А.А. ОВАНЕСЯН,
аспирант, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, Россия,
e-mail: ovanesyan@interin.ru, ORCID: 0000-0003-2252-6356
А.В. ЛЕВИЧЕВ,
аспирант, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, Россия,
e-mail: levichev@interin.ru, ORCID: 0000-0003-4060-6309
Д.В. БЕЛЫШЕВ,
к.т.н., Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, Россия,
e-mail: belyshev@interin.ru, ORCID: 0000-0002-0437-4814

АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И ЛЕЧЕБНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

УДК: 61:007 *DOI: 10.37690/1811-0193-2020-5-17-23*

Ованесян А.А., Левичев А.В., Белышев Д.В. ***Алгоритмы решения задач составления расписания диагностических и лечебных мероприятий в медицинской информационной системе*** *(Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский, Россия)*

Аннотация: Рассмотрены постановка и алгоритмы решения задачи о составлении расписания диагностических и лечебных мероприятий, назначаемых пациентам в медицинской информационной системе. Решена задача об оптимальном многодневном маршруте оказания лечебных процедур пациенту с учетом расписания работы врачей. Рассмотрены случаи одно- и многодневного обслуживания. Дано описание алгоритмов и выполнено их сравнение.

Ключевые слова: *составление расписания, алгоритмы формирования маршрута, медицинское обслуживание, выбор последовательности направлений, пункты обслуживания, оптимальный маршрут.*

UDC: 61:007

Ovanesyan A.A., Levichev A.V., Belyshev D.V. ***Algorithms for solving problems of scheduling diagnostic and therapeutic measures in a medical information system*** *(Ailamazyan Program Systems Institute of RAS, Pereslavl-Zalesski, Russia)*

Abstract. The statements and algorithms for solving the problem of scheduling medical examinations and treatment of patients in a medical information system are considered. The problem of the optimal multi-day route for the provision of medical procedures to a patient is solved, taking into account the doctors' work schedule. Cases of one- and multi-day service are considered. A description of the algorithms is given and their comparison is performed.

Keywords: *scheduling, routing algorithms, medical care, choice of sequence of appointments, service points, optimal route.*

ВВЕДЕНИЕ

Существенную поддержку в оказании медицинской помощи в современной больнице обеспечивает применение информационных технологий. В связи с тем, что в медицинской организации достаточно часто требуется массовое обслуживание пациентов, повышение эффективности использования ресурсов достигается составлением расписаний и распределения лечебных и диагностических мероприятий. Данная задача является достаточно трудоемкой и ее решение с помощью медицинской информационной системы (МИС) приводит к более равномерной нагрузке работающего персонала и уменьшает потери времени пациента при лечении, что, в свою очередь, снижает издержки и повышает качество лечения.

© А.А. Ованесян, А.В. Левичев, Д.В. Белышев, 2020 г.

Задачи составления расписаний обслуживания ставятся в самых разных областях. Алгоритмы решения их достаточно подробно разобраны, в частности, рассмотрены в [1, 2]. В [3, 4] поставлена задача составления обслуживания группы пациентов в медицинской организации с учетом случайных факторов.

В работе [5] описаны два алгоритма формирования маршрутов пациентов, с учетом их приоритетов. Сделан вывод, что минимизация простоя медицинского оборудования снижает среднюю продолжительность ожидания обслуживания. В исследовании [6] поставлена аналогичная задача, где в качестве критериев оптимальности выступают экономические показатели лечебного учреждения, учитываются предпочтения врача.

В исследовании [7] поставлена задача составления расписания, проведено сравнение двух алгоритмов ее решения: методом ветвей и границ и приближенным способом поиска маршрута. Проведено тестирование и сравнение алгоритмов. По результатам показано, что среднее отклонение приближенного алгоритма от точного для задач больших размерностей приемлемо.

В работе [8] разобран алгоритм с локальным перебором для решения многомерной NP-полной задачи о рюкзаке. Автором отмечается быстродействие данного метода решения.

В работах [9, 10] нами были разобраны алгоритмы распределения врачебных направлений. Критерием оптимальности является минимизация суммарных затрат времени (сумма продолжительности перемещения между кабинетами и продолжительности ожидания приема). Поставлены задачи составления расписаний для одного пациента и для группы пациентов, которые между собой равноправны. Применялся алгоритм решения задачи коммивояжера, поиск начального приближения и улучшение маршрута. В настоящей статье кратко охарактеризуем рассмотренные алгоритмы, приведем описание и примеры еще двух «близоруких» алгоритмов, сделаем их сравнение и опишем реализацию прототипа решения задачи в МИС Интерин PROMIS Alpha [11], разработчик ООО «Интерин технологии».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим медицинскую программу реабилитации, которая может включать в себя массаж, терапию, физические методы реабилитации и другие формы лечебной физкультуры. Они составляют набор лечебных процедур для пациента на один или несколько дней. Требуется найти многодневный маршрут обследования и лечения по условиям сокращения общей продолжительности обслуживания.

Автономный поиск решения для каждого дня делит задачу на локальные подзадачи и дает возможность помимо итогового оптимального маршрута рассчитывать варианты на данный день.

Пусть заданы:

$j = 1, \ldots, n$ – пункты обслуживания (ПО), которые должен пройти пациент в течение одного дня;

τ_j – продолжительность обслуживания в каждом j-ом пункте;

t_j – моменты (расписание приема для каждого ПО), в которые j-ый ПО может принять очередного пациента;

t_0 – момент начала движения пациента.

Через v обозначим индекс маршрута, то есть последовательности прохождения ПО, через δ_{ij} – продолжительность перемещения пациента i-го в j-ый пункт. $\delta_{ii} = \infty$; $\delta_{ij} \neq \delta_{ji}$.

Пусть u_{ij} – управляющее воздействие: направление пациента после прохождения из i-го ПО в j-ый пункт. Оно принимает значение ноль, если пациент не направлен, и единица, если направлен. Поскольку для любого пройденного ПО пациент направляется только в один пункт, то:

$$\sum_i u_{ij} = 1 \; \forall j, \; \sum_j u_{ij} = 1 \; \forall i. \qquad (1)$$

Обозначим через T_{jv} – продолжительность достижения пациентом j-го пункта из заданного начального при выборе v-го маршрута.

В качестве критерия оптимальности выберем общую продолжительность обслуживания пациента, зависящую от выбранного маршрута, T_v:

$$T(v^*) = \min_v T_v. \qquad (2)$$

Общая продолжительность обслуживания состоит из суммарной продолжительности обслуживания во всех пунктах, продолжительности перемещения из одного ПО в другой T_{dv} и продолжительности ожидания приема T_{ov} (3). Так как первая величина не зависит от выбора маршрута, оптимальный путь предполагает достижение минимума двух последних составляющих в общих затратах времени.

$$T_{dv} = \sum_{i,j=1}^{n} \delta_{ij} u_{ij}^v,$$

$$T_{ov} = \sum_{j=1}^{n} T_{ojv}, T_{ojv} =$$

$$= \min_{t_j} \left[t_j - t_0 - \tau_{j-1} - \delta_{j-1j} - \sum_{i=1}^{j-1} T_{oiv} \right],$$

$$T_{o0v} = 0 \ \forall v. \qquad (3)$$

Базовый алгоритм решения состоит из двух частей: поиск начального приближения и улучшение найденного маршрута. Первый этап зависит от значимости дополнительных затрат. Если большие потери времени связаны с перемещением между ПО, то для начального маршрута мы пренебрегаем затратами времени, связанными с ожиданием приема.

Поставленная задача в этом случае окажется классической задачей коммивояжера, решение которой дает оценку снизу для минимального времени обслуживания. Для решения использовался известный метод ветвей и границ, алгоритм Литтла [12], это дает оценку снизу для минимальной продолжительности обслуживания.

Маршрут должен быть разомкнут, так как из конечного ПО не требуется попасть в первый пункт обслуживания. Оценка снизу равна сумме минимальных переходов из каждого ПО в следующий. Для последнего ПО переход не требуется. Поскольку до решения задачи этот последний ПО неизвестен, то для более грубой оценки из общих затрат времени можно вычитать максимальные затраты из минимальных затрат, связанных с переходом в различные ПО:

$$d_i = \min_j \delta_{ij}, j = 1, \ldots, N, j \neq i,$$

$$L^* = \sum_{i=1}^{N} d_i - \max_i d_i. \qquad (4)$$

В общем случае надо учитывать оба фактора потерь времени пациентом. Задача определения оптимального маршрута оказывается сложной многомерной задачей, в которой назначение пункта очередного обслуживания на любой промежуточной стадии влияет на множество допустимых маршрутов на последующих стадиях.

Начальный момент обозначим через t_0. Индексом i отметим ПО, который будет выбран первым. Этот выбор осуществляется по условию минимума суммы двух слагаемых: суммы продолжительности ожидания приема в выбранном пункте и продолжительности перехода в него (суммарных затрат времени) и средней величины суммарных затрат, после окончания обслуживания в выбранном пункте с учетом управления. Этот суммарный показатель может быть вычислен для каждого из ПО по формуле:

$$T_{oj} = (d_{oj} + \frac{1}{n-1} \sum_{k=1, k \neq j}^{n} d_{jk} u_{jk}),$$

$$d_{oj} = \min_{t_j \geq t_0 + \delta_{0j}} (t_j - t_0), d_{jv} =$$

$$= \min_{t_v \geq t_0 + T_j + d_{0j}} (t_v - t_0 - \tau_j - \delta_{jv} - d_{oj}). \qquad (5)$$

Здесь T_{oj} – сумма продолжительности ожидания приема в j-ом пункте и средней продолжительности ожидания приема после того, как пациент пройдет обслуживание в этом пункте, δ_{oj} – продолжительность передвижения из начального местоположения в j-й пункт. Второе слагаемое в правой части равенства (5) представляет собой среднее значение первого слагаемого в случае, если очередным ПО будет выбран j-ый.

После этого находим $i = \text{argmin}_j T_{oj}$, выбираем i-й ПО и исключаем его, число пунктов станет равным n-1, начальный момент $t_i = t_0 + \tau_i + \delta_{i\text{-}1i}$. Расчет повторяем до тех пор, пока все ПО не будут включены в маршрут.

На следующем шаге идет улучшение начального маршрута. Имеющееся приближение необходимо варьировать так, чтобы прирост критерия оптимальности после изменения можно было легко рассчитать. Если новая траектория минимизирует дополнительные затраты пациента на передвижение между кабинетами и ожидание приема, то переходим к данному маршруту и повторяем улучшение. Данный метод соответствует общей схеме «блуждающей трубки» [13].

Вариация достигается заменой местами ПО с последующим и предыдущим, у которого продолжительность ожидания максимальная. Если изменения неэффективны, то ПО для замены выбирают другой, у которого потери времени также велики. Улучшение продолжается до тех пор, пока вариации существенно уменьшают общую продолжительность, и пока она отличается от оценки снизу более чем на заданную величину (например, 10%).

Примеры решения данной задачи с использованием изложенного алгоритма приведены в [9, 10]. Рассмотрим приближенные алгоритмы поиска оптимального решения и сравним результаты.

«БЛИЗОРУКИЙ» АЛГОРИТМ ПРИБЛИЖЕННОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Одним из способов получения приближенного решения является «близорукий» алгоритм, где на каждом шаге выбирают тот ПО, для которого потери времени на передвижение и ожидание минимальны, то есть:

1. Для момента времени t, в котором пациент готов к проведению обслуживания, и заданных оставшихся не пройденными ПО (j = 1, 2,...m), считаем суммы «потерь» $D_j(t)$.

2. Назначаем тот ПО, для которого величина $D_j(t)$ оказалась минимальной.

Может возникнуть ситуация, когда пациент не сможет попасть в течение одного дня в тот или иной ПО, если число слотов (талонов) на обслуживание для этого пункта мало, и в очередной момент готовности к обслуживанию талоны закончились. Поэтому, если потери времени для двух маршрутов одинаковы, то целесообразно предпочесть решение о назначении того ПО, у которого осталось меньше талонов.

Пример. Рассмотрим близорукий алгоритм для 3-х ПО. Момент готовности к обслуживанию 8:00, начальное место пребывания обозначим через P_0.

Таблица 1

Пункты обслуживания

ПО P_j	τ_j	t_j
P_1 Врач-психиатр	10	(8:00, 8:10, 8:20, 8:30, 8:40, 8:50, 9:00, 9:10, 9:20, 9:30)
P_2 Врач-нарколог	5	(8:00, 8:05, 8:10, 8:15, 8:20,8:25, 8:30, 8:35, 8:40, 8:45, 8:50, 8:55, 9:00, 9:05, 9:10)
P_3 Врач-невролог	20	(8:00, 8:20, 8:40, 9:00, 9:20, 9:40, 10:00)

Таблица 2

Продолжительность передвижения между ПО

ПО	P_1	P_2	P_3
P_1	∞	2	1
P_1	2	∞	3
P_3	2	1	∞
P_0	2	1	3

Назначение первого ПО

Начальный момент готовности к обслуживанию составляет 8:00. Положение пациента P_0.

Таблица 3

Потери времени при назначении первого ПО

ПО	Продолжительность передвижения из P_0 в P_j	Момент приема	Dj
P_1	2	8:10	10
P_2	1	8:05	5
P_3	3	8:20	10

Назначаем ПО Нарколог P_2 на 8:05.

Назначение второго ПО

Момент готовности к обслуживанию составляет 8:10. Положение пациента P_2.

Таблица 4

Потери времени при назначении второго ПО

ПО	Продолжительность передвижения из P_2 в P_j	Момент приема	Dj
P_1	2	8:20	10
P_3	3	8:20	10

Назначаем ПО Невролог P_3 на 8:20, так как оставшихся моментов приема у него меньше.

Назначение третьего ПО

Момент готовности к обслуживанию составляет 8:40. Положение пациента P_0 Продолжительность передвижения из P_3 в P_1 равна одной минуте. Назначаем ПО Психиатр P_1 на 8:50.

Маршрут

P_2(08:05–08:10) – P_3(08:20–08:40) – P_1(08:50–90:00)

Общая продолжительность обслуживания равна 60 минут.

«БЛИЗОРУКИЙ» АЛГОРИТМ С ПРОГНОЗОМ

Одним из способов усовершенствования «близорукого» алгоритма является учет потерь времени на ожидание и перемещение на ближайшем и следующем шаге:

1. Для момента t готовности пациента к обслуживанию и заданных оставшихся не пройденными ПО (j =1, 2,...m) рассчитываем сумму «потерь» $D_j(t)$.

2. Для каждого j ПО находим момент готовности к обслуживанию после его прохождения $t_{j+}(t)$, а для этого момента минимум суммарных потерь времени $D^*[t_{j+}(t)]$ по всем не пройденным ПО, исключая j-ый.

3. Ищем минимум по j суммы $S_j = D_j(t) + D^*[t_{j+}(t)]$.

4. Назначаем в момент t тот ПО, для которого полученная сумма меньше.

5. Находим очередной момент готовности к приему и повторяем п. 1.

Аналогично «близорукому» алгоритму без прогноза, если суммы S_j для двух маршрутов одинаковы, то целесообразно предпочесть решение о назначении того ПО, у которого осталось меньше талонов.

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

Вычислительные эксперименты формирования маршрутов проводилось между тремя рассмотренными выше алгоритмами: базовый алгоритм коммивояжера с улучшением, «близорукий» и «близорукий» с прогнозом. Входные данные были сформированы следующим образом:

1. количество ПО в каждом дне: 2, 5, 10;
2. количество дней: 5, 10, 20;
3. продолжительность обслуживания в каждом ПО: 10 минут, 15, 20, 25, 30;
4. количество моментов обслуживания в каждом ПО: 10.

Сравнительная диаграмма средней продолжительности формирования маршрута представлена на *рис. 1*, диаграмма дополнительных затрат времени обслуживания представлена на *рис. 2.*

Лучшую скорость поиска маршрутов показал базовый алгоритм с поиском начального приближения и улучшением. «Близорукий» алгоритм по сравнению с базовым дольше определяет маршрут, но качество поиска заметно выше. «Близорукий» алгоритм с прогнозом значительно дольше формирует маршрут, но при большом количестве ПО качество найденных маршрутов лучше.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО МАРШРУТА ПАЦИЕНТА

Практическая апробация разработанных алгоритмов выполнена в виде опытной реализации соответствующего модуля в медицинской информационной системе Интерин PROMIS Alpha, разработчик ООО «Интерин технологии». На приеме врач назначает пациенту необходимые услуги и переходит в раздел формирования индивидуального маршрута прохождения назначенных мероприятий.

Алгоритм обрабатывает входные данные и строит индивидуальный маршрут оказания услуг пациенту *(на рис. 3).*

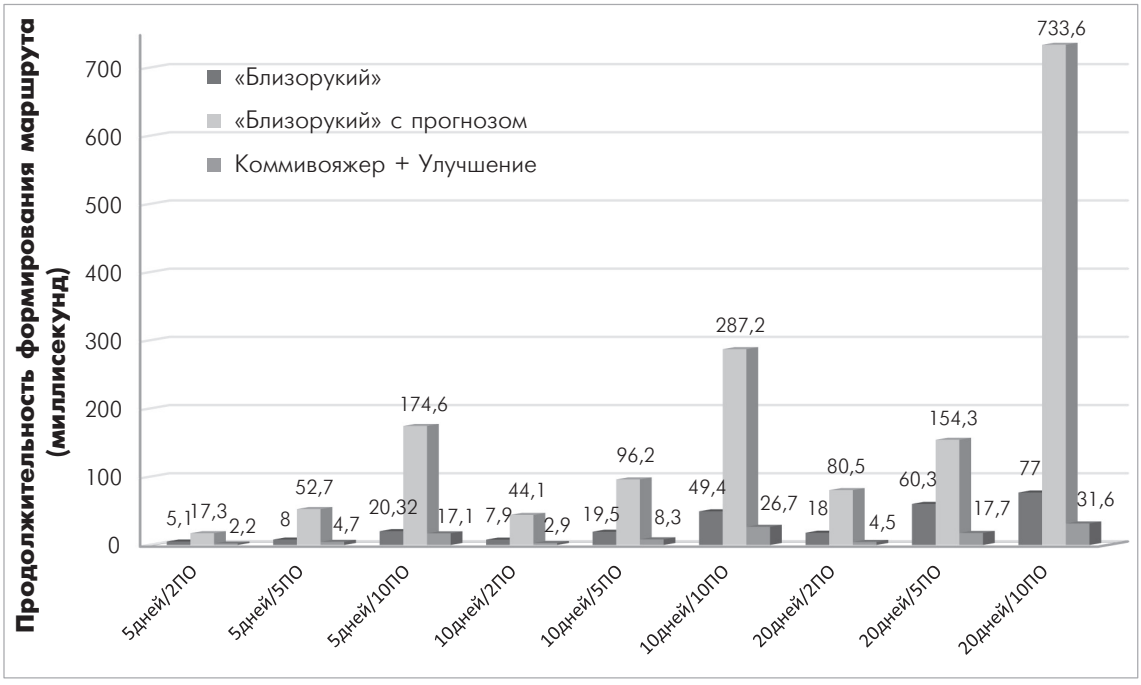

Рис. 1. **Сравнительная диаграмма средней продолжительности формирования маршрута**

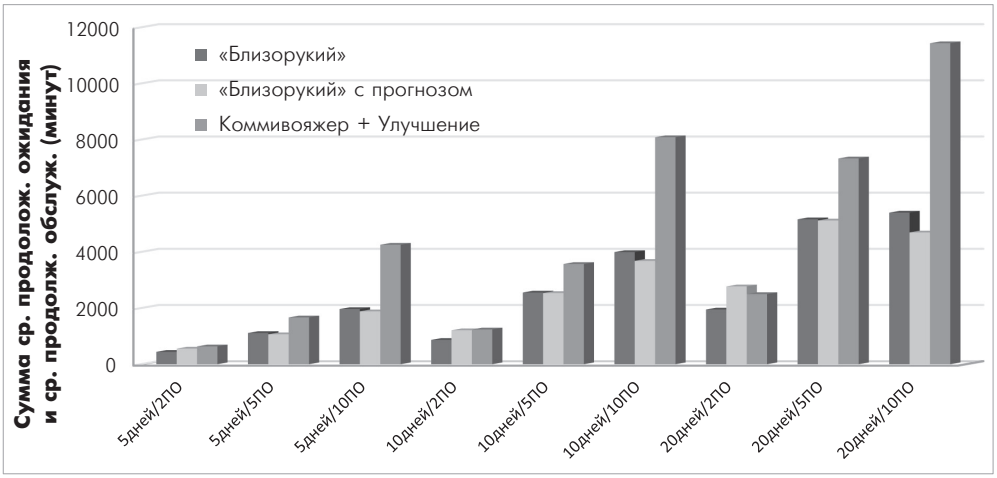

Рис. 2. **Сравнительная диаграмма суммы средней продолжительности ожидания и средней продолжительности обслуживания пациента**

Система информирует, сформирован ли маршрут для всех назначенных услуг. Если алгоритму не удалось это сделать, то отображается частичный маршрут с указанием количества приемов, которые удалось найти.

Модуль работает с учетом следующих ограничений:

1. Начальный момент времени обслуживания определяется минимальным моментом приема среди всех ПО на рассматриваемую дату $t_0 = min(t_j)$. По умолчанию отбираются все свободные талоны и передаются алгоритму. Можно указать ограничения по времени для формирования множества t_j.

2. По умолчанию критерием оптимальности является общая продолжительность прохождения всех ПО, которая указана в (2). Критерий можно поменять на продолжительность ожидания приема, представленную в (3).

После автоматического формирования маршрута у пользователя есть возможность корректировки найденного времени приема для каждой услуги. Поскольку поиск многодневного маршрута разделен на локальные подзадачи, определяющие последовательность прохождения всех ПО на одну дату, алгоритм может не просто выбрать наилучший вариант на день, а найти их массив, ранжировав его по критерию оптимальности. Пользователю доступен просмотр списка всех возможных решений *(на рис. 4):*

1) У каждого варианта в заголовке представлен общий результат, отвечающий на вопрос: найдены ли все ПО или нет.

2) Представлены основные показатели: период времени прохождения и потери времени при обслуживании.

3) Показана последовательность прохождения всех ПО с временем приема.

В интерфейсе модуля пользователь при необходимости может заменить последовательность прохождения ПО в заданном дне альтернативным вариантом. Наилучший вариант маршрута показан первым в массиве возможных решений, он используется при составлении многодневного маршрута.

Распределение назначений Записать

Талоны найдены Время с – по Критерий поиска Общая продолжительность

			Чт. 12.11	Пт. 13.11	Сб. 14.11	Вс. 15.11	Пн. 16.11	Вт. 17.11	Ср. 18.11	Чт. 19.11
Акупунктурный массаж №7	7/7		13:20	09:20	13:20	09:20	15:15	09:00	09:00	
Ароматерапия №5	5/5		12:00	08:00	12:00	08:00	15:00			
Грязелечение №6	6/6		12:20	08:20	12:20	08:20	08:00	08:00		
Лечебная ванночка №8	8/8		12:40	08:40	12:40	08:40	08:20	08:20	08:00	08:20
Массаж грудного отдела позвоночника №8	8/8		13:00	09:00	13:00	09:00	08:40	08:40	08:20	08:00
Озонотерапия №4	4/4		13:40		13:40		09:00		08:40	

Рис. 3. **Маршрутный лист пациента**

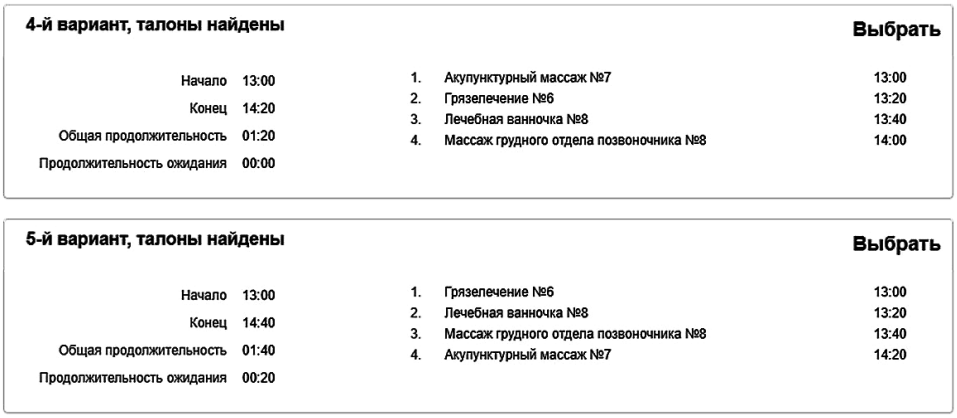

Рис. 4. **Альтернативные варианты маршрутов на один день**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставлена задача формирования оптимального маршрута обслуживания пациента с учетом расписания приема врачей. Сформулированы два варианта алгоритмов ее решения, приведены пошаговые проверки предложенных алгоритмов. Выполнено сравнение алгоритмов, проведен анализ результатов и даны рекомендации по их использованию. Описана опытная реализация модуля распределения назначений, базирующегося на приведенных алгоритмах. Выполненная реализация позволила существенно упростить диспетчеризацию назначенного курсового лечения, повысить эффективность распределения нагрузки на специалистов больницы и повысить информативность подсистемы назначений для пользователей МИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войтенков С.С., Денисов Е.С.* Применение теории расписаний в грузовых автомобильных перевозках // Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. – 2017. – С. 325–334.
2. *Коган Д.И., Сигал И.Х.* Учет временных характеристик для одного класса задач построения расписаний работы перемещающегося процессора // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 12. – С. 121–134.
3. *Christos Zacharias, Mor Armony Joint Panel Sizing and Appointment Scheduling in Outpatient Care* // Management Science. – 2016. – № 11.
4. *Nan Liu.* Optimal Choice for Appointment Scheduling Window under Patient No-Show Behavior // Production and Operations Management. – 2016. – № 1. – С. 800–819.
5. *Chongjun Yan, Jiafu Tang, Bowen Jiang, Richard Y.K.* Fung Sequential appointment scheduling considering patient choice and service fairness // International Journal of Production Research. – 2015. – № 23. – С. 60–76.
6. *Joren Marynissen, Erik Demeulemeester* Literature review on multi-appointment scheduling problems in hospitals // European Journal of Operational Research. – 2019. – № 2. – С. 407–419.
7. *Романова А.А., Тавченко В.Ю.* Приближенный алгоритм для задачи составления расписания функционирования одной системы доставки продукции, Архитектурно-строительнный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации (Омск, 28–29 ноября 2019 г).
8. *Топка В.В.* Многомерная задача о рюкзаке: эффективный метод решения и возможные приложения, Труды института системного анализа Российской академии наук, 69:2 (2019), С. 54–64.
9. *Ованесян А.А., Левичев А.В.* Алгоритмы распределения врачебных направлений в медицинской организации // Программные системы: теория и приложения. – 2019. – № 4(46). – С. 163–180.
10. *Ованесян А.А., Левичев А.В., Белышев Д.В., Цирлин А.М.* Задачи распределения медицинских направлений // Врач и информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 48–57.
11. *Гулиев Я.И, Белышев Д.В., Кочуров Е.В.* Медицинская информационная система «Интерин PROMIS ALPHA» – Новые горизонты // Врач и информационные технологии, 2016. – 8 с.
12. *Борознов В.О.* Исследование решения задачи коммивояжера. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 147–151.
13. *Моисеев Н.Н.* Элементы теории оптимальных систем // М.: Наука, 1975. – 528 с.