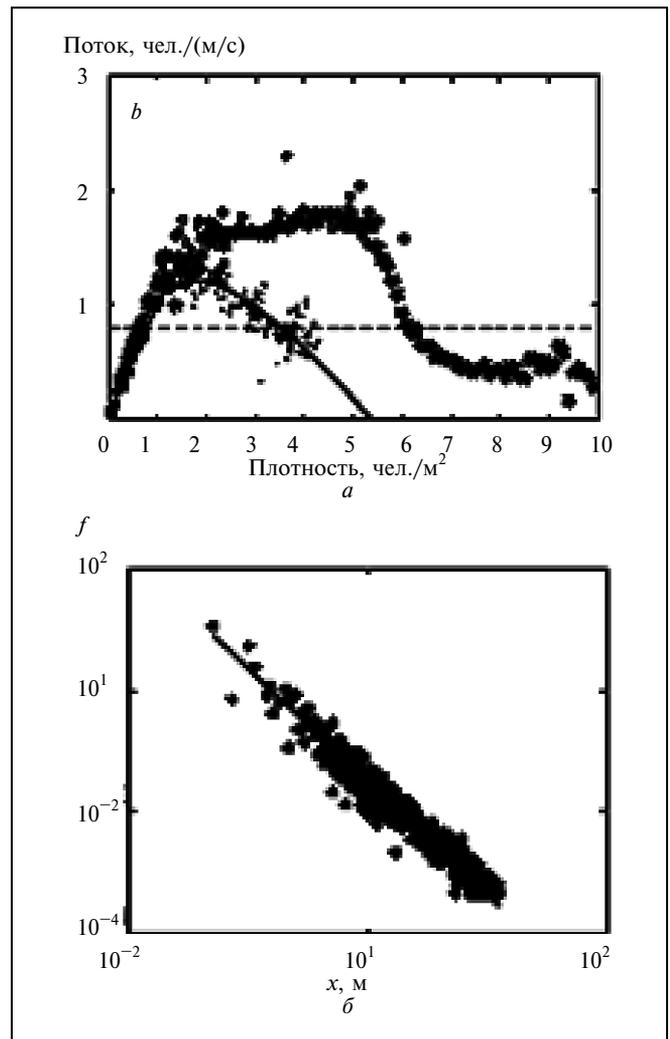


Рис. 11. Критический режим движения толпы на мосту Джамарат в Мине 12.01.2006 по результатам видеосъемки: а — зависимость потока от плотности (нижняя ветвь — стандартная фундаментальная диаграмма); б — частотность (f) сдвигов (x) пешеходов при «турбулентном» движении (в двойном логарифмическом масштабе) [86]

тических значений плотности от фундаментальной пешеходной диаграммы, зарегистрированной в обычных условиях: высокий стационарный поток при плотности 2–5 чел./м² и его резкое (в 3 раза) уменьшение при плотности более 6 чел./м², соответствующей тесному физическому контакту. Именно этот динамический переход вызвал давку на участке (площадью около 50 м²) широкого и однородного пролета моста Джамарат (рис. 11, а). Рост физического давления в толпе породил панику, которая сопровождалась «турбулентным» движением (рис. 11, б) и стала непосредственной причиной гибели людей. Результаты эмпирического анализа видеоклипов [86] и расчетного моделиро-

вания (с введением дополнительного сильного отталкивания сближенных частиц [87]) были использованы руководством Саудовской Аравии для повышения уровня безопасности паломников в последующие годы.

3.1.4. Управление массами людей (crowd control)

Для выяснения общих принципов динамики «живых» систем в последние годы используется детальное «микроскопическое» описание движения индивидуумов на основе эмпирических наблюдений и экспериментальных данных (некоторые примеры представлены в обзорах [47, 88]). В то же время довольно быстрая смена направлений исследований среди разных систем «живых» частиц (нередко в работах одних и тех же авторов) косвенно указывает на причины, по которым такие исследования востребованы. В этом смысле «физика пешеходов» за 2000-е гг. проделала весьма характерную эволюцию от простейших моделей «автоматического» движения и инстинктивных действий (паническое бегство) к исследованию стихийных реакций массы людей на внешние воздействия и попыткам управлять этими реакциями.

Термином *crowd control* в литературе называется как обеспечение общественного порядка на массовых мероприятиях, так и управление толпой людей в реальных условиях. Формализацией этих прикладных («инженерных») задач в XX в. занимались многие авторы (см. книгу [85] и цитированную в ней литературу). Одной из первых работ физиков в данной области можно считать рассмотренную выше модель панической эвакуации [83]. В том же 2000 г. вышла большая венгеро-румынская статья, посвященная анализу режимов аплодисментов (эмпирический материал был собран в бухарестском оперном театре, где группы экспериментаторов-«клакеров» пытались перевести несинхронные аплодисменты в ритмические²) [89]. Двумя годами позже появилось аналогичное исследование «мексиканской волны»³ на трибунах стадиона (зрители синхронно встают с мест, вздымая руки, и сразу садятся, затем то же делают их соседи, отчего по трибунам со скоростью ~10 м/с

² Иницирующие бурные аплодисменты «группы поддержки», обычно составленные из студентов или военнослужащих, в СССР действовали на многих, если не на всех, массовых общественно-политических мероприятиях. Однотипная динамика торжественных собраний в разных странах мира заставляет предположить, что это был не частный идеологический, а общий организационный инструмент.

³ Такие коллективные действия зрителей получили распространение после чемпионата мира по футболу в Мексике (1986 г.), что и закрепилось в их названии.

проходит автоволна) [90]. При физической тривиальности обоих примеров «когерентного поведения людей» предварительные сообщения об этих работах с минимумом математических формул вышли в журнале «Nature» и вызвали всплеск публикаций.

В расчетной модели «мексиканской волны» использовалась известная теория автоволн в активной среде [91]: появление вблизи ожидающего агента определенного числа возбужденных агентов (выше пороговой плотности) переводило его из ожидающего в возбужденное состояние [90]. В цитируемых работах из экспериментальных данных выводилась зависимость вероятности появления волны от размера иницирующей группы и порога возбуждения агента. Иницирование ритмических аплодисментов моделировали системой стохастических осцилляторов, связанных общим уровнем шума [92]. В отличие от более ранней модели коллективного движения частиц [62], *разрушаемого* шумом (см. рис. 8), система связанных осцилляторов в статье [92] *синхронизировалась* в некотором интервале интенсивности возмущений (рис. 12). Этот довольно типичный пример стохастического резонанса (в классической форме — возбуждения синхронных колебаний малой вынуждающей силой при определенной интенсивности «белого» шума [93]) авторы [92] интерпретировали как особое явление в социальной системе. Как ритмические аплодисменты, так и «мексиканская волна» в перечисленных работах связывались с вопросами управления толпой (заголовок статьи [92] гласил: «ритмические аплодисменты и многое другое»).

В качестве индуцированного действия толпы некоторые авторы рассматривали переход к *коллективному движению* при различных уровнях стохастических возмущений [94, 95]. Хотя в использованных простых моделях увеличение «температуры», т. е. средней амплитуды возмущений, до критического уровня вызывало противоположный переход от согласованного к беспорядочному движению агентов [62], работы последних лет были явно нацелены на поиск условий, при которых согласованное движение начинается *выше* некоторой «второй критической температуры». В качестве управляющих параметров использовались плотность агентов в толпе (несмотря на разрушение общего движения возрастающим шумом при постоянной плотности) [47] и скорость их движения [94, 95]. В последнем случае сами авторы были склонны считать свои результаты численного моделирования (появление двумерных [94] и трехмерных [95] «волн плотности» выше порогового шума при большой скорости частиц) артефактом, возникшим из-за наложения периодических условий.

Коллективную динамику любой системы движущихся агентов (включая группы роботов) в последние годы анализируют в терминах восприятия, обработки и использования информации социальной системой как единым целым [96]. Развитием этого подхода могут стать новые математические модели «распределенного интеллекта» [75]. В недавней работе [97] результаты информационного

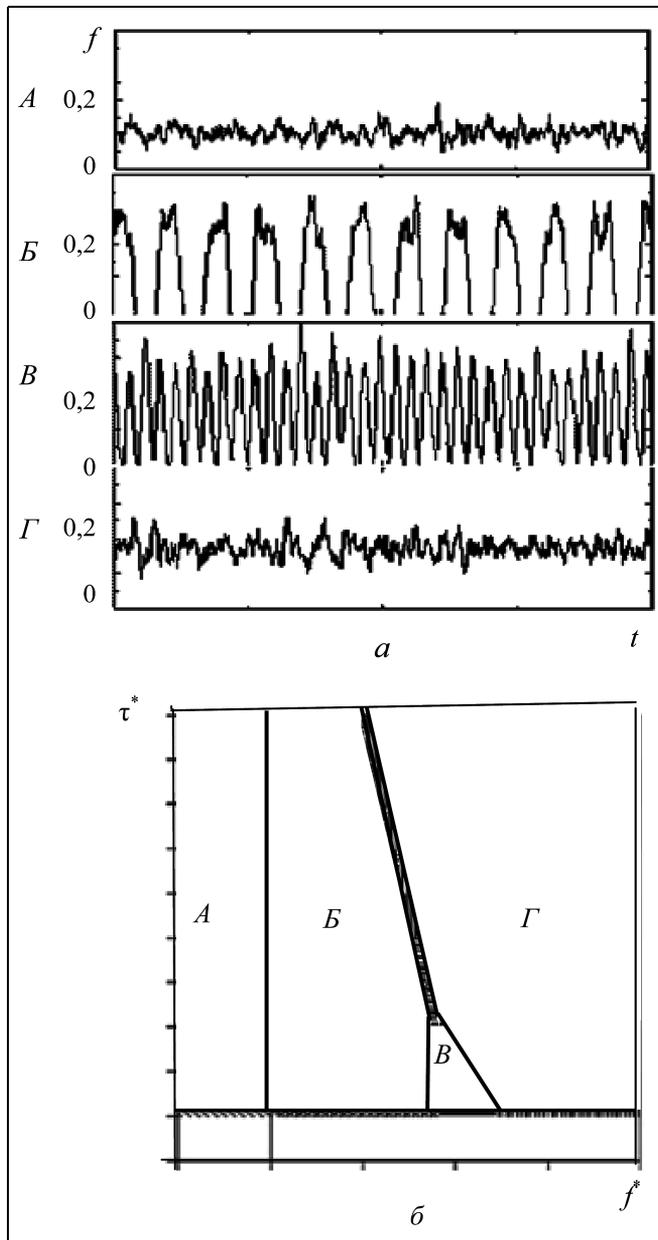


Рис. 12. Моделируемые режимы аплодисментов (а): А — слабые несинхронные, Б — синхронные, В — частые синхронные, Г — сильные несинхронные (овация), f — интенсивность, произв. ед., t — время; диаграмма состояний системы (б): f^* — целевой уровень шума, τ^* — характеристическое время реакции агента [92]

взаимодействия индивидуума с системой были формализованы в двух эмпирических («эвристических») принципах движения пешехода: (а) выбор кратчайшего пути к цели с учетом препятствий и (б) выбор скорости, гарантирующей от столкновений в интервале времени $\Delta t > \tau$, где τ — индивидуальное время реакции. Замена простейших потенциалов отталкивания от препятствий в модели социального поля (7) на такую стратегию позволила воспроизвести все описанные выше особенности нормального пешеходного потока при хорошем согласии вычисленных «микроскопических» траекторий агентов с экспериментальными, а учет вынужденных столкновений с препятствиями и ньютоновской механики движения привел к воспроизведению «турбулентности» (давки) при высоких плотностях потока. Вполне возможно, что ресурсоемкое использование «нечетких» (fuzzy) потенциалов взаимодействия агентов открывает путь к количественному компьютерному моделированию социальных систем.

Хорошо известная склонность возбужденной массы людей к стадному поведению [47, 83], не воспроизводимая стандартными моделями «живых частиц», в последние годы изучалась на эмпирическом уровне. В характерных экспериментальных исследованиях [81, 88] выяснились условия, при которых большая группа неинформированных испытуемых (100—200 чел.) активируется небольшой группой информированных лидеров, задающих направление общего движения. Целью работы авторы [81] не без юмора назвали моделирование коллективного движения животных. Некоторые вероятные приложения такой «полевой социофизики» иллюстрирует фрагмент репортажа о волнениях в Минске 19.12.2010, последовавших за выборами президента Белоруссии: «Никто не знает, что делать дальше, но все понимают, что делать что-то надо... Простояв на площади час, люди *вдруг* выходят на проезжую часть проспекта Независимости и начинают движение в западном направлении... В толпе многие не знают, куда все идут: одни говорят, что к Центризбиркому, другие — что к телецентру» [98] (курсив мой — Ю. С.).

Безымянный автор этого репортажа, как и другие российские журналисты, освещавшие антиправительственные выступления в Минске, отнюдь не симпатизирует президенту Лукашенко и осуждает оппозиционеров, убедительно проигравших выборы, лишь за нерешительность и отсутствие должного руководства «стихийно» возникшими беспорядками. Но именно в тот момент, когда никем не руководимая толпа *вдруг* двинулась с Октябрьской площади к Дому правительства, разрешенный митинг перерос в несанкциониро-

ванную акцию, разгоном которой (при штурме демонстрантами Центризбиркома) слаженно возмущались европейские политики. Приемы манипулирования уличными собраниями, вполне проявившиеся как на богатом фактическом материале «оранжевой революции» 2004 г. в Киеве [99], так и в политических событиях последнего времени (преобладание в толпе молодежи и несовершеннолетних, праздничная атмосфера концертов и дискотек, разжигание ксенофобии, ритмическое скандирование и др.) определенно направлены на редукцию сознания, приближающую массу людей к простейшим агентным моделям. Отрицание принципа невмешательства во внутренние дела других стран — характерное, в частности, для *Содружества Демократий* (Community of Democracies: возникшей в 2000 г. под руководством США международной организации, альтернативной ООН [100]) и Евросоюза [101] — хорошо объясняет повышенный интерес социофизики к разработке политтехнологических схем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из п. 3.1 можно видеть, что, несмотря на распространенность физической терминологии в исследованиях механического движения «живых частиц», такие исследования во многом сводятся к имитационному моделированию. В отличие от стандартных имитационных подходов (логистическое уравнение, модель Лотки—Вольтерра, брюсселятор и др. [1—3]), нацеленных прежде всего на качественное воспроизведение некоторой наблюдаемой динамики расчетным путем и не претендовавших (по крайней мере в момент их появления) на «физический смысл», микромодели автомобильного и пешеходного трафика изначально были заимствованы из классической механики. Однако после введения феноменологических поправок, без которых теория не согласуется с реальностью, эти модели уже не отвечают исходным принципам и по сути являются квазифизическими. Для каждого вида процессов существует своя общепринятая схема (как социальное поле в движении пешеходов), куда разные авторы вносят небольшие модификации, физическая обоснованность которых также обычно не обсуждается. Главный критерий успеха теории, помимо ее согласия с базовой моделью, состоит в воспроизведении эмпирических данных. Далее мы убедимся, что это характерно и для других социофизических направлений.

Безусловно положительный вклад физики в решение транспортных проблем заключается в улучшении процедур регистрации и обработки результатов наблюдений. Компьютерный анализ кадров видеосъемки, угловые зависимости «пеше-

ходных потенциалов», построение фазовых диаграмм и др. — все эти атрибуты развитой в физике культуры измерений позволили более объективно описать состояние такой общественной системы, как транспортный поток, и регулировать его в режиме реального времени. Преимущества строгого количественного подхода к эмпирическому описанию сложных процессов проявляются во всех существующих разделах социофизики.

Одна из главных особенностей социальных систем состоит в сложном и вероятностном характере их динамики. Для ее воспроизведения в расчетах используют стохастический «шум» и нечеткие квазипотенциальные функции, моделирующие стратегии поведения агентов. При этом детерминистские факторы (масса частиц, внешние силы) учитываются в моделях стандартным образом.

Как и в других разделах социофизики, многие работы по исследованию движения в системе «живых частиц» посвящены прикладным задачам. При этом, если управление автомобильным трафиком носит в основном конструктивный характер, то модели пешеходного движения не только улучшают городское хозяйство и обеспечивают безопасность массовых мероприятий, но также позволяют провоцировать участников таких мероприятий на массовые стихийные действия. В отличие от эмбриональных и генно-инженерных исследований, в социофизических работах, открывающих пути к манипулированию массами людей (что отнюдь не исчерпывается направлением «crowd control»), почти не упоминаются вопросы этики. Не в последнюю очередь так может проявляться концентрация большей части этих статей в западной научной литературе, что порождает у их авторов ощущение «монополии на силу». Как возможные, так и уже существующие приложения результатов в других направлениях социофизики будут рассмотрены нами в следующих частях обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хакен Г. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 406 с.
2. Пределы предсказуемости / Под ред. Кравцова Ю.А. — М.: ЦентрКом, 1997. — 256 с.
3. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. — М.: ЛКИ, 2007. — 312 с.
4. *Econophysics and sociophysics: trends and perspectives* / В.К. Chakrabarti, А. Chakraborti, А. Chatterjee (eds.). — Berlin: Wiley-VCH, 2006. — 622 p.
5. Mahnke R., Kaupuzs J., Lubashevsky I. Physics of stochastic processes. How randomness acts in time. — Berlin: Wiley-VCH, 2008. — 430 p.
6. *Encyclopedia of complexity and systems science* / R.A. Meyers (Editor-in-chief). — Berlin: Springer, 2009, — 10370 p.
7. De Oliveira S.M., De Oliveira P.M.C., Stauffer D. Evolution, money, war, and computers — non-traditional applications of



- computational statistical physics. — Stuttgart — Leipzig: Teubner, 1999. — 156 p.
8. *Managing complexity: insights, concepts, applications* / D. Helbing (ed.). — Berlin: Springer, 2008. — 393 p.
 9. *Mathematical modeling of collective behavior in socio-economic and life sciences* / G. Naldi, L. Pareschi, G. Toscani (eds.). — Berlin: Springer, 2010. — 438 p.
 10. *Castellano C., Fortunato S., Loreto V. Statistical physics of social dynamics* // *Rev. Mod. Phys.* — 2009. — Vol. 81, N 2. — P. 591–646.
 11. *Helbing D., Johansson A. Cooperation, norms, and revolutions: a unified game-theoretical approach* // *PLoS ONE*. — 2010. — Vol. 5, N 10. — e12530.
 12. *Ball P. The physical modelling of human social systems* // *Complexus*. — 2003. — Vol. 1, N 4. — P. 190–206.
 13. *Galam S. Sociophysics: a review of Galam models* // *Int. J. Modern Phys. C*. — 2008. — Vol. 19, N 3. — P. 409–440.
 14. *Lubashevsky I., Plawinska N. Mathematical formalism of physics of systems with motivation*. — URL: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0908/0908.1217v2.pdf (дата обращения 6.07.2011).
 15. *Cornell University Library, Physics and Society*. — URL: <http://ArXiv.org/physics.soc-ph/> (дата обращения 6.07.2011).
 16. *The Net Advance of Physics: Socio-Physics* — URL: <http://web.mit.edu/redingtn/www/netadv/Xsociology.html> (дата обращения 7.07.2011).
 17. *Васин А.А. Некооперативные игры в природе и обществе* — М.: МАКС Пресс, 2005. — 412 с.
 18. *Schuster P. Free will, information, quantum mechanics, and biology* // *Complexity*. — 2009. — Vol. 15, N 1. — P. 8–10.
 19. *Купятков В.Е. Мир общественных насекомых*. — 3-е изд. — М.: Либроком, 2009. — 408 с.
 20. *Czirók A., Stanley H.E., Vicsek T. Spontaneously ordered motion of self-propelled particles* // *J. Phys. A*. — 1997. — Vol. 30, N 5. — P. 1375–1385.
 21. *Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. — 2-е изд. — М.: Физматлит, 2009.
 22. *Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам*. — М.: Наука, 1986. — 497 с.
 23. *Новиков Д.А. Теория управления организационными системами*. — М.: Физматлит, 2007. — 228 с.
 24. *Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы* // *Проблемы управления*. — 2010. — № 3. — С. 2–16.
 25. *Митюков Н.В. Имитационное моделирование в военной истории*. — М.: ЛКИ, 2007. — 280 с.
 26. *Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики* // *Усп. физ. наук*. — 2000. — Т. 170, № 4. — С. 419–445.
 27. *Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate* / P. Foukal, C. Frohlich, H. Spruit, T.M.L. Wigley // *Nature*. — 2006. — Vol. 443, N 14. — P. 161–166.
 28. *Lean J., Rind D. Climate forcing by changing solar radiation* // *J. of Climate* — 1998. — Vol. 11, N 12. — P. 3069–3094.
 29. *Scafetta N., West B.J. Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600* // *J. Geophys. Res.* — 2007. — Vol. 112. — D24S03.
 30. *Эдди Дж. История об исчезнувших солнечных пятнах* // *Усп. физ. наук*. — 1978. — Т. 125, № 2. — С. 315–329.
 31. *Landscheidt T. Solar oscillations, sunspot cycles, and climatic change* / In: В.М. McCormac (ed.) *Weather and climate responses to solar variations*. — Boulder: Associated University Press, 1983. — P. 301–304.
 32. *Клименко В.В. Климат: непрочитанная глава истории*. — М.: Изд-во МЭИ, 2009. — 407 с.
 33. *Турчин П.В. Историческая динамика. На пути к теоретической истории*. — 2-е изд. — М.: ЛКИ, 2010. — 368 с.
 34. *Чижевский А.Л. Физические факторы исторического процесса*. — Калуга: 1-я Госполитография, 1924. — 76 с.
 35. *Чижевский А.Л. Космический пульс жизни: Земля в объятиях Солнца. Гелиотараксия*. — М.: Мысль, 1995. — 768 с.
 36. *Шлезингер А. Циклы американской истории*. — М.: Прогресс-Академия, 1992. — 688 с.
 37. *Малков С.Ю. К вопросу об историометрических циклах* // *Вестн. РАН*. — 1997. — Т. 67, № 8. — С. 707–719.
 38. *Zerubavel E. The seven day circle: the history and meaning of the week*. — Chicago: Univ. Chicago Press, 1989. — 206 p.
 39. *Hinich M.J., Serletis A. Randomly modulated periodic signals in Alberta's electricity market* // *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*. — 2006. — Vol. 10, N 3. — Art. 5.
 40. *González-Concepción C., Gil-Fariña M.C., Pestano-Gabino C. Wavelets modelling of water, energy and electricity consumption in Spain* // *WSEAS Trans. Math.* — 2010. — Vol. 9, N 7. — P. 509–518.
 41. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика*. — М.: Наука, 1984. — 304 с.
 42. *Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis* / L. Neubert, et al. // *Phys. Rev. E*. — 1999. — Vol. 60, N 6. — P. 6480–6490.
 43. *Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations* // *Phys. Rev. E*. — 2000. — Vol. 62, N 2. — P. 1805–1823.
 44. *Lee H.-Y., Lee H.-W., Kim D. Phase diagram of congested traffic flow: An empirical study* // *Phys. Rev. E*. — 2000. — Vol. 62, N 4. — P. 4737–4741.
 45. *Lubashevsky I.A., Mahnke R. Order-parameter model for unstable multilane traffic flow* // *Phys. Rev. E*. — 2000. — Vol. 62, N 5. — P. 6082–6093.
 46. *Goldbach M., Eidmann A., Kittel A. Simulation of multilane freeway traffic with detailed rules deduced from microscopic driving behavior* // *Phys. Rev. E*. — 2000. — Vol. 61, N 2. — P. 1239–1246.
 47. *Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems* // *Rev. Mod. Phys.* — 2001. — Vol. 73, N 4. — P. 1067–1141.
 48. *Kerner B.S. Physics of traffic*. — Berlin: Springer, 2004. — 682 p.
 49. *Traffic and granular flow '03. Papers of 5th Workshop on Traffic and Granular Flow*. (2003, Delft, Netherlands) / S.P. Hoogenboom, et al. (eds.). — Berlin: Springer, 2005. — 602 p.
 50. *The dynamics of complex urban systems. An interdisciplinary approach* / S. Albeverio, et al. (eds.). — Berlin: Springer, 2007. — 504 p.
 51. *Traffic jams without bottlenecks — experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam* / Y. Sugiyama, et al. // *New J. Phys.* — 2008. — Vol. 10. — 033001.
 52. *Лубашевский И.А., Гусейн-Заде Н.Г., Гарнисов К.Г. Макроскопические фазовые состояния автотранспортного потока в туннелях* // *Тр. ИОФАН*. — 2009. — Т. 65. — С. 50–68.
 53. *Helbing D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow* // *Europ. Phys. J. B*. — 2009. — Vol. 70, N 2. — P. 229–241.
 54. *Self-sustained nonlinear waves in traffic flow* / M.R. Flynn, et al. // *Phys. Rev. E*. — 2009. — Vol. 79, N 5. — 056113.
 55. *Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities* / L.M.A. Bettencourt, et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. — 2007. — Vol. 104, N 17. — P. 7301–7306.
 56. *Resonance, criticality, and emergence in city traffic investigated in cellular automaton models* / A. Varas, et al. // *Phys. Rev. E*. — 2009. — Vol. 80, N 5. — 056108.
 57. *Berg H.C. Random walks in biology*. — Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993. — 164 p.
 58. *Schweitzer F. Brownian agents and active particles*. — Berlin-Heidelberg: Springer, 2003. — 420 p.

59. *Manrubia S.C., Zanette D.H.* Intermittency model for urban development // *Phys. Rev. E.* — 1998. — Vol. 58, N 1. — P. 295–302.
60. *Makse H.A., et al.* Modeling urban growth patterns with correlated percolation // *Phys. Rev. E.* — 1998. — Vol. 58, N 6. — P. 7054–7062.
61. *Fort I., Mendes V.* Reaction-diffusion waves of advance in the transition to agricultural economics // *Phys. Rev. E.* — 1999. — Vol. 60, N 5. — P. 5894–5901.
62. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles / *T. Vicsek, et al.* // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — Vol. 75, N 6. — P. 1226–1229.
63. *Стенли Г.* Фазовые переходы и критические явления. — М.: Мир, 1973. — 425 с.
64. *Reynolds C. W.* Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model // *Computer Graphics.* — 1987. — Vol. 21, N 4. — P. 25–34.
65. *Derényi I., Vicsek T.* Realistic models of biological motion // *Physica A.* — 1998. — Vol. 249, N 1–4. — P. 397–406.
66. Application of statistical mechanics to collective motion in biology / *T. Vicsek, A. Czirók, I.J. Farkas, D. Helbing* // *Physica A.* — 1999. — Vol. 274, N 1–2. — P. 182–189.
67. *Tu I.* Phases and phase transitions in flocking systems // *Physica A.* — 2000. — Vol. 281, N 1. — P. 30–40.
68. *Ákos Z., Nagy M., Vicsek T.* Comparing bird and human soaring strategies // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2008. — Vol. 105, N 11. — P. 4139–4143.
69. *Veerman J.J.P., Lafferriere G., Caughman J.S., Williams A.* Flocks and formations // *Journal of Statistical Physics.* — 2005. — Vol. — 121, N 5–6. — P. 901–936.
70. *Olfati-Saber R.* Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory // *IEEE Trans. on Automatic Control.* — 2006. — Vol. 51, N 3. — P. 401–420.
71. *Veerman J.J.P., Stošić B.D., Tangerman F.M.* Automated traffic and the finite size resonance // *Journal of Statistical Physics.* — 2009. — Vol. 137, N 1. — P. 189–203.
72. Experimental implementation of flocking algorithms in wheeled mobile robots / *A. Regmi, et al.* // *Proc. American Control Conf.* — 2005. — P. 4917–4922.
73. *Lawton J., Beard R., Young B.* A decentralized approach to formation maneuvers // *IEEE Trans. Robotics and Automation.* — 2003 — Vol. 19, N 6. — P. 933–941.
74. Trends in distributed artificial intelligence / *B. Chaib-Draa, et al.* // *Artif. Intel. Rev.* — 1992. — Vol. 6. — P. 35–66.
75. *Engelbrecht A.P.* Fundamentals of computational swarm intelligence. — N.-Y.: Wiley, 2005. 672 p.
76. *Bellomo N., Bellouquid A.* On the modelling of vehicular traffic and crowds by kinetic theory of active particles / In: *Mathematical modeling of collective behavior in socio-economic and life sciences.* — Berlin: Springer, 2010. — P. 273–296.
77. *Levin K.* Field theory in social science. — N.-Y.: Harper, 1951. — 422 p.
78. *Helbing D., Molnar P.* Social force model for pedestrian dynamics // *Phys. Rev. E.* — 1995. — Vol. 51, N 5. — P. 4282–4286.
79. *Helbing D., Farkas I.J., Vicsek T.* Freezing by heating in a driven mesoscopic system // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 84, N 6. — P. 1240–1243.
80. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited / *A. Seyfried, et al.* // *J. Stat. Mech., Theory and Experiment.* — 2005. — N 10. — P10002.
81. The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics / *M. Moussaïd, et al.* // *PLoS ONE* — 2010. — Vol. 5, N 4. — e10047.
82. *Johansson A., Helbing D., Shukla P.S.* Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data // *Advances in Complex Systems.* — 2007. — Vol. 10, N 2. — P. 271–288.
83. *Helbing D., Farkas I., Vicsek T.* Simulating dynamical features of escape panic // *Nature.* — 2000. — Vol. 407. — P. 487–490.
84. *Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications* / *A. Schadschneider, et al.* — URL: <http://arxiv.org/abs/0802.1620> (дата обращения 7.07.2011).
85. *Корепанов В.О.* Модели рефлексивного группового поведения и управления — М.: ИПУ РАН, 2011. — 127 с.
86. *Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H.Z.* Dynamics of crowd disasters: An empirical study // *Phys. Rev. E.* — 2007. — Vol. 75, N 4. — 046109.
87. *Yu W., Johansson A.* Modeling crowd turbulence by many-particle simulations. — URL: <http://arxiv.org/abs/0708.3282v1> (дата обращения 7.07.2011).
88. Leadership, consensus decision making and collective behaviour in humans / *J.R.G. Dyer, et al.* // *Phil. Trans. Roy. Soc. B.* — 2009. — Vol. 364, N 1518. — P. 781–789.
89. Physics of the rhythmic applause / *Z. Néda, et al.* // *Phys. Rev. E.* — 2000. — Vol. 61, N 6. — P. 6987–6992.
90. *Farkas I., Helbing D., Vicsek T.* Human waves in stadiums // *Physica A.* — 2003. — Vol. 330, N 1–2. — P. 18–24.
91. *Greenberg J.M., Hastings S.P.* Spatial patterns for discrete models of diffusion in excitable media // *SIAM J. Appl. Math.* — 1978. — Vol. 34, N 3. — P. 515–523.
92. *Néda Z., Nikitin A., Vicsek T.* Synchronization of two-mode's oscillators: a new model for rhythmic applause and much more // *Physica A.* — 2003. — Vol. 321, N 1–2. — P. 238–247.
93. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / *В.С. Анищенко и др.* // *Усп. физ. наук.* — 1999. — Vol. 169, N 1. — P. 7–38.
94. *Nagy M., Daruka I., Vicsek T.* New aspects of the continuous phase transition in the scalar noise model (SNM) of collective motion // *Physica A.* — 2007. — Vol. 373. — P. 445–454.
95. *Gönci B., Nagy M., Vicsek T.* Phase transition in the scalar noise model of collective motion in three dimensions // *Eur. Phys. J.* — 2008. — Vol. 157, N 1. — P. 53–59.
96. *Moussaïd M., Garnier S., Theraulaz G., Helbing D.* Collective information processing and pattern formation in swarms, flocks, and crowds // *Topics in Cognitive Science.* — 2009. — P. 469–497.
97. *Moussaïd M., Helbing D., Theraulaz G.* How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2011. — Vol. 108, N 117. — P. 6884–6888.
98. Протесты в Минске: как это было. — URL: <http://www.besttoday.ru/read/857.html> (дата обращения 6.07.2011).
99. *Смирнов Д.Н.* Манипулятивные технологии и их применение в условиях смены политического режима: опыт оранжевой революции на Украине: автореф. дисс... канд. полит. наук. — Н. Новгород: ННГУ, 2008. — 27 с.
100. URL: <http://www.community-democracies.org/> (дата обращения 6.07.2011).
101. *A Diplomat's handbook for democracy development support.* — URL: <http://www.diplomatshandbook.org/pdf/Diplomat's%20Handbook.pdf> (дата обращения 6.07.2011).

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Словохотов Юрий Леонидович — д-р хим. наук, зав. лабораторией, хим. факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ☎ (495) 939-54-34, ✉ slov@phys.chem.msu.ru; вед. науч. сотрудник, Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, г. Москва, ☎ (499) 135-93-04.