

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ НА ГРУППУ КЛЮЧЕВЫХ ОТДЕЛЕНИЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МЕДИЦИНСКОГО ЦЕНТРА В ХОДЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ РАЗНОРОДНОГО ПОТОКА ПАЦИЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ ОСТРОГО КОРОНАРНОГО СИНДРОМА¹

А.А. Функнер, А.Н. Яковлев, С.В. Ковальчук (Санкт-Петербург)

При имитационном моделировании работы медицинского центра необходимо учитывать особенности функционирования и взаимодействия разных отделений, большое разнообразие событий, роли разных агентов, их опыт и знания. С появлением и развитием персонализированной медицины [1] и ценностно-ориентированного подхода [2] в здравоохранении стали учитывать индивидуальные особенности каждого пациента. Пациенты с одинаковым диагнозом могут иметь различные пути и методы лечения в связи с наличием у них разных сопутствующих заболеваний и непохожих историй болезни. Детальному имитационному моделированию также препятствует низкое качество медицинских электронных записей, слабая формализация и высокий уровень неопределенности медицинских знаний. В данной работе описывается один из способов имитационного моделирования нагрузки на группу отделений специализированного медицинского центра ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России в ходе обслуживания разнородного потока пациентов на примере острого коронарного синдрома.

Имитационное моделирование широко используется для исследований в области медицины и здравоохранения [3]. Часто имитационное моделирование применяют для анализа загруженности лечебно-профилактического учреждения (ЛПУ) или определенного его отделения [4], для определения эффективности стратегии управления ЛПУ (использование ресурсов, загруженность персонала, составление оптимального расписания дежурств) [5, 6]. Несмотря на большое количество проведенных исследований, в этой области остались нерешенные задачи. Авторы [3] провели обзор научных статей, посвященных моделированию ЛПУ, включающих в себя несколько активно взаимодействующих отделений, и сделали вывод, что в большинстве существующих исследованиях взаимодействие между отделениями не учитывается или носит случайный характер.

Целью данного исследования является моделирование нагрузки медицинского центра, как системы взаимодействующих отделений. При этом рассматривается разнородный поток пациентов, который моделируется на основе различных групп клинических путей.

В данной работе описывается эксперимент с имитационной моделью для ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России. Медицинский центр предоставил 3434 электронные медицинские карты пациентов с диагнозом поступления острый коронарный синдром (ОКС) с 2010 по 2015 года. Электронная медицинская карта содержит описание событий, которые происходили с пациентов во время его госпитализации в ЛПУ (поступление в стационар, взятие анализов, осмотры врачом, операции, переводы из отделения в отделение). Для пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями можно выделить группу ключевых отделений в медицинском центре: отделение приемного покоя (ПО), кардиологическое отделение №1 и №2 (КО №1 и КО №2), отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения №1 и №2 (РХМДиЛ №1 и РХМДиЛ №2), отделение анестезиологии и реанимации №1 и №2 (ОАиР №1 и ОАиР №2). На основе медицинских электронных карт для каждого пациента можно составить его последовательность переводов из отделения в отделения. Можно предположить, что пациент перемещается в определенном порядке из отделения в отделение вследствие тяжести его состояния, особенностей лечения и скорости восстановления. Все

¹ Исследования реализованы в рамках проекта «Высокопроизводительные вычислительные технологии усвоения данных в гибридных динамических моделях для прогнозирования поведения сложных систем», выполняемого при поддержке Российского научного фонда (соглашение №14-11-00823).

рассматриваемые пациенты имеют одинаковые диагнозы, однако значительно отличаются по последовательности и времени пребывания в разных отделениях.

С помощью алгоритмов кластеризации и анализа кластерных метрик были выделены 10 значимых кластеров пациентов по перемещениям между отделениями. Ранее подобным образом были выделены клинические пути и построены схемы потоков пациентов для выборки пациентов планового стентирования [7, 8]. На рис. 1 показан наиболее детерминированный кластер пациентов (кластер №5) и кластер с высокой вариабельностью путей (кластер №3). Пути пациентов внутри кластера №5 почти не варьируются и однозначно можно выделить клинический путь (последовательность наиболее частых перемещений) для этого кластера.

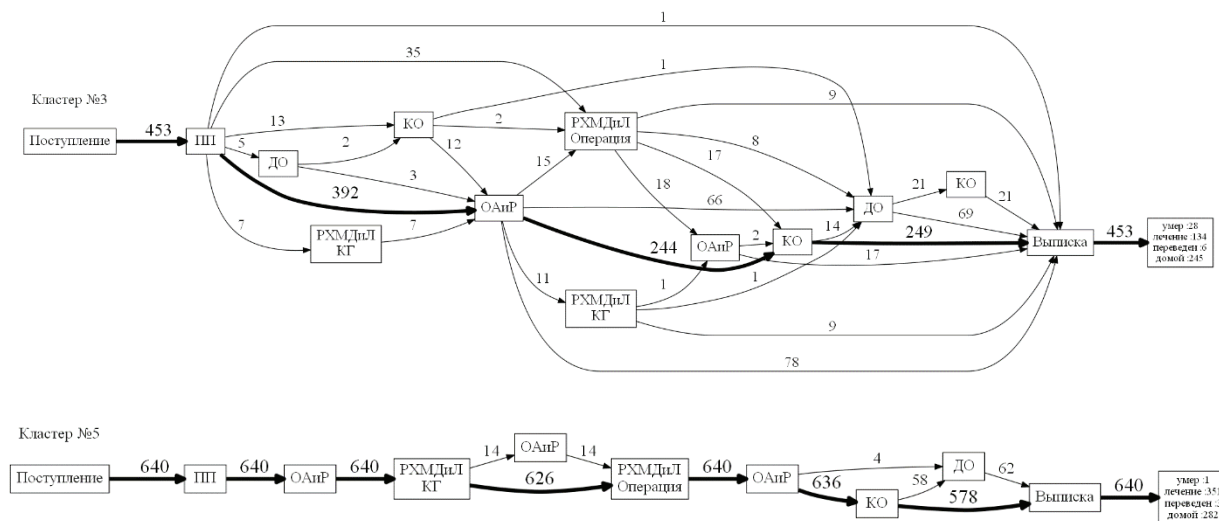


Рис. 1. Схема потока пациентов для кластера №3 и №5

Специалисты из медицинского центра ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» изучили полученные кластеры пациентов и интерпретировали каждый кластер. Кластер №5 (рис. 1) представляет пути пациентов, лечение которых в наибольшей степени соответствует медицинским рекомендациям. Другие кластеры в меньшей степени согласуются с медицинскими рекомендациями и содержат множество вариаций путей пациентов. Многие кластеры имеют схожие этапы лечения и отличаются лишь тем, были ли пациенты отправлены на дополнительную реабилитацию в другие отделения (ДО) или нет. Кластера с высокими показателями смертности имеют высокую вариабельность путей – показатели смертности в кластере №3 и №5 отличаются на порядок (0,06 и 0,002).

В основе имитационного моделирования медицинского центра были взяты методы дискретно-событийного моделирования и теории очередей. Для реализации эксперимента был использован фреймворк SimPy (<https://simpy.readthedocs.io>) для процессориентированного дискретно-событийного моделирования. На рис. 2 показаны архитектура реализованной дискретно-событийной модели. Оба генератора создают ежедневный входной поток пациентов, согласно собранной статистике по медицинским картам. Генератор фоновых потоков порождает некоторое количество пациентов, поступающих ежедневно в рассматриваемые отделения с другими диагнозами (не ОКС), но нуждающихся в использовании тех же ресурсов. Согласно вероятностям переходов, вычисленным из схем потоков для каждого кластера, пациенты могут оставаться или быть переведены в другие отделения. Ограниченными ресурсами в рассматриваемом медицинском центре является число операционных и ангиографов, необходимых для проведения коронарографии и операции. Пациент не может быть переведён на операцию в РХМДиЛ, если свободных ресурсов нет. Также было проведено несколько экспериментов, в которых менялись следующие параметры моделирования: количество ограниченных ресурсов и коэффициент

масштабирования входного потока. В результате эксперимента были собраны статистике для пациентов (период пребывания в стационаре – ППС, период пребывания в каждом отделении), отделения (нагрузка на отделение) и всего медицинского центра в целом (размеры очередей на ресурсы, среднее пребывание в очереди, загруженность медицинского центра и т.п.).

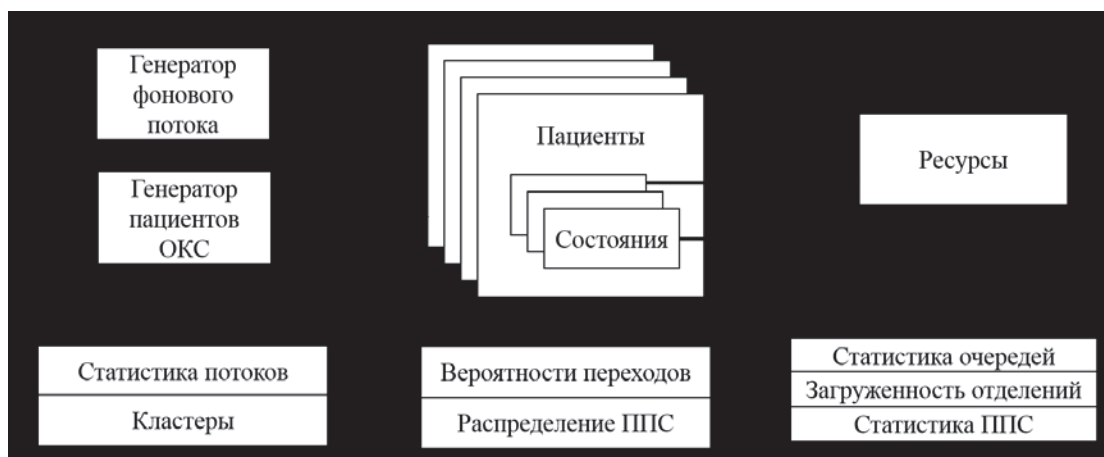


Рис. 2. Реализация имитационной модели медицинского центра. ППС – период пребывания в стационаре

Некоторые результаты экспериментов показаны на рис. 3. На рис. 3,А приведены соотношения наблюдаемых и модельных значений для периода пребывания в стационаре в форме квантильного биплота. При этом рассматривается несколько сценариев для входного потока пациентов: моделирование всего потока с учетом их кластеризации (разнородный поток), моделирование потока без учета кластеризации (однородный поток) и моделирование потоков для кластеров №2, №3 и №5 в отдельности (выбранные кластеры содержат 58% от числа всех пациентов). При переходе от разнородного потока к однородному значение критерия согласия Колмогорова снижается на 51% (с 0,255 до 0,124).

Предложенная имитационная модель позволяет оценить использование ресурсов на практике. Для примера был проведен эксперимент с разными коэффициентами потока пациентов (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 1,0 – 3434 пациента участвуют в эксперименте) и доступными операционными для проведения коронарографии и операций. Модельное время эксперимента – 60 дней. Каждый сценарий для определенного набора параметров был запущен 100 раз. На рис. 3,Б и 3,В показаны результаты эксперимента: процентная доля событий, который находились в очереди когда-либо во время эксперимента, и среднее ожидания в очереди. Согласно полученным результатам, можно предположить, что увеличение числа операционных с 3-х до 4-х позволит существенно снизить время ожидания пациентов в очереди. Подобные имитационные модели могут быть встроены в системы поддержки принятия решений (СППР) в медицине и здравоохранении.

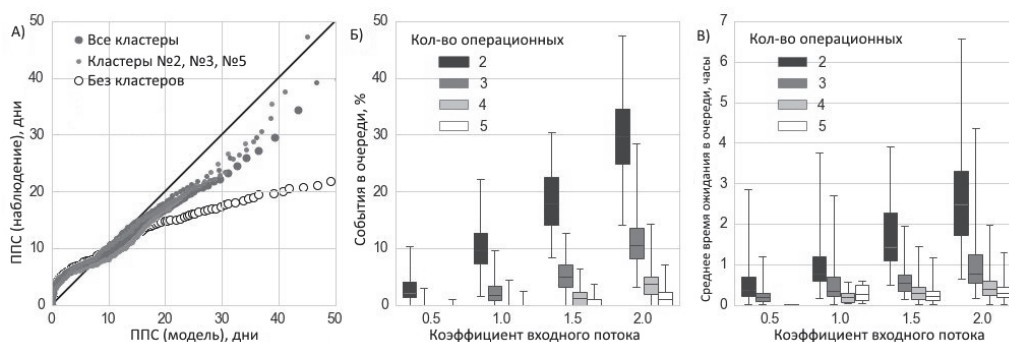


Рис. 3. Результаты эксперимента. А) – квантильный биплот периода пребывания в стационаре (модель/наблюдение); Б) – процентный показатель событий в очереди; В) – среднее время ожидания во время эксперимента

Предложенный подход имитационного моделирования предполагает предварительный анализ данных с выявлением их особенностей и структуры. Это позволяет провести более детальное моделирование и использовать модель для предсказаний, например, заблаговременному планированию ресурсов. Результаты эксперимента для пациентов с ОКС показывают, что, принимая во внимание особенности структуры данных (кластеры клинических путей), можно получить результаты, значимо отличающиеся от результатов, полученных лишь на основе количественных показателей входных данных.

Разработанные методы автоматического определения клинических путей и структуры потока пациентов, а также архитектура имитационной модели (рис. 2) могут быть внедрены как дополнительные модули к существующим медицинским информационным системам или СППР. Такой модуль позволит в фоновом режиме обчислять разнообразные возможные сценарии развития событий в ЛПУ и давать рекомендации по планированию ресурсов или модификации расписания персонала. В будущем планируется усложнить модель, включив в неё пространственную компоненту (например, с использованием многоагентных моделей) и совместив с моделью предсказания развития клинического эпизода пациента [9-11].

Литература

1. **Schleidgen S., Klingler C., Bertram T., Rogowski W.H., Marckmann G.** What is personalized medicine: sharpening a vague term based on a systematic literature review, *BMC Med. Ethics*. 14 (2013) 55. doi:10.1186/1472-6939-14-55.
2. **Brown G.C.** Value-based medicine: the new paradigm., *Curr. Opin. Ophthalmol.* 16 (2005) 139–40. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15870569>.
3. **Vanberkel P.T., Boucherie R.J., Hans E.W., Hurink J.L., Litvak N.** A survey of health care models that encompass multiple departments, 2009. <http://doc.utwente.nl/67545/>.
4. **A. Djanatliev, F. Meier,** Hospital processes within an integrated system view: A hybrid simulation approach, in: 2016 Winter Simul. Conf., IEEE, 2016. P. 1364–1375. doi:10.1109/WSC.2016.7822190.
5. **J.K. Cochran, A. Bharti.** Stochastic bed balancing of an obstetrics hospital., *Health Care Manag. Sci.* 9 (2006) 31–45. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16613015>.
6. **Day T., Chi A., Rutberg M., Zahm A., Otarola V., Pasquariello C.** Evaluating Strategies for Addressing the Variation of Post-Surgical Inpatient Census with Discrete Event Simulation, *Simul. Healthc.* 8 (2013) 529. doi:10.1097/01.SIH.0000441576.89071.ea.
7. **Функнер А.А., Ковальчук С.В.** Классификация пациентов для задач поддержки принятия решений в рамках ценностно-ориентированного подхода, Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание http://kmu.ifmo.ru/collections_article/5091/klassifikaciya_pacientov_dlya_zadach_podderzhki_prinyatiya_resheniy_v_ramkah_cennostno-orientirovannogo_podhoda.htm.
8. **Функнер А.А., Ковальчук С.В.** Гибридное моделирование клинических случаев планового стентирования, Альманах научных работ молодых ученых XLVI научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. Том 6. Электронное издание http://research.ifmo.ru/file/stat/194/sbornik_almanakh_tom_6.pdf.
9. **Castellani B., Rajaram R., Buckwalter J.G., Ball M., Hafferty F.** Place and Health as Complex Systems, Springer International Publishing, Cham, 2015. doi:10.1007/978-3-319-09734-3.
10. **Kovalchuk S.V., Krikunov A.V., Knyazkov K.V., Boukhanovsky A.V.** Classification issues within ensemble-based simulation: application to surge floods forecasting, *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2016.
11. **Krikunov A.V., Bolgova E.V., Krotov E., Abuhay A. N., Kovalchuk S. V.** Complex data-driven predictive modeling in Yakovlev personalized clinical decision support for Acute Coronary Syndrome episodes, *Procedia Comput. Sci.*, Vol. 80. P. 518–529, 2016.