

Моделирование оптимального маршрута патрулирования наряда методом ветвей и границ

Н.И. Антонов

Академия управления МВД России, Москва

Аннотация: Статья посвящена решению оптимизационных задач, связанных с определением оптимального маршрута патрулирования нарядов территориальных органов МВД России при несении ими службы по обеспечения охраны общественного порядка и общественной безопасности на улицах и в иных общественных местах, посредством использования одного из математических методов дискретной оптимизации для поиска наикратчайшего пути движения сотрудников в условиях имеющегося ограниченного их количества и меняющейся оперативной обстановки. Рассмотрена практическая реализация технологии получения наилучшего варианта решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ, для достижения результата которого использовалось численное моделирование. Показаны возможности нахождения оптимального пути движения при изменении условий решаемой задачи. В заключение сделаны выводы о необходимости усовершенствования классического метода ветвей и границ для получения более точного результата.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизационная задача, метод ветвей и границ, коммивояжёр, органы внутренних дел, охрана общественного порядка, обеспечение общественной безопасности, оперативная обстановка, силы и средства, маршрут патрулирования, эффективное распределение ресурсов.

Введение. Осуществление в современных условиях государственной и общественной безопасности является одним из основных стратегических национальных приоритетов, направленных на обеспечение и защиту национальных интересов Российской Федерации, которая реализуется за счёт концентрации усилий и ресурсов органов публичной власти, организаций и институтов гражданского общества в рамках решения задач государственной политики.

Согласно Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утверждённой Указом Президента Российской Федерации от 2 июля 2021 г. № 400, обеспечению государственной и общественной безопасности способствует реализация мер, направленных на усиление роли государства как гаранта безопасности личности и прав собственности, повышение эффективности деятельности правоохранительных органов

и специальных служб по защите основ конституционного строя Российской Федерации, прав и свобод человека и гражданина, совершенствование единой государственной системы профилактики преступности, гарантия реализации принципа неотвратимости наказания за совершение преступления, а также на формирование в обществе атмосферы нетерпимости к противоправной деятельности.

Правильное сочетание всех вышеуказанных элементов системы мер обеспечения государственной и общественной безопасности возможно только на основе повышения эффективности государственного управления [1], укрепления законности и правопорядка, совершенствования процесса социально-экономического развития.

Проявившие себя достаточно остро в ходе реформ проблемы государственного управления обусловили выработку соответствующих решений по повышению эффективности правоохранительной деятельности, поиска новых форм и методов противостояния негативным и опасным для современного российского общества социальным явлениям. В связи с этим, происходящие в последнее время в условиях сложной внешнеполитической и экономической ситуации преобразования в организации государственного управления требуют как от всей правоохранительной системы, так и от органов внутренних дел (далее ОВД) в частности, совершенствования информационно-аналитической работы, направленной на получение актуальных и достоверных сведений о состоянии правопорядка и противодействии преступности, более оперативного и точечного реагирования на изменение криминогенной обстановки [2, 3]. При этом, в качестве приоритетных направлений деятельности уделяется повышенное внимание внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий, способствующих повышению эффективности использования процедур и методов управления.

Следует отметить, что на фоне возрастания многочисленных информационных потоков лицу, уполномоченному принимать управленческие решения для достижения наилучших результатов правоохранительной деятельности, приходится обеспечивать рациональное распределение имеющихся в наличии ресурсов (материально-технических, кадровых и т.д.) и эффективное применение сил и средств вверенных подразделений посредством использования современных математических моделей и методов оптимизации [4].

Принятие оптимальных решений на разных стадиях процесса управления ОВД позволяет при помощи относительно простых алгоритмов и технологий, основанных на получении, обработке и анализе данных, переработанных с помощью математических и численных методов, а также вычислительной техники, осуществлять оценку оперативной обстановки [5] в режиме реального времени, производить с максимальной эффективностью распределение личного состава по подразделениям и местам службы, скорректировать работу [6], например, по всему направлению охраны общественного порядка.

Вопросы, касающиеся непосредственной организации использования сил и средств в охране общественного порядка, урегулированы соответствующим ведомственным приказом, который регламентирует деятельность служб и подразделений полиции по защите личности, общества, государства от противоправных посягательств, предупреждению, выявлению и пресечению преступлений и административных правонарушений, обеспечению охраны общественного порядка и общественной безопасности на улицах и в иных общественных местах. Так, в зависимости от состояния оперативной обстановки, маршруты (посты) нарядов определяются таким образом, чтобы по максимуму «охватить» места (объекты) наиболее частого появления лиц, ведущих антиобщественный

образ жизни, или на территории которых высока вероятность совершения правонарушений (кафе, бары, банкоматы, предприятия торговли и т.д.).

Однако, реалии сегодняшнего дня таковы, что даже при полной укомплектованности всех числящихся вакантными должностей, штатная численность подразделений не позволяет осуществлять полную «перекрываемость» постов и маршрутов патрулирования. Это, конечно, связано с тем, что в рамках постоянного реформирования и оптимизации структуры МВД России имеющаяся на текущий момент фактическая штатная численность сотрудников полиции, к сожалению, не отвечает необходимой потребности в достаточном их количестве [7].

Соответственно, с учётом фактической штатной численности сотрудников полиции, решение оптимизационной задачи будет заключаться в результатах распределения имеющихся в наличии сил и средств ОВД для выполнения оперативно-служебных задач с помощью существующих математических моделей [8] таким образом, чтобы, перемещая по территории обслуживания от одного проверочного пункта до другого, минимизировать степень «недовыполнения» наиболее приоритетных из них.

Постановка задачи исследования. В условиях рассматриваемой задачи, основным критерием оптимальности при определении маршрутов (постов) нарядов выбран критерий интервала времени, затрачиваемого патрульными на объезд (обход) территории обслуживания в определённом направлении от начальной и до её конечной точки, для нахождения наиболее приемлемой траектории движения. При этом, как правило, начальная и конечная точки маршрута движения совпадают.

Главным предназначением полиции, согласно Федеральному закону от 7 февраля 2011 г. № 3-ФЗ «О полиции», является обязанность незамедлительно прибывать на место совершения преступления, административного правонарушения, пресекать противоправные деяния,

устранять угрозы безопасности граждан и общественной безопасности. Соответственно, минимизация временного интервала, необходимого для обследования территории патрульного участка, обеспечивает наиболее частое появление сотрудников в особенно важных местах (объектах) со сложной криминогенной ситуацией для своевременного получения актуальных и точных данных относительно ее состояния на подконтрольной территории, а также экономии затрачиваемого горючего, смазочных материалов или других ресурсов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что особенностью решения представленной математической задачи, связанной с нахождением наилучших вариантов из множества возможных альтернатив, является отыскание оптимального или наикратчайшего пути движения патрульных нарядов от одной контрольной точки до другой с помощью существующих алгоритмов, использующихся для оптимизации замкнутых (циклических) маршрутов, так, чтобы за один «круг» были бы обследованы все опорные точки и только единожды, и при этом наряды в конце пути должны обязательно возвратиться в исходный пункт отправления.

Этот класс задач, относящийся к задачам транспортной логистики, чаще всего встречается в научных публикациях под названием «задачи коммивояжёра», «задачи о странствующем торговце» или «задачи о дилижансе». Особенностью решения подобных задач считается тот факт, что они достаточно просто формулируются и относительно просто вычисляются оптимальные маршруты для разного рода набора данных.

На сегодняшний день для решения «задачи коммивояжёра» существует достаточно много алгоритмов, которые используются в той или иной ситуации в зависимости от степени сложности и характера условий задачи. Вместе с тем, в качестве одного из наиболее приоритетных методов по нахождению оптимального или наикратчайшего пути движения

патрульных нарядов от одной контрольной точки до другой по замкнутому маршруту, представляется необходимым и целесообразным выбрать для решения рассматриваемой оптимизационной задачи метод ветвей и границ. Тогда наша оптимизационная задача, относящаяся к ряду задач по установлению гамильтонова цикла минимальной длины на связном графе, не содержащем петель, фактически сводится к нахождению наиболее непродолжительного по времени маршрута при перемещении сотрудников ОВД между перекрёстками дорог улично-дорожной сети или конкретными пунктами (объектами) $B = \{v_1, \dots, v_n\}$, отражающего точки, которые необходимо посетить, возможные траектории передвижения нарядов $P = \{p_1, \dots, p_m\}$, и веса рёбер $V = \{v_1, \dots, v_m\}$, соответствующие элементам множества графа. К весам рёбер в рассматриваемой задаче относятся условные единицы времени, затрачиваемые на преодоление участка улично-дорожной сети, расположенного между двумя соседними вершинами.

Решение задачи. Рассмотрим пример численного решения задачи коммивояжёра классическим методом ветвей и границ. Для её решения будем использовать положения теории графов. В первую очередь, перед началом вычислений, стоит привести улично-дорожную сеть патрульного участка, включающего пункты и (или) объекты, которым требуется уделить наиболее пристальное внимание в создавшейся ситуации, к удобному формализованному виду, исключив из неё не представляющие в данный момент времени особого интереса для ОВД опорные точки при патрулировании [9]. Итак, предположим, что имеется определённый штатный маршрут патрулирования, в который условно входят пять контрольных точек (пять мест с массовым пребыванием людей, например, здание школы, торговый центр, спортивный объект, здание органа государственной власти и крупный транспортный узел), соответствующих вершинам графа $B = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$. Известно также, что среднее время

продвижения от каждой точки ко всем остальным – это значения веса рёбер графа. Причём для рассматриваемой задачи определим заранее условие, согласно которому движение по участкам улично-дорожной сети между любыми контрольными точками может осуществляться в противоположных направлениях. В таком случае, граф G , состоящий из пяти вершин, соединённых друг с другом двадцатью рёбрами $P = \{p_{1:2}, p_{2:1}, \dots, p_{1:5}, p_{5:1}\}$ и конкретно определёнными направлениями передвижения, будет считаться ориентированным. Пример такого графа изображён на рис.1.

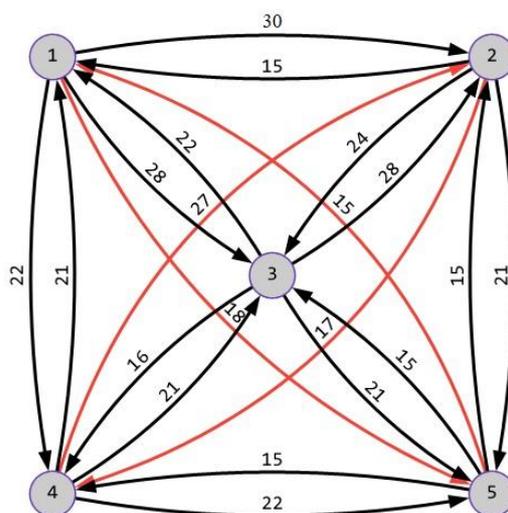


Рис. 1. – Пример ориентированного графа.

Затем, перед тем, как приступить к решению поставленной задачи, изобразим исходные условия, соответствующие рассматриваемой графовой модели G , в виде матрицы смежности размером 5×5 , занеся в неё по диагонали и вертикали значения весов рёбер, которые соотносятся с отдельными временными интервалами перемещения нарядов от каждой контрольной точки до всех остальных (рис.2). Время движения на пересечении столбцов и строк одноимённых опорных точек обозначено знаком бесконечности (∞), в связи с тем, что, в целях исключения использования при дальнейшем составлении маршрута перемещение от 1-ой вершины до 1-ой, от 2-ой до 2-ой, и т.д., данный отрезок пути условно принят за бесконечно длинный.

	1	2	3	4	5
1	∞	30	28	22	18
2	15	∞	24	17	21
3	22	28	∞	16	21
4	21	27	21	∞	22
5	15	15	15	15	∞

Рис. 2. – Матрица смежности графовой модели улично-дорожной сети.

Хотелось бы сразу отметить, что поиск решения будет происходить до тех пор, пока не будут проанализированы все участки улично-дорожной сети между пятью вершинами графа и включены в итоговый маршрут патрулирования наиболее оптимальные из них.

В связи с тем, что подробное описание процедуры по нахождению оптимальной траектории движения наряда довольно объёмно, то в рамках решения настоящей задачи рассмотрим более подробно лишь несколько последовательных шагов решения поставленной задачи классическим методом ветвей и границ.

С определения минимального веса значений временных интервалов в строках таблицы (c_i) начнём решение задачи с последующим выполнением их построчного редуцирования (из каждого временного отрезка в каждой строке таблицы поочерёдно вычитаем соответствующее ей значение минимума ($P_{ij} = P_{ij} - c_i$)).

	1	2	3	4	5	c_i
1	∞	30	28	22	18	18
2	15	∞	24	17	21	15
3	22	28	∞	16	21	16
4	21	27	21	∞	22	21
5	15	15	15	15	∞	15

	1	2	3	4	5
1	∞	12	10	4	0
2	0	∞	9	2	6
3	6	12	∞	0	5
4	0	6	0	∞	1
5	0	0	0	0	∞

Рис. 3. – Преобразование матрицы смежности по строкам

Далее определяем минимальные веса значений временных интервалов в столбцах таблицы (c_j) по аналогии с предыдущей математической операцией ($P_{ij} = P_{ij} - c_j$).

	1	2	3	4	5
1	∞	12	10	4	0
2	0	∞	9	2	6
3	6	12	∞	0	5
4	0	6	0	∞	1
5	0	0	0	0	∞
c_j	0	0	0	0	0

Рис. 4. – Преобразование матрицы смежности по столбцам

Вычисляем корневую локальную нижнюю границу хронометража предполагаемой траектории движения (H), суммируя полученные значения c_i и c_j : $H_0 = \sum c_i + \sum c_j = 85$.

На следующем шаге рассчитываются оценки нулевых клеток, суммируя минимальные веса значений временных интервалов по строкам и столбцам, на пересечении которых и располагаются оцениваемые клетки с нулём. Важно то, что непосредственно сами нулевые клетки, для которых в данный момент просчитываются оценки, в расчётах не участвуют, в отличие от других нулевых клеток, если такие присутствуют строках и столбцах.

В одной из ячеек первой строки таблицы, соответствующей ребру $p_{1:5}$, находится нулевое значение. Соответственно, для него вычисляем оценку: сначала определяется минимальное значение среди оставшихся весов временных интервалов в этой же строке (это цифра 4), а затем к нему прибавляется найденное среди весов временных интервалов в столбце минимальное значение (это цифра 1). По аналогии просчитываются оценки для остальных нулевых клеток.

	1	2	3	4	5
1	∞	12	10	4	$0^{(5)}$
2	$0^{(2)}$	∞	9	2	6
3	6	12	∞	$0^{(5)}$	5
4	$0^{(0)}$	6	$0^{(0)}$	∞	1
5	$0^{(0)}$	∞	$0^{(0)}$	$0^{(0)}$	∞

Рис. 5. – Вычисление оценок для нулевых клеток

Теперь среди рассчитанных нулевых клеток матрицы выбираем ту, которой соответствует максимальная оценка. В нашем случае это ребро $p_{5:2}$, которому соответствует весовой коэффициент, равный 6. Можно сказать, что именно в этом месте появляются первые несколько вариантов решения задачи, когда образуются ветви, где мы включаем в маршрут движения выбранный интервал времени из вершины 5 во 2 вершину и ветвь, где мы его не включаем в маршрут патрулирования.

Для начала проведём проверку первого варианта отыскания решения задачи, как было отмечено выше, предусматривающего включение временного интервала $p_{5:2}$ в маршрут патрулирования, произведя при этом по ходу выполнения действий очередную редукцию матрицы. Для этого из таблицы сначала исключаем соответствующие ему строку и столбец, а затем в поле ячейки, пропорциональной обратному пути ($p_{2:5}$), ставим ещё один знак бесконечности (∞), в связи с тем, что выдвигание из данной вершины в обратном направлении не планируется. По окончании данной процедуры имеем уменьшенную матрицу размером 4×4 .

	1	2	3	4	5
1	∞	12	10	4	$0^{(5)}$
2	$0^{(2)}$	∞	9	2	6
3	6	12	∞	$0^{(5)}$	5
4	$0^{(0)}$	6	$0^{(0)}$	∞	1
5	$0^{(0)}$	∞	$0^{(0)}$	$0^{(0)}$	∞

	1	3	4	5
1	∞	10	4	0
2	0	9	2	∞
3	6	∞	0	5
4	0	0	∞	1

Рис. 6. – Преобразование матрицы смежности с учётом полученных данных

Теперь рассчитываем локальную нижнюю границу для первой ветви решения: $H_1 = H_{k-1} + \sum c_i + \sum c_j = 85 + 0 = 85$.

Соответственно, при исключении из проекта формируемого маршрута движения наряда обозначенного интервала времени от вершины 5 к 2, локальная нижняя граница для второго варианта решения задачи, вычисляемая как сумма предыдущей локальной нижней границы

и максимальной оценки (полученной на предыдущем этапе), удлиняет минимально возможную величину продолжительности итогового маршрута до значения $9I$, определяемого как $H_I = H_{k-1} + P_{ij}$.

Далее, в продолжение решения оптимизационной задачи, снова выбираем из всех не ветвившихся ранее вершин графа ту, которой соответствует наименьшее значение локальной нижней границы. Для этого внесём в выстраиваемый нами вариант маршрута патрулирования интервал времени движения из вершины 5 во 2 (ребро графа $p_{5:2}$) и продолжим, исследуя формируемое дерево решений, выполнять процедуру по поиску среди образуемых ветвей графа конечного решения, заключающегося в определении максимально полного маршрута движения и расчёта его наименьшей продолжительности.

По результатам проведённых вычислений, отыскав все допустимые временные отрезки траектории движения наряда, на выходе располагаем в условиях заданной оперативной обстановки оптимальным маршрутом движения, представленным следующими направлениями перемещения между контрольными точками: $p_{1:5} \rightarrow p_{5:3} \rightarrow p_{3:4} \rightarrow p_{4:2} \rightarrow p_{2:1}$. Общее время по его прохождению рассчитываем, подставляя все необходимые сведения для вычисления из исходной матрицы (рис.2). Продолжительность маршрута патрулирования в конечном итоге составила $9I$ условную единицу времени. Необходимо отметить, что для наилучшего понимания всей процедуры по нахождению искомого результата решения задачи коммивояжёра классическим методом ветвей и границ представляется целесообразным непосредственно сам ход поиска изобразить в виде графа (рис.7), в котором в качестве вершин представлены наиболее существенные результаты по включению или невключению тех или иных временных интервалов передвижения наряда в окончательный маршрут, а в качестве рёбер, отображающих результаты поэтапного выполнения определённой

последовательности действий, образованы ветви альтернативных вариантов маршрута.

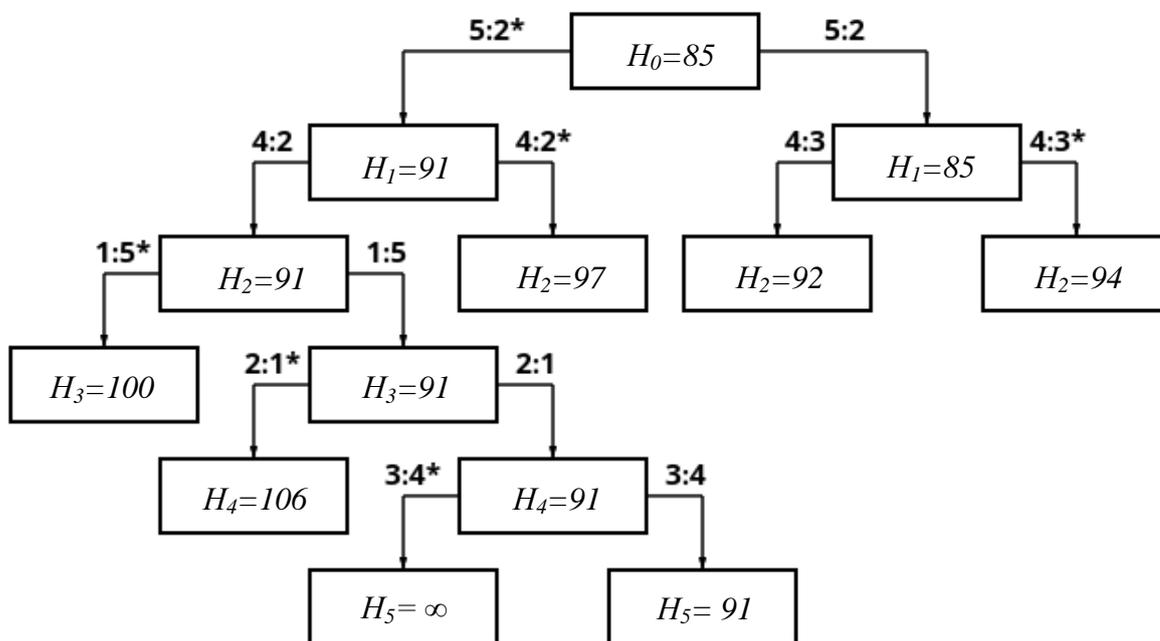


Рис. 7. – Процедура решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ.

В последствии, воспользовавшись для решения оптимизационной задачи классическим методом ветвей и границ, при изменении весов рёбер на графе улично-дорожной сети в условиях постоянно меняющейся криминогенной ситуации существует возможность внести изменения в маршруты движения нарядов, повышая таким образом эффективность их деятельности по предупреждению, пресечению или раскрытию наиболее вероятностных правонарушений, а также расширяя возможности обеспечения собственной безопасности личного состава ОВД.

Несмотря на то, что классический метод ветвей и границ повсеместно применяется, в том числе и в научных работах, при решении разного рода задач дискретной оптимизации, иногда на практике возникают ситуации, решение которых не укладываются в рамки существующих подходов. Так, в большинстве своём, патрульному наряду приходится находить на территории городского пространства наикратчайший маршрут движения, причём даже между двумя контрольными точками, в условиях, когда очень

сильно перегружена дорожная сеть и движение осуществлять, как правило практически всегда в силу сложившейся ситуации, по наиболее удлинённому маршруту, в объезд, а также, хотя бы ещё один или несколько раз, посещать уже обследованные места (объекты). Подобная технология способствует введению в процессе решения матрицы смежности вспомогательных фиктивных вершин графа или его рёбер [10], дублирующих действительные, когда существует необходимость по дополнительному включению в маршрут передвижения определённых мест (объектов) несколько раз.

Заключение. Перспективы расширения прикладных возможностей оптимизации в управленческой деятельности связаны как с расширением классов решаемых задач, так и с поиском новых и совершенствованием известных методов оптимизации. Принимая во внимание сущность требования научной обоснованности управленческих решений, они должны учитывать потребности практики, а их выработка и принятие должны опираться на научные методы и современные информационные технологии.

Литература

1. Малышева, М.А. Теория и методы современного государственного управления. Учебно-методическое пособие. СПб.: Отдел оперативной полиграфии НИУ ВШЭ, 2011. С. 280.
2. Самданов, Г.Б. Анализ текущего состояния деятельности дежурных частей территориальных органов МВД России // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8315.
3. Зверев, Д.А., Зверев, А.П. О возможности использования нейросетей при организации работ по устранению последствий чрезвычайных ситуаций // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/772.
4. Баторов, Б.О, Кубасов, И.А., Торопов, Б.А. Управление в социальных и экономических системах: курс лекций. М.: Академия управления МВД

России, 2022. С. 116.

5. Zhang, Y., Brown, D.E. Police patrol districting method and simulation evaluation using agent-based model & GIS. SpringerOpen, Secur Inform. 2013. URL: doi.org/10.1186/2190-8532-2-7.

6. Rosenshine, M. Contributions to a Theory of Patrol Scheduling. Operational Research Quarterly (1970-1977), vol. 21, №1, 1970, pp. 99–106. URL: doi.org/10.2307/3007722.

7. Важенина, И.В. Контроль как основная функция управления // Цифровая трансформация системы МВД России. Сборник научных статей по материалам Международного форума. М.: Академия управления МВД России, 2022. Ч.1. С. 147-151.

8. Горошко, И.В. Информационные технологии в управлении органами внутренних дел: учебник. М.: Академия управления МВД России, 2015. С. 156.

9. Калков, Д.Ю. Динамическая маршрутизация движения мобильных нарядов правоохранительных органов при патрулировании // Вестник Воронежского института МВД России. Г.Воронеж: Воронежский институт МВД Росси, 2021. № 7. С. 51-56.

10. Подшивалова, К.С. Доставка мелкопартионных грузов автомобильным транспортом: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. С. 124.

References

1. Malysheva, M.A. Teoriya i metody sovremennogo gosudarstvennogo upravleniya. Uchebno-metodicheskoe posobie [Theory and methods of modern public administration. Educational and methodical manual]. SPb.: Otdel operativnoj poligrafii NIU VSHE, 2011. p. 280.

2. Samdanov, G.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8315.

3. Zverev, D.A., Zverev, A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/772.

4. Batorov, B.O, Kubasov, I.A., Toropov, B.A. Upravlenie v social'nyh i ekonomicheskikh sistemah: kurs lekciy [Management in social and economic systems: course of lectures]. M.: Akademiya upravleniya MVD Rossii, 2022. p. 116.
5. Zhang, Y., Brown, D.E. Police patrol districting method and simulation evaluation using agent-based model & GIS. SpringerOpen, Secur Inform. 2013. URL: doi.org/10.1186/2190-8532-2-7.
6. Rosenshine, M. Contributions to a Theory of Patrol Scheduling. Operational Research Quarterly (1970-1977), vol. 21, №1, 1970, pp. 99–106. URL: doi.org/10.2307/3007722.
7. Vazhenina, I.V. Cifrovaya transformaciya sistemy MVD Rossii. Sbornik nauchnyh statej po materialam Mezhdunarodnogo foruma. M.: Akademiya upravleniya MVD Rossii, 2022. ch.1. pp. 147-151.
8. Goroshko, I.V. Informacionnye tekhnologii v upravlenii organami vnutrennih del: uchebnik [Information technologies in the management of internal affairs bodies: textbook]. M.: Akademiya upravleniya MVD Rossii, 2015. p. 156.
9. Kalkov, D.YU. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2021. № 7. pp. 51-56.
10. Podshivalova, K.S. Dostavka melkopartionnyh грузов avtomobil'nyim transportom: monogr. [Delivery of small-batch goods by road: monograph]. Penza: PGUAS, 2014. p. 124.