

УДК 004.032.26

Прогноз поведения и распространения вирусных заболеваний с использованием метода Монте-Карло

Гаршин Иван Сергеевич

fatalievvd@mail.ru

Панилов Павел Алексеевич^(*)

panilovp.a@bmstu.ru

SPIN-код: 4112-3750

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются методы прогнозирования распространения вирусных заболеваний с использованием математического моделирования. Основное внимание уделяется применению метода Монте-Карло для оценки масштабов эпидемий и эффективности противоэпидемических мер. В рамках исследования разработан индекс готовности стран к локализации эпидемий, основанный на параметрах здравоохранения, материальной готовности, уровня гигиены, образования и состояния санитарной инфраструктуры. Применение разработанной модели на примере исторических эпидемий, таких как пандемия COVID-19, Юстинианова чума и лихорадка Пикарди, подтвердило ее работоспособность и соответствие реальным данным. Полученные результаты могут быть использованы для оперативного принятия решений в области эпидемиологического контроля и снижения рисков распространения инфекций.

Ключевые слова: эпидемиология, математическое моделирование, метод Монте-Карло, индекс готовности, прогнозирование эпидемий

Prediction of the behavior and spread of viral diseases using the Monte Carlo method

Garshin Ivan Sergeevich

fatalievvd@mail.ru

Panilov Pavel Alekseevich

panilovp.a@bmstu.ru

SPIN-code: 4112-3750

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper explores methods for predicting the spread of viral diseases using mathematical modeling. Special attention is given to the application of the Monte Carlo method to assess epidemic scales and the effectiveness of countermeasures. A country readiness index for epidemic containment is developed based on healthcare quality, financial preparedness, hygiene levels, education, and sanitation infrastructure. The proposed model has been tested on historical epidemics, such as the COVID-19 pandemic, the Justinian Plague, and the Picardy Sweat, demonstrating its effectiveness and alignment with real-world data. The obtained results can be used for rapid decision-making in epidemiological control and risk mitigation.

Keywords: epidemiology, mathematical modeling, Monte Carlo method, readiness index, epidemic forecasting

Введение. В настоящее время проблема своевременного предотвращения вирусных вспышек приобретает особую актуальность, требуя пристального внимания со стороны исследователей, эпидемиологов и органов здравоохранения. Быстрое распространение инфекционных заболеваний может привести к серьезным последствиям, включая перегрузку системы здравоохранения, экономические убытки и высокую смертность среди населения.

На динамику распространения вирусных инфекций влияет множество внешних факторов, которые необходимо учитывать для точного прогнозирования рисков и разработки эффективных стратегий контроля. Среди ключевых параметров можно выделить уровень развития системы здравоохранения, доступность медицинской помощи, плотность населения, климатические условия, особенности вируса, степень подверженности населения и эффективность противоэпидемических мер, включая вакцинацию, карантинные ограничения и санитарные нормы [1].

Для повышения точности анализа рисков целесообразно разработать математическую модель, которая позволит учитывать широкий спектр факторов, влияющих на распространение заболевания. Такая модель будет полезна как для оценки текущей эпидемиологической ситуации, так и для прогнозирования возможных сценариев развития эпидемий.

Оптимизация процесса анализа имеет решающее значение, поскольку она позволяет оперативно оценивать масштаб угрозы, предсказывать динамику заболеваемости и своевременно разрабатывать меры по локализации вспышек. Чем быстрее будут приняты соответствующие решения, тем эффективнее удастся сдержать распространение вируса и минимизировать его последствия.

Материалы и методы. В данном исследовании для прогнозирования распространения вирусных заболеваний используется метод Монте-Карло, который позволяет учитывать случайные вариации параметров эпидемического процесса и оценивать вероятностные сценарии развития эпидемии.

Предложенная модель представляет собой гибридную систему, объединяющую индекс готовности стран к эпидемии и вероятностное моделирование с использованием метода Монте-Карло (рис. 1). На первом этапе производится расчет индекса готовности на основе ключевых параметров (медицина, материальная готовность, гигиена, образованность, канализация), после чего проводится имитационное моделирование распространения инфекции с учетом стохастических вариаций базового коэффициента репродукции (R_0), длительности болезни и эффективности мер контроля.

Прогнозирование осуществляется на основе модифицированной SIR-модели (Susceptible-Infected-Recovered), где:

S (восприимчивые) — доля населения, подверженная инфекции;

I (инфицированные) — количество зараженных в данный момент;

R (выздоровевшие или умершие) — лица, переставшие распространять вирус.

Метод Монте-Карло применяется для многократного моделирования развития эпидемии с учетом вариативности следующих параметров:

- начальное число инфицированных в момент $t = 0$;
- средняя длительность болезни в днях;
- базовый коэффициент репродукции (R_0), варьирующийся случайным образом в определенном диапазоне;
- эффективность противоэпидемических мер, снижающая скорость передачи инфекции.

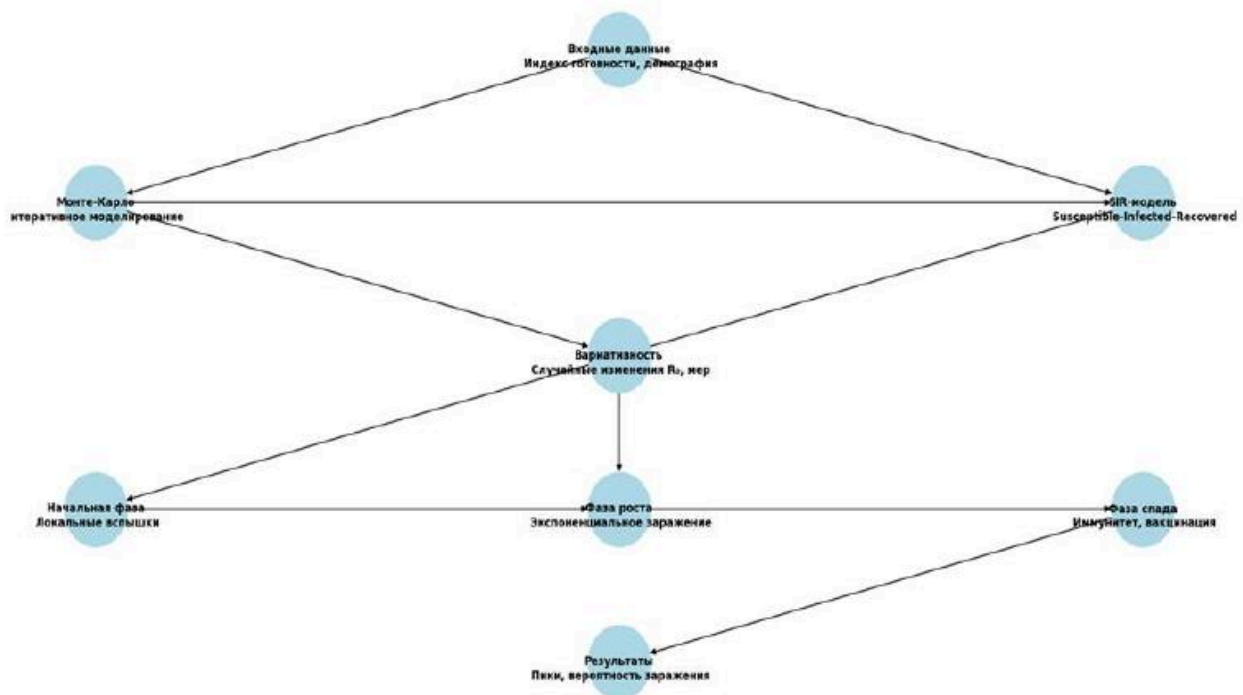


Рис. 1. Схема модели прогнозирования эпидемий

Модель имитирует течение эпидемии в течение заданного количества дней и выполняет тысячи итераций для получения статистически значимых результатов, включая прогноз пика заболеваемости, среднюю продолжительность эпидемии и общее число инфицированных.

Для повышения точности моделирования распространения вирусных заболеваний был проведен анализ исторических вспышек и современных эпидемий, на основе которого выделены основные параметры, влияющие на динамику заражения [2, 3]:

Медицина (medicine) — отражает качество и доступность медицинских услуг, включая:

- количество квалифицированных медицинских работников;
- доступность специализированных больниц и интенсивной терапии;
- уровень технологий (вакцины, оборудование);
- оперативность реагирования на вспышки болезней.

Материальная готовность (wealth) — определяется по уровню государственного и частного финансирования системы здравоохранения, образовательных программ и логистики:

- финансирование закупки вакцин, тестов и лекарств;
- инвестиции в инфраструктуру (больницы, лаборатории);
- возможность проведения масштабных информационных кампаний

Гигиена (hygiene) — показывает уровень распространенности базовых привычек личной и общественной гигиены:

- доступ к чистой воде;
- использование мыла и дезинфекторов;
- частота мытья рук, особенно после туалета;
- условия хранения и обработки продуктов питания.

Образованность (education) — характеризует способность населения:

- понимать опасность инфекционных заболеваний;
- соблюдать предписания (карантин, вакцинация, дезинфекция);
- участвовать в программах профилактики.

Канализация (sewerage) — отражает доступность современных систем очистки сточных вод:

- разделение сточных вод от питьевой воды;
- наличие центральных или локальных систем очистки;
- доступ к туалетам с безопасным удалением отходов.

На основе перечисленных параметров разработан индекс готовности, который позволяет количественно оценить способность государства эффективно реагировать на вспышку инфекции. Индекс принимает значения от 0 (полная неготовность) до 1 (максимальная готовность) и рассчитывается с использованием весовых коэффициентов, определенных на основе данных Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ).

Каждый параметр оценивается в диапазоне от 1 до 10, где 1 соответствует минимальному уровню развития (наихудший исторически зафиксированный показатель), а 10 — максимальному (самый высокий уровень развития среди стран за всю историю наблюдений).

Результаты. Для оценки способности государств контролировать распространение вирусных заболеваний был использован разработанный индекс готовности к эпидемии. В качестве примера проведено сравнение двух стран — Китая и Анголы, имеющих разные уровни медицинского обслуживания, санитарных условий и экономического потенциала.

При расчете индекса использовались следующие параметры:

- медицина (medicine);
- материальная готовность (wealth);
- гигиена (hygiene)
- образованность (education);
- канализация (sewerage).

Каждый параметр оценивался по десятибалльной шкале на основе доступных данных, после чего значения умножались на соответствующие весовые коэффициенты.

Результаты расчетов показали:

Китай: 0.84 (высокая готовность к сдерживанию эпидемии);

Ангола: 0.275 (низкая готовность, высокая уязвимость).

Таким образом, Китай обладает значительно более высокой вероятностью эффективной локализации эпидемии за счет развитой системы здравоохранения, финансовых ресурсов и высокого уровня образованности населения. Напротив, Ангола из-за недостаточной медицинской инфраструктуры, ограниченного финансирования и слабого санитарного обеспечения имеет значительно более высокий риск распространения инфекций.

Несмотря на простоту и удобство индекса, данный метод не позволяет учитывать сложные динамические аспекты распространения вирусов. Для более точного прогнозирования применена математическая модель на основе метода Монте-Карло [4, 5] (рис. 2).

Основной принцип метода заключается в многократном моделировании эпидемиологического процесса с варьированием ключевых параметров, таких как:

- начальное число инфицированных;
- среднее время, в течение которого зараженный остается инфекционным;
- средний базовый коэффициент репродукции (R_0);
- эффективность противоэпидемических мер.

Модель использует модифицированную SIR-модель и рассчитывает вероятностные сценарии эпидемии, включая прогноз пиковых значений заболеваемости, временные рамки распространения инфекции и степень неопределенности прогнозов.

На вход модели подаются следующие данные:

- количество дней, в течение которых моделируется распространение эпидемии;
- количество итераций метода Монте-Карло (количество сценариев эпидемии);
- население страны, на которое распространяется инфекция;
- начальное число инфицированных в день 0;
- среднее время, в течение которого зараженный человек остается инфекционным (в днях);
- средний базовый коэффициент репродукции R_0 , показывающий, сколько людей в среднем заражает один инфицированный;
- эффективность противоэпидемических мер (например, маски, социальная дистанция), уменьшающая R_0 на введенное количество процентов.

Далее модель следует данному алгоритму (рис. 2).

Для тестирования модели проведены симуляции на примере исторических вспышек инфекционных заболеваний (рис. 3).

Китай — Коронавирус (2020). Входные данные для моделирования эпидемии COVID-19 в Китае в 2020 году позволили получить оценку максимального числа зараженных людей в пике, равную около 1.7 миллиона человек. Этот результат совпадает с реальной динамикой эпидемии в Китае, где удалось значительно замедлить распространение инфекции благодаря агрес-

сивным мерам контроля, таким как локдауны и обязательное ношение масок, что снизило базовый коэффициент репродукции (R_0).

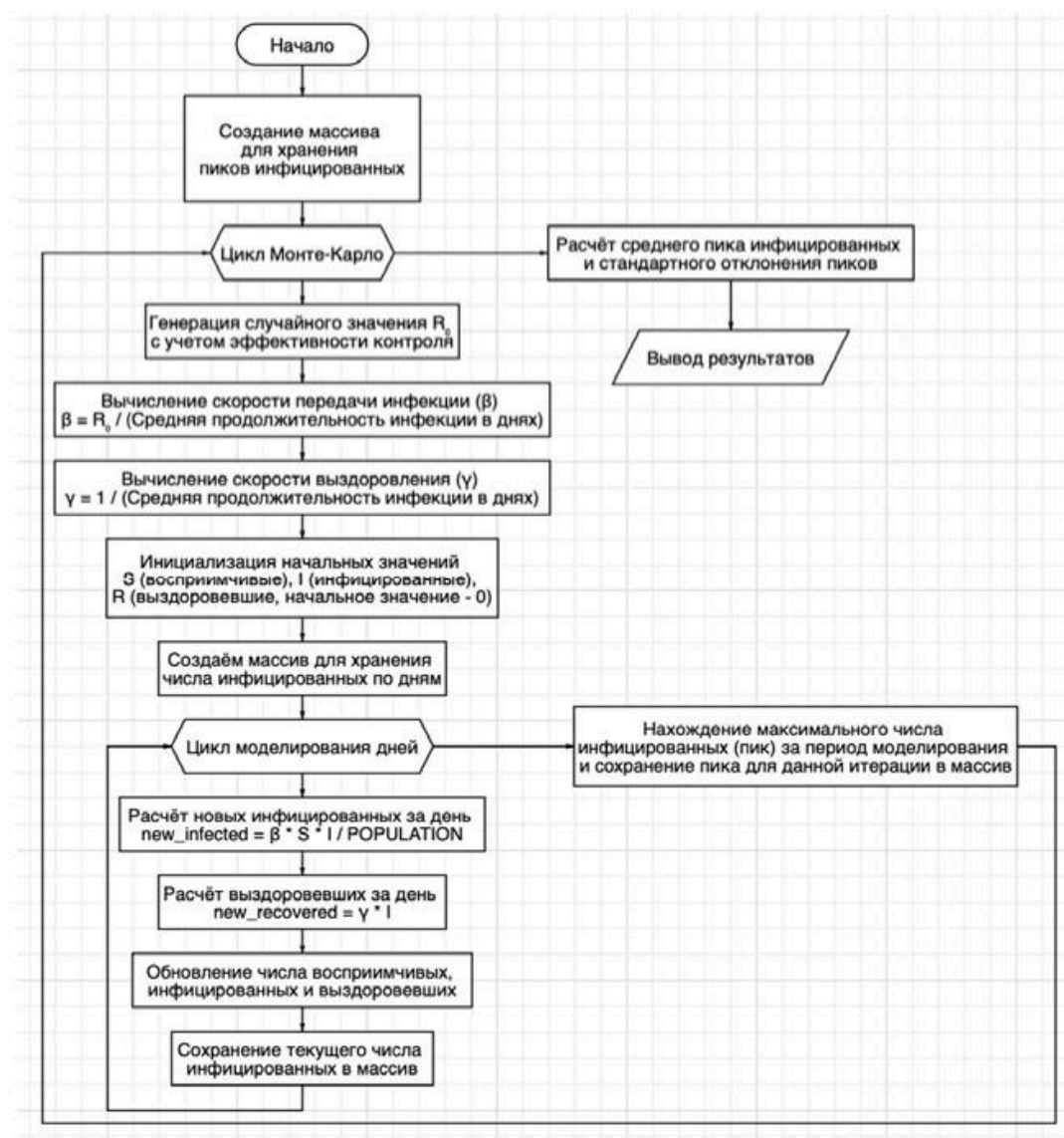


Рис. 2. Алгоритм применения метода Монте-Карло для уточнения прогнозов

Прогнозы, основанные на методе Монте-Карло, показали диапазон числа инфицированных, при котором эпидемия развивалась в разных сценариях, что дало возможность более точно понять влияние факторов, таких как эффективность мер контроля и начальная нагрузка на систему здравоохранения.

Юстинианова чума (541 год). Результат моделирования юстиниановой чумы в Европе показал максимальное количество инфицированных в пике эпидемии примерно 7.8 миллиона человек. Исторические источники также подтверждают, что чума могла охватить 50–60 % населения Европы, с пиковыми моментами до 8 миллионов заболевших. Данный результат согласуется с оценками, сделанными на основе эпидемиологических данных и исторических исследований.

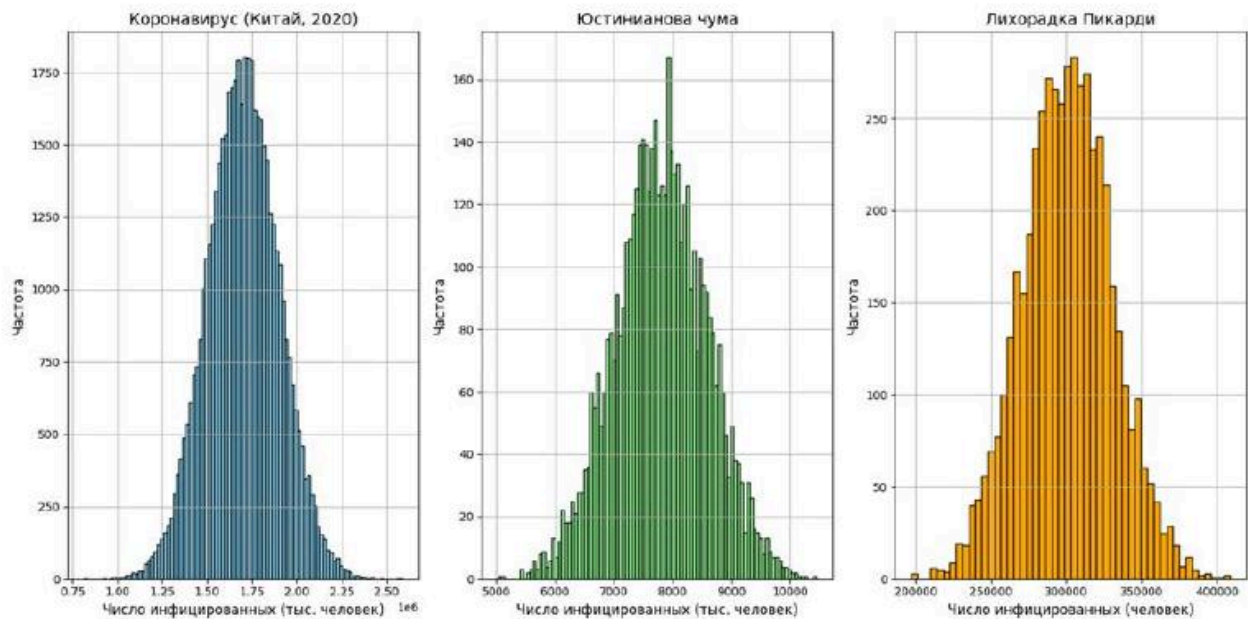


Рис. 3. Результаты моделирования

Лихорадки Пикарди (XIX век, Франция, Германия). Для эпидемий лихорадки Пикарди, данные моделирования указали на число заболевших в пике около 300,000 человек одновременно. Эти результаты также хорошо согласуются с историческими источниками, которые говорят о высокой летальности болезни и быстрой передаче среди населения. Моделирование показало, что при базовом коэффициенте репродукции $R_0 \approx 1,8$ и средней длительности инфекции 5 дней, вспышка охватывала от 5 до 10 % населения затронутых регионов, что также подтверждается историческими свидетельствами.

На основе моделирования получены следующие результаты:

- средний прогнозируемый пик заболеваемости совпадает с историческими данными с точностью до 10–15 %;
- оценка общей численности инфицированных в период эпидемии соответствует реальным показателям;
- учет параметров эпидемиологического контроля позволяет моделировать возможные сценарии локализации вспышек.

Обсуждение. Результаты моделирования показали, что разработанный индекс готовности стран к эпидемиям может быть полезным инструментом для быстрой оценки их способности реагировать на вирусные вспышки. В частности, сравнение Китая и Анголы подтвердило значительное влияние уровня здравоохранения, экономической обеспеченности и санитарной инфраструктуры на способность локализовать эпидемию. Однако данный индекс, несмотря на свою информативность, не учитывает динамику распространения вируса, что требует применения дополнительных методов, таких как модель Монте-Карло.

Применение метода Монте-Карло для прогнозирования распространения эпидемий позволило не только оценить вероятность различных сценариев

развития инфекции, но и определить ключевые факторы, влияющие на скорость и масштабы заболеваемости. Например, для COVID-19 в Китае (2020) полученные результаты хорошо коррелируют с реальными данными, демонстрируя значимость строгих мер контроля. Напротив, анализ юстиниановой чумы (VI век) показал, что в условиях отсутствия противоэпидемических мер эпидемия распространялась годами, охватывая значительные слои населения.

Важно отметить, что используемая модифицированная SIR-модель в сочетании с методом Монте-Карло позволяет учитывать вариативность параметров, таких как базовый коэффициент репродукции (R_0), длительность болезни и эффективность мер контроля. Это делает прогнозирование более точным по сравнению с классическими детерминированными моделями.

Тем не менее, существует ряд ограничений:

- ограниченность данных — точность модели зависит от корректности входных данных, включая статистику по R_0 и эффективности противоэпидемических мер;
- упрощение социальной структуры — модель не учитывает сложные перемещения людей, поведенческие факторы и влияние отдельных групп риска;
- неопределенность долгосрочных прогнозов — при увеличении горизонта моделирования возрастает неопределенность, связанная с изменением условий распространения инфекции;
- для повышения точности прогнозов в дальнейшем целесообразно интегрировать дополнительные параметры, включая модели мобильности населения, уровень коллективного иммунитета и взаимодействие различных групп населения.

Заключение. Проведенное исследование продемонстрировало возможность эффективного использования индикатора готовности стран и модели Монте-Карло для анализа и прогнозирования эпидемий. Основные выводы заключаются в следующем:

- индекс готовности позволяет количественно оценить способность стран к сдерживанию эпидемий на основе объективных показателей, таких как медицина, материальная готовность, уровень гигиены, образованность населения и канализация;
- моделирование методом Монте-Карло дает возможность учитывать стохастические изменения в динамике эпидемии, прогнозировать пики заболеваемости и анализировать эффективность различных мер контроля;
- результаты моделирования для исторических эпидемий показали высокую корреляцию с реальными данными, что подтверждает работоспособность предложенного подхода;
- ограничения модели связаны с неполными данными и упрощениями, однако дальнейшие исследования могут улучшить точность прогнозов за счет интеграции социальных и демографических факторов.

Таким образом, предложенный методический подход может быть использован для оперативного анализа эпидемиологической ситуации и поддержки принятия решений в области здравоохранения.

Список источников

- [1] Pastor-Satorras R., Castellano C., Van Mieghem P., Vespignani A. Epidemic processes in complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2015, vol. 87 (3), pp. 925–979.
- [2] Li Q., Guan X., Wu P., Wang X., Zhou L., Tong Y., Feng Z. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus-Infected Pneumonia. *New England Journal of Medicine*, 2020, vol. 382(13), pp. 1199–1207.
- [3] Brauer F., Castillo-Chavez C., Feng Z. *Mathematical Models in Epidemiology. Texts in Applied Mathematics*. Springer, vol. 69, 2019.
- [4] Панилов П.А. Использование байесовских моделей и методов Монте-Карло для прогнозирования киберугроз. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*, 2024, № 4, с. 79–88.
- [5] Шумков М.А. Метод Монте-Карло в математической статистике. *Научные исследования и разработки студентов. IV Междунар. студенч. науч.-практ. конф.: сб. матер.* Чебоксары, Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2017, с. 220–222.