

Расчет оптимального пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре

Сергей Николаевич Масаев, Виктория Александровна Шнайдер ✉

Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева), г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Национальный парк «Красноярские столбы» (парк) — популярное место отдыха, привлекающее множество туристов со всего мира. Нахождение парка в лесном массиве делает его уязвимым для лесных пожаров. Памятка туристу о правилах пожарной безопасности указывает не попадать в огненное кольцо или не находиться на пути распространения серьезного лесного пожара. Процесс обеспечения пожарной безопасности туристов в парке не рассматривался в рамках ФЗ от 24.11.1996 № 132-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации». Закон в ст. 7 прямо указывает, что турист обязан соблюдать во время путешествия правила личной безопасности, но и определяет список служб МЧС, которые будут заниматься спасением туриста при ЧС. В связи с этим для обеспечения личной безопасности туриста актуально разработать оптимальные пути эвакуации и оповестить о них в случае лесного пожара. Сохранение жизни и здоровья человека является первостепенной задачей государства.

Цели и задачи. Исследование ставит перед собой задачу определить наиболее быстрый, следовательно, безопасный путь эвакуации из парка, учитывая особенности рельефа, расстояние до безопасных зон и множество пересечений троп. Целью данного исследования является проведение расчетов оптимального пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при возникновении лесного пожара с учетом территориальных особенностей и препятствий. Оптимальный путь эвакуации существует при достаточных условиях оптимальности, определяемых из решения оптимизационной задачи в реальном времени при фактическом обнаружении лесного пожара.

Методы. Для достижения поставленной цели фактического решения оптимизационной задачи с достаточными условиями оптимальности реализован алгоритм в разработанной программе ЭВМ, находящий кратчайшие маршруты эвакуации. Для решения поставленной задачи был использован алгоритм расчета Дейкстры, позволяющий находить кратчайшие пути на графе. В рамках исследования территория национального парка моделируется в виде графа, где вершины — это ключевые точки (смотровые площадки, развилки троп, выходы к дорогам), а ребра — тропы и дороги, соединяющие эти точки.

Результаты. В результате исследования рассчитан и проложен маршрут, отражающий оптимальное расстояние эвакуации на карте местности, что позволяет в случае лесного пожара и его распространения эффективно самозэвакуироваться туристам, т.е. обеспечить свою личную безопасность. Следовательно, службы МЧС могут организовать процесс эвакуации туристов, т.е. сделать процесс туриста по обеспечению своей личной безопасности оптимальным.

Выводы. Рассчитанные оптимальные пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре представляют собой важный инструмент для обеспечения личной безопасности туристов и персонала парка. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации системы оповещения, эвакуации и подготовки к чрезвычайным ситуациям в будущем.

Ключевые слова: алгоритм расчета Дейкстры; граф; особенности рельефа; пропускная способность троп; безопасность посетителей и персонала

Для цитирования: Масаев С.Н., Шнайдер В.А. Расчет оптимального пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 6. С. 26–47. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.26-47

✉ Шнайдер Виктория Александровна, e-mail: shnayder.01@mail.ru

Calculation of the optimal escape route from the “Krasnoyarsk Pillars” National Park in case of a forest fire

Sergey N. Masaev, Victoria A. Shnayder ✉

Siberian State University of Science and Technology named after acad. M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The “Krasnoyarsk Pillars” National Park is a popular holiday destination that attracts many tourists from all over the world. The park’s location in a forest makes it vulnerable to forest fires. A tourist memo on fire

safety rules indicates not to get into a ring of fire or to be in the path of a serious forest fire. The process of ensuring fire safety for tourists in the Park was not considered within the framework of the Federal Law of 24.11.1996 No. 132-FZ (as amended on 13.06.2023) "Fundamentals of Tourist Activity in the Russian Federation". The law in Art. 7 directly indicates that a tourist is obliged to observe personal safety rules during the trip, but also defines the list of Emergencies Ministry services that will be involved in rescuing a tourist in an emergency. In this regard, in order to ensure the personal safety of a tourist, it is important to develop optimal evacuation routes and notify about them in the event of a forest fire. Preserving human life and health is a primary task of the State.

Aims and objectives. The study aims to determine the fastest and therefore safest, evacuation route from the Park, taking into account the terrain features, distance to safe zones and multiple intersections of trails. The purpose of this study is to calculate the optimal evacuation route from the "Krasnoyarsk Pillars" National Park in the event of a forest fire, taking into account territorial features and obstacles. The optimal evacuation route exists under sufficient optimality conditions determined from the solution of the optimization problem in real time upon actual detection of a forest fire.

Methods. Achieving the set purpose is realized by an algorithm in the developed computer programme. It finds the shortest evacuation routes by solving the optimization problem of determining the minimum. To solve the problem, Dijkstra's algorithm is used to find the shortest paths in the graph. As part of the research, the territory of the national park is modelled as a graph. The vertices of the graph are key points (lookout points, forks in paths, exits to roads), and the edges are paths and roads connecting these points.

Results. As a result of the research, a route was calculated and laid out, reflecting the optimal evacuation distance on the map of the area, which allows visitors to effectively evacuate themselves in the event of a forest fire so ensure their personal safety. Consequently, the Ministry of Emergency Situations can organize the evacuation process of tourists so make the tourist's process of ensuring their personal safety optimal.

Conclusions. The optimal evacuation routes from the "Krasnoyarsk Pillars" National Park in case of a forest fire are calculated. This is an important tool for ensuring the personal safety of tourists and park employees. The results of the research can be used to optimize warning, evacuation and preparation for emergency situations in the future.

Keywords: Dijkstra's calculation algorithm; graph; topographic features; trail capacity; security of visitors and staff

For citation: Masaev S.N., Shnayder V.A. Calculation of the optimal escape route from the "Krasnoyarsk Pillars" National Park in case of a forest fire. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):26-47. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.26-47 (rus).

✉ Victoria Alexandrovna Shnayder, e-mail: shnayder.01@mail.ru

Введение

На протяжении многих лет национальный парк «Красноярские столбы» (далее — парк) привлекает туристов со всего мира своими уникальными природными достопримечательностями, великолепными видами и возможностями для активного отдыха.

Определение понятия «турист» дает закон¹.

В связи с растущей угрозой лесных пожаров в национальном парке «Красноярские столбы» возникает необходимость поиска наиболее короткого пути эвакуации для обеспечения безопасности туристов в случае чрезвычайной ситуации (ЧС) [1].

Лесные пожары — это одно из наиболее опасных природных явлений, способное быстро распространяться и уничтожать все на своем пути. Могут представлять серьезную угрозу как для живой природы парка, так и для туристов, находящихся на его территории [2, 3].

На практике безопасность людей должна обеспечиваться согласно ФЗ² и методике³, при соблюдении критериев своевременности и беспрепятственности

их эвакуации, подразумевает их выход из опасной зоны. Например, из горящего здания до наступления критических значений опасных факторов пожара. Данные правовые акты, дающие возможность оценить все факторы в вероятностных сценариях эвакуации людей, и своевременные проверки органами ГПС МЧС обеспечивают гарантию срабатывания систем оповещения о пожаре, своевременного прибытия для тушения пожара, срабатывания систем тушения пожара, возможности беспрепятственно воспользоваться эвакуационными выходами.

Законодательно безопасность туристов парка обеспечивают службы МЧС исходя из следующих правовых актов: ФЗ № 132¹, распоряжение Правительства РФ⁴, Постановление Правительства РФ⁵.

На практике существуют общие рекомендации поведения в лесу, где содержится указание покинуть лес в случае серьезного лесного пожара или ЧС, а схема эвакуации людей из парка не разработана. Разработка сценариев плана эвакуации людей из парка (их математической модели) на данном этапе иссле-

¹ Об основах туристской деятельности в Российской Федерации : ст. 1 ФЗ от 24.11.1996 № 132-ФЗ (ред. от 13.06.2023).

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : ФЗ от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

³ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140.

⁴ Об утверждении перечня видов туристских маршрутов, требующих сопровождения инструктором-проводником, категорий их сложности и критериев отнесения туристского маршрута к соответствующей категории сложности, в том числе с учетом обеспечения безопасности туристов : Распоряжение Правительства РФ от 05.04.2022 № 744-р.

⁵ О силах и средствах единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : Постановление Правительства РФ от 8 ноября 2013 г. № 1007.

дования невозможна в силу ограниченного исследовательского ресурса учета факторов:

- фактического количества туристов в парке;
- миграции хищников при пожаре вдоль троп (при пожарах в Иркутской области отмечены факты миграции медведей крупными группами с расстоянием между хищниками в сто метров);
- уровня знания туристами о навыках выживания и умения ориентироваться в лесу;
- наличия сети неофициальных тропинок и частоты их использования (относительно свежие тропинки, заново натоптанные людьми или зверями);
- вероятности, что человек пойдет напролом вне троп и заблудится;
- пола, контингента и возраста туристов;
- сложности рельефа парка (предгорье Саян, ручьи, обрывы, овраги, реки, буреломы, кустарник, высокая трава, болотины);
- влияния сезонности, от которой зависят: частота посещения, высота и густота растительности, роза ветров.

Ситуация по учету количества туристов парка осложняется тем, что туристы, кроме официальных делегаций, пренебрегают правилом регистрации в службе МЧС своих маршрутов, времени пребывания в парке, обозначением контрольных точек и времени выхода из парка.

Закон обязывает туристов парка регистрироваться, но не наказывает за отказ от нее. Кроме того, никто не будет отговаривать посещать парк даже при сложных метеоусловиях, если туристы решительно нацелены на маршрут. Почему? Потому что в вышеприведенном ФЗ¹ в ст. 7 указано, что турист обязан соблюдать во время путешествия правила личной безопасности. Личная безопасность считается обеспеченной в парке, если не произошло вреда здоровью туриста от времени начала нахождения в парке до момента времени покидания им парка.

В сложившейся ситуации для обеспечения безопасности туристов парка со стороны МЧС, вместо критериев «своевременность» и «беспрепятственность» эвакуации людей³, достаточным условием будет своевременное оповещение о начале лесного пожара и сообщение им кратчайшего маршрута до ближайшего выхода из парка или точки эвакуации, т.е. обеспечение туристам «личной безопасности».

Стоит отметить, что понятие «личная безопасность» туриста при лесном пожаре не равно понятию «безопасная зона», пока турист находится в парке. Риск потери здоровья или смерти от факторов погоды, рельефа местности, диких зверей и т.д. сохраняется до момента выхода из парка.

Целью данного исследования является расчет оптимального пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре с исполь-

зованием алгоритма Дейкстры в разработанной программе ЭВМ для своевременного оповещения туристов парка и обеспечения их «личной безопасности».

В данном исследовании оптимальным для эвакуации признается наличие минимального расстояния по тропинкам от места нахождения туриста до безопасной зоны. Получение этого пути от служб МЧС помогает туристам парка максимально обеспечить свою личную безопасность с учетом множества сложных пересечений тропинок за минимальное время, т.е. возможность быстрой эвакуации при лесном пожаре или ЧС. Под минимальным временем понимается время, потраченное на короткую дорогу, обозначенную в оповещении, до зоны безопасности без потерь времени на излишний или ложный путь. Безопасной зоной в приоритете ставится выход из парка при оповещении о начале лесного пожара, но не исключает его оповещения для сохранения фактического расположения туриста в парке до момента эвакуации силами МЧС. Признание выбранного маршрута для эвакуации оптимальным на разных траекториях его выполнения туристом обеспечивается существованием достаточных условий [4]. На практике это означает, что вероятностную модель сценария эвакуации, которая из-за сложной природы взаимодействия факторов является труднореализуемой стохастической системой, успешно решают по ее текущим параметрам (фактическим данным) как оптимизационную задачу поиска минимальных точек.

Личная безопасность туриста максимально обеспечивается службой МЧС только в его конечной точке эвакуации или выхода из парка.

В конечном итоге разработка оптимальных путей эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре будет способствовать повышению уровня безопасности туристов и персонала парка за счет обеспечения их «личной безопасности», сохранению природной среды и уменьшению потенциального ущерба от других чрезвычайных ситуаций (ЧС) [5–7].

Подготовка данных

Оптимальный путь эвакуации рассчитывался на основе таблицы расстояний. Составление таблицы расстояний выполнялось в геоинформационной системе 2GIS, которая позволяет точно определять координаты и расстояния между объектами на местности [8–10].

Для дальнейших расчетов таблица была представлена в виде матрицы смежности. Матрица смежности позволяет легко представить информацию о связях между вершинами графа в виде двумерной матрицы, где элементы указывают наличие или отсутствие ребра между вершинами [11, 12].

В результате была составлена табл. 1, в которой отражены расстояния основных троп (в метрах) между популярными достопримечательностями

парка. Также в таблицу занесены широта и долгота каждой достопримечательности, что облегчает навигацию и ориентирование на местности.

Таблица 1. Расстояние между достопримечательностями

Table 1. The distance between the sights

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,895987 92,747721	Скала Манская стенка Rock Manskaya wall	Скала Манская баба Rock Manskaya woman	400
		Скала Каин и Авель Rock Cain and Avel	1200
55,893514 92,749214	Скала Манская баба Rock Manskaya woman	Скала Манская стенка Rock Manskaya wall	400
		Скала Каин и Авель Rock Cain and Avel	1500
55,902793 92,740222	Скала Каин и Авель Rock Cain and Avel	Скала Манская стенка Rock Manskaya wall	1200
		Скала Манская баба Rock Manskaya woman	1500
		Скала Ферма Rock Farm	1100
55,909108 92,739969	Скала Ферма Rock Farm	Скала Каин и Авель Rock Cain and Avel	1100
		Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	500
		Скала Предтеча Rock Forerunner	1000
		Скала 4-й столб Rock 4rd pillar	500
55,910824 92,732379	Скала Митра Rock Mitra	Скала 2-й столб Rock 2rd pillar	300
		Скала Капелла Rock Chapel	250
55,913088 92,741938	Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	Скала Ферма Rock Farm	500
		Скала Предтеча Rock Forerunner	1000
		Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	600
		Скала 4-й столб Rock 4rd pillar	150
		Скала Перья Rock Feathers	500
55,913158 92,751592	Скала Предтеча Rock Forerunner	Скала Ферма Rock Farm	1000
		Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	1000
		Скала 4-й столб Rock 4rd pillar	700
		Скала Первенец Rock Firstborn	200
		Скала Перья Rock Feathers	900

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,918031 92,729906	Перевал Снежный кофе Snow Coffee pass	Беркутовский ручей Berkutovsky stream	200
		Скала Слоник Rock Elephant	350
		Скала Дед Rock Grandfather	1500
55,916899 92,724560	Кордон Нарым Крутовской Е.А. Cordon Narym Krutovskaya E.A.	Беркутовский ручей Berkutovsky stream	400
55,916401 92,729114	Беркутовский ручей Berkutovsky stream	Перевал Снежный кофе Snow Coffee pass	200
		Кордон Нарым Крутовской Е.А. Cordon Narym Krutovskaya E.A.	400
55,916192 92,733468	Скала Слоник Rock Elephant	Перевал Снежный кофе Snow Coffee pass	350
		Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	300
		Скала Бабка Rock Granny	500
55,916008 92,734941	Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	600
		Скала Слоник Rock Elephant	300
		Скала 2-й столб Rock 2rd pillar	500
		Скала Перья Rock Feathers	800
		Скала Бабка Rock Granny	450
55,913032 92,732345	Скала 2-й столб Rock 2rd pillar	Скала Митра Rock Miter	300
		Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	500
55,908636 92,732220	Скала Капелла Rock Chapel	Скала Митра Rock Miter	250
55,912638 92,742835	Скала 4-й столб Rock 4rd pillar	Скала Ферма Rock Farm	500
		Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	150
		Скала Предтеча Rock Forerunner	700
		Скала Перья Rock Feathers	500
55,913617 92,753424	Скала Первенец Rock Firstborn	Скала Предтеча Rock Forerunner	200
		Скала Городская видовка Rock City view	1500
		Скала Медея Rock Medea	4000
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	5000

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,923593 92,756641	Скала Городская видовка Rock City view	Скала Первенец Rock Firstborn	1500
		Скала Монах Rock Monk	600
55,927412 92,759793	Скала Монах Rock Monk	Скала Городская видовка Rock City view	600
		Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	700
55,932083 92,760925	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	Скала Монах Rock Monk	700
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	1500
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	6000
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	5000
		Смотровая площадка К1 Observation platform K1	3000
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	5000
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	5000
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	5000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	5000
		Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	4000
		Верхняя станция Upper station	4000
55,939560 92,769559	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	1500
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	5000
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	4000
		Скала Воробушки Rock Sparrows	3000
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	4000

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,939560 92,769559	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	Скала Малек Rock Malek	3000
		Скала Такмак Rock Takmak	3000
		Смотровая площадка K1 Observation platform K1	2500
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	5000
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	5000
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	4000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	4000
		Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	3000
		Верхняя станция Upper station	3000
55,916948 92,744441	Скала Перья Rock Feathers	Верхняя станция B2 Top station B2	3000
		Скала 3-й столб Rock 3rd pillar	500
		Скала Предтеча Rock Forerunner	900
		Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	800
		Скала 4-й столб Rock 4rd pillar	500
55,917625 92,739391	Скала Скиф Rock Scythian	Скала Скиф Rock Scythian	300
		Скала Дед Rock Grandfather	300
		Скала 1-й столб Rock 1rd pillar	450
		Скала Слоник Rock Elephant	500
55,918594 92,743141	Скала Бабка Rock Granny	Скала Бабка Rock Granny	400
		Скала Дед Rock Grandfather	250
		Скала Перья Rock Feathers	300
55,919176 92,740724	Скала Дед Rock Grandfather	Перевал Снежный кофе Snow Coffee pass	1500
		Скала Бабка Rock Granny	300

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,919176 92,740724	Скала Дед Rock Grandfather	Скала Скиф Rock Scythian	250
		Скала Прадед Rock Great-grandfather	150
		Остановка Вторая поперечная Bus station Second transverse	2000
55,919858 92,741811	Скала Прадед Rock Great-grandfather	Скала Дед Rock Grandfather	150
		Скала Внук Rock Grandson	160
55,920998 92,741886	Скала Внук Rock Grandson	Скала Прадед Rock Great-grandfather	160
		Скала Дикарь Rock Savage	200
		Скала Дачки Rock Dachki	1100
		Скала Внук Rock Grandson	200
55,922232 92,740892	Скала Дикарь Rock Savage	Скала Дачки Rock Dachki	800
		Скала Дед Rock Grandfather	2000
55,934393 92,739492	Остановка Вторая поперечная Bus station Second transverse	Родник Живой ключик Spring Living Key	1500
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	2000
		Остановка Вторая поперечная Bus station Second transverse	1500
55,945601 92,743823	Родник Живой ключик Spring Living Key	Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	600
		Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	6000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	5000
55,950723 92,745520	Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	Остановка Вторая поперечная Bus station Second transverse	2000
		Родник Живой ключик Spring Living Key	600
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	1500
		Смотровая площадка K1 Observation platform K1	5000
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	3000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	4000
		Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	6000
		Верхняя станция Upper station	5000

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,963058 92,743078	Скала Чертов палец Rock Damn finger	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	5000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	4000
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	1500
		Остановка Турбаза Bus station Camp Site	800
		Смотровая площадка К1 Observation platform K1	4000
		Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	5000
		Верхняя станция Upper station	2000
55,938207 92,790966	Скала Воробушки Rock Sparrows	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Скала Цыпа Rock Chick	80
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	2800
		Скала Малек Rock Malek	2000
		Скала Такмак Rock Takmak	2000
		Верхняя станция В2 Top station B2	2000
55,932741 92,788809	Скала Медея Rock Medea	Скала Первенец Rock Firstborn	4000
		Скала Городская видовка Rock City view	4000
		Скала Снегирь Rock Bullfinch	300
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	4000
		Скала Бородок Rock Beard	5000
55,934629 92,786251	Скала Снегирь Rock Bullfinch	Скала Медея Rock Medea	300
		Скала Волчий лоб Rock Wolf forehead	400
55,937045 92,785109	Скала Волчий лоб Rock Wolf forehead	Скала Снегирь Rock Bullfinch	400
		Скала Олурган Rock Olurgan	300

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,938120 92,787867	Скала Олурган Rock Olurgan	Скала Волчий лоб Rock Wolf forehead	300
		Скала Жаворонок Rock Lark	200
		Скала Цыпа Rock Chick	200
55,938187 92,790320	Скала Жаворонок Rock Lark	Скала Олурган Rock Olurgan	200
		Скала Жаба Rock Toad	100
		Скала Цыпа Rock Chick	70
55,937688 92,790538	Скала Жаба Rock Toad	Скала Жаворонок Rock Lark	100
		Скала Гнездовье Rock Nesting	50
55,937243 92,790710	Скала Гнездовье Rock Nesting	Скала Жаба Rock Toad	50
55,938679 92,790227	Скала Цыпа Rock Chick	Скала Воробушки Rock Sparrows	80
		Скала Олурган Rock Olurgan	200
		Скала Жаворонок Rock Lark	70
55,934621 92,806267	Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	Скала Первенец Rock Firstborn	5000
		Скала Городская видовка Rock City view	5000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	4000
		Скала Воробушки Rock Sparrows	2800
		Скала Медея Rock Medea	4000
		Скала Гранитный карьер Rock Granite quarry	2000
		Скала Такмак Rock Takmak	2000
		Скала Бородок Rock Beard	2000
55,945169 92,811635	Скала Ермак Rock Ermak	Ручей Моховой Mokhovoy stream	900
		Скала Бородок Rock Beard	250
55,950138 92,800845	Скала Малек Rock Malek	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Скала Воробушки Rock Sparrows	2000
		Скала Такмак Rock Takmak	450
		Выход в дачи № 5 Exit of cottage No. 5	2000
		Верхняя станция В2 Top station B2	650

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,949152 92,810442	Скала Гранитный карьер Rock Granite quarry	Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	2000
		Ручей Моховой Mokhovoy stream	150
55,949095 92,801359	Скала Такмак Rock Takmak	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Скала Воробушки Rock Sparrows	2000
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	2000
		Скала Малек Rock Malek	450
		Скала Бородок Rock Beard	2300
55,949071 92,786385	Верхняя станция К1, Канатная дорога K1 upper station, Cableway	Смотровая площадка К1 Observation platform K1	350
		Станция В2 Station B2	250
55,927581 92,746510	Скала Дачки Rock Dachki	Скала Внук Rock Grandson	1100
		Скала Дикарь Rock Savage	800
55,968300 92,744571	Остановка Турбаза Bus station Camp Site	Скала Чертов палец Rock Damn finger	800
55,950469 92,810906	Ручей Моховой Mokhovoy stream	Скала Ермак Rock Ermak	900
		Скала Гранитный карьер Rock Granite quarry	150
		Скала Бородок Rock Beard	1100
		Остановка Восточный вход Bus station East entrance	800
55,944394 92,814624	Скала Бородок Rock Beard	Скала Городская видовка Rock City view	7000
		Скала Медея Rock Medea	5000
		Скала Китайская стенка, вход № 2 Rock China Wall, entrance No. 2	2000
		Скала Ермак Rock Ermak	250
		Скала Такмак Rock Takmak	2300
		Ручей Моховой Mokhovoy stream	1100

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,947585 92,781205	Смотровая площадка K1 Observation platform K1	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	3000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	2500
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	5000
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	4000
		Верхняя станция K1, Канатная дорога K1 upper station, Cableway	350
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	4000
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	4000
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	4000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	4000
		Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	5000
55,964761 92,742708	Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	5000
		Смотровая площадка K1 Observation platform K1	4000
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	400
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	2500
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	3000
		Верхняя станция Upper station	2500
55,965569 92,747986	Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	5000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	5000
		Смотровая площадка K1 Observation platform K1	4000
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	400
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	2000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	2500
		Верхняя станция Upper station	2000

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,966765 92,764350	Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	5000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	4000
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	3000
		Смотровая площадка K1 Observation platform K1	4000
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	2500
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No.2	2000
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	2000
		Верхняя станция Upper station	1500
55,966435 92,776573	Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	5000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	4000
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	4000
		Смотровая площадка K1 Observation deck K1	4000
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	3000
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	2500
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	2000
		Верхняя станция Upper station	2000
55,965516 92,817332	Выход в дачи № 5 Exit of cottage No. 5	Скала Малек Rock Malek	2000
55,958909 92,780471	Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	4000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	6000
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	5000
		Верхняя станция Upper station	4000

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Широта и долгота Latitude and longitude	Начальная точка The starting point	Конечная точка The final point	Расстояние от начальной точки до конечной, м Distance from starting point to ending point, m
55,955051 92,768310	Верхняя станция Upper station	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	4000
		Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	5000
		Скала Чертов палец Rock Damn finger	2000
		Выход в дачи № 1 Exit of cottage No. 1	2500
		Выход в дачи № 2 Exit of cottage No. 2	2000
		Выход в дачи № 3 Exit of cottage No. 3	1500
		Выход в дачи № 4 Exit of cottage No. 4	2000
		Нижняя станция: трасса для сноубордистов Lower station: snowboarding track	4000
55,949645 92,789355	Станция В2 Station B2	Верхняя станция К1, канатная дорога K1 upper station, cableway	250
		Верхняя станция В2 Top station B2	200
		Скала Малек Rock Malek	650
		Станция В2 Station B2	200
55,950528 92,792551	Верхняя станция В2 Top station B2	Скала Малый беркут Rock Little golden eagle	3000
		Скала Воробушки Rock Sparrows	2000
55,954697 92,818920	Остановка Восточный вход Bus station East entrance	Ручей Моховой Mokhovoy stream	800

Методы решения

Динамика лесного пожара — это сложная многофакторная модель, которая должна учитывать идентифицированные факторы: количество и свойства горючих слоев, рост деревьев, усреднение уравнения горения слоев, значение энтальпии, коэффициент теплоотдачи, расход горючего материала в слоях, удельная поверхность слоя, теплоотдача слоя, переход активного горючего в разные стадии горения, ускорение сгорания, полярные координаты, высоту пламени, угол отклонения пламени от вертикали,

угол направления ветра, скорость ветра, масштабируемый коэффициент, скорость вращения земли и т.д. [13–16].

В данной статье целесообразно взять упрощенную модель динамики лесного пожара [15]. На интервале времени $T = [t_0, t_1]$ берется математическая модель (A, B) динамики $(x(t), u(t))t \in T$ локального лесного пожара (ЛЛП) [12]. Модель имеет вид нестационарной векторно-матричной дифференциальной системы:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t),$$

где $t \in T$, $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^3$;

A и B — значения, полученные от параметрической идентификации реальной физической модели;

$x_1(t)$ — текущее значение площади контура ЛЛП;

$x_2(t)$ — текущее значение длины параметра ЛЛП;

$x_i(t)$ — текущая величина удаления от заданной точки в зоне гари ЛЛП до кромки его фронта в фиксированном пожароопасном направлении $i(i = 3, \dots, n)$;

$u_1(t)$ — фактор активности пламени и тлеющих продуктов ЛЛП реализуется в 70 % вероятности возгорания примыкающей местности;

$u_2(t)$ — скорость ветра в зоне действия ЛЛП равна 0;

$u_3(t)$ — количество естественных и искусственных (при проведении тушения ЛЛП) атмосферных осадков, выпавших на 1 м^2 , в зоне гари ЛЛП равно 0 за текущий промежуток времени $[t_0, t_1] \subset T$.

Легко заметить, что модель может усложняться или упрощаться на дополнительные параметры через динамику $(x(t), u(t))$. В первоисточнике приводятся доказательства возможности такого упрощения или усложнения модели, приводятся достаточные условия ее существования и алгоритмы решения [12].

Задачу о кратчайшем пути можно представить как транспортную. В более широком смысле ее представляют как оптимизационную задачу с поиском минимальных точек с промежуточными пунктами, поэтому для решения предложен алгоритм Дейкстры [17, 18]. Он широко используется для нахождения кратчайших путей в графах, где веса ребер неотрицательны. При эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» в случае лесного пожара использование алгоритма Дейкстры обосновано следующими причинами:

1. Кратчайший путь: алгоритм находит кратчайший путь от одной вершины (стартовой точки) до всех остальных вершин графа. Это важно для эвакуации, поскольку он поможет определить оптимальный маршрут для безопасного и быстрого перемещения людей из зоны опасности.

2. Эффективность: алгоритм обладает хорошей производительностью и эффективностью при нахождении кратчайших путей в графах с неотрицательными весами ребер. Это позволяет быстро рассчитать оптимальные маршруты для эвакуации в экстренных ситуациях.

3. Простота реализации: алгоритм относительно прост в реализации и понимании, что делает его удобным инструментом для практического применения в различных ситуациях, включая планирование эвакуации.

4. Гарантия оптимальности: алгоритм гарантирует нахождение оптимального пути при условии неотрицательных весов ребер. Это означает, что найденный маршрут будет самым коротким и наилучшим с точки зрения безопасности при эвакуации [19].

Все эти факторы делают алгоритм Дейкстры подходящим инструментом для нахождения оптимального пути эвакуации [20, 21].

Расчеты

Алгоритм Дейкстры не использует явные математические формулы, а опирается на интерактивный процесс обновления расстояний до вершин графа [22]. Расчет в разработанной программе ЭВМ следующий:

1. Инициализация: устанавливаем начальную вершину исходной точкой, а расстояние от нее до всех остальных вершин равным бесконечности, за исключением самой вершины, расстояние до которой равно 0.

2. Выбор вершины: на каждом шаге выбираем вершину с наименьшим известным расстоянием до нее.

3. Релаксация ребер: для выбранной вершины пересчитываем расстояния до соседних вершин, если новое расстояние меньше текущего [23, 24].

Формула для релаксации ребра (u, v) выглядит следующим образом:

$$\text{if } \text{dist}[v] > \text{dist}[u] + \text{weight}(u, v) \text{ then } \text{dist}[v] = \text{dist}[u] + \text{weight}(u, v),$$

где $\text{dist}[v]$ — текущее расстояние до вершины v ;
 $\text{dist}[u]$ — текущее расстояние до вершины u ;
 $\text{weight}(u, v)$ — вес ребра между вершинами u и v .

Для моделирования ситуации эвакуации возьмем точку возникновения пожара с координатами 55.92961 с.ш. и 92.75339 в.д. Вблизи данной точки находятся достопримечательности: Дачки, Городская видовка, Монах и Столбовская видовка. Поэтому расчеты оптимального пути эвакуации будем проводить для указанных достопримечательностей. Эвакуация будет рассчитываться ко всем выходам из заповедника.

Расчеты эвакуации проведены для достопримечательностей, таких как Городская видовка, Монах и Столбовская видовка. В табл. 2 показаны результаты расчетов.

Полный маршрут оптимальных путей эвакуации, отмеченных в табл. 2, представлен в табл. 3. Также маршруты эвакуации для наглядности изображены на рисунке.

Данные результаты особенно важны в случае лесных пожаров, наводнений или других природных ката-

Таблица 2. Расчет пути эвакуации из заповедника вблизи точки пожара до выхода в город

Table 2. Calculation of the escape route from the reserve in the vicinity of the fire point before entering the city

Конечная точка эвакуации The final point of evacuation	Начальная точка эвакуации The starting point of evacuation			
	Скала Городская видовка Rock City view	Скала Дачки Rock Dachki	Скала Монах Rock Monk	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka
К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	4650	9110	4050	3350
Остановка Турбаза Bus station Camp Site	7100	7610	6500	5800
Выход дачи № 1 Exit of cottage No. 1	6300	10 710	5700	5000
Выход дачи № 2 Exit of cottage No. 2	6300	10 310	5700	5000
Выход дачи № 3 Exit of cottage No. 3	6300	8310	5700	5000
Выход дачи № 4 Exit of cottage No. 4	6300	9310	5700	5000
Выход дачи № 5 Exit of cottage No. 5	7750	12 210	7150	6450
Нижняя станция: трасса для сноубордистов The lower station: snowboarding track	5300	9760	4700	4000
Верхняя станция Upper station	5300	8810	4700	4000
Станция В2 Station B2	4900	9360	4300	3600
Станция В2. Верхняя Station B2. Upper	5100	9560	4500	3800
Остановка Восточный вход Bus station East entrance	7950	10 910	8550	8450

Таблица 3. Итоговые результаты расчетов оптимального выхода из национального заповедника «Красноярские столбы» с маршрутом

Table 3. The final results of calculations of the optimal exit from the Krasnoyarsk Pillars National Reserve with the route

Начальная точка эвакуации The starting point of evacuation	Конечная точка эвакуации The final point of evacuation	Шаг Step	Откуда Where from	Куда Where	Сумма, м Amount, m	Накопительно, м Cumulative, m	Итог, м Total, m
Скала Дачки Rock Dachki	Остановка Турбаза Bus station Camp Site	1	Скала Дачки Rock Dachki	Скала Дикарь Rock Savage	800	800	7610
		2	Скала Дикарь Rock Savage	Скала Внук Rock Grandson	200	1000	
		3	Скала Внук Rock Grandson	Скала Прадед Rock Great-grandfather	160	1160	
		4	Скала Прадед Rock Great-grandfather	Скала Дед Rock Grandfather	150	1310	
		5	Скала Дед Rock Grandfather	Остановка Вто- рая поперечная Bus station Second transverse	2000	3310	

Начальная точка эвакуации The starting point of evacuation	Конечная точка эвакуации The final point of evacuation	Шаг Step	Откуда Where from	Куда Where	Сумма, м Amount, m	Накопительно, м Cumulative, m	Итого, м Total, m
Скала Дачки Rock Dachki	Остановка Турбаза Bus station Camp Site	6	Остановка Вторая поперечная Bus station Second transverse	Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	2000	5310	7610
		7	Часовня святого Иннокентия Московского и Алеутского The Chapel of St. Inokenty of Moscow and Aleutsky	Скала Чертов палец Rock Damn finger	1500	6810	
		8	Скала Чертов палец Rock Damn finger	Остановка Турбаза Bus station Camp Site	800	7610	
Скала Городская видовка Rock City view	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cableway	1	Скала Городская видовка Rock City view	Скала Монах Rock Monk	600	600	4650
		2	Скала Монах Rock Monk	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	700	1300	
		3	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	Смотровая площадка (К1) Observation platform (K1)	3000	4300	
		4	Смотровая площадка (К1) Observation deck (K1)	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	350	4650	
Скала Монах Rock Monk	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	1	Скала Монах Rock Monk	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	700	700	4050
		2	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	Смотровая площадка (К1) Observation deck (K1)	3000	3700	
		3	Смотровая площадка (К1) Observation deck (K1)	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	350	4050	

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Начальная точка эвакуации The starting point of evacuation	Конечная точка эвакуации The final point of evacuation	Шаг Step	Откуда Where from	Куда Where	Сумма, м Amount, m	Накопительно, м Cumulative, m	Итого, м Total, m
Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	1	Скала Столбовская видовка Rock Stolbovskaya vidovka	Смотровая площадка (К1) Observation deck (K1)	3000	3000	3350
		2	Смотровая площадка (К1) Observation deck (K1)	К1 верхняя станция, канатная дорога K1 upper station, cable car	350	3350	



Итоговый путь эвакуации от смоделированной точки пожара: П — точка возникновения пожара; А–Г — точки эвакуации; 1–9 — пути маршрута
The final escape route from the simulated fire point: P — point of fire origin; A–G — evacuation points; 1–9 — route paths

строф. В результате были рассчитаны оптимальные пути для маршрутов:

- скала Дачки – остановка «Турбаза»;
- скала Городская видовка – К1 верхняя станция, канатная дорога;
- скала Монах – К1 верхняя станция, Канатная дорога;
- скала Столбовская видовка – К1 верхняя станция, канатная дорога.

Поэтому разработка, поддержание и постоянное обновление маршрутов эвакуации способствует минимизации ущерба и обеспечению безопасности населения в ЧС.

Влияние скорости распространения кромки пожара учитывалось следующим образом. Берем скорость пожара (пессимистичный прогноз) 10 м в мин, тогда путь от скалы Дачки до остановки «Турбаза» (длиной примерно 4,35 км) будет полностью охвачен пожаром через 7 ч 15 мин. Путь от скалы Городская видовка до К1 верхняя станция, канатная дорога (длиной примерно 3 км) будет полностью охвачен пожаром через 5 ч [25].

Рассчитаем стратегию уклонения от пожара. Пожар от точки возникновения до скалы Дачки дойдет за 40 мин. Человек пройдет это расстояние в 400 м за 5 мин. Также от точки возникновения до скалы Столбовская видовка огонь перекроет маршрут Городская видовка – Монах – Столбовская видовка в 700 м за 70 мин. Человек пройдет этот маршрут по тропам — 1,5 км примерно за 15 мин.

По данным расчетам видно, что время человека в пути меньше времени достижения этой точки пожаром. Это значит, что он успел вовремя уйти от пожара.

Данные были рассчитаны при условии, что человек вовремя узнал о пожаре, иначе требуемое время нужно уменьшить на время реагирования и получения информации.

Результаты и их обсуждение

В первую очередь результаты исследования необходимы для своевременного оповещения посетителей парка «Красноярские столбы» для сокращения времени эвакуации из зоны распространения лес-

ного пожара, выбора стратегии уклонения от пожара и улучшения системы поиска заблудившихся посетителей. В дальнейшем исследования могут быть использованы для оптимизации систем оповещения, эвакуации и подготовки сил средств к ЧС на других объектах.

Рассчитанные пути эвакуации при лесном пожаре также актуальны в случае получения травм посетителями, наводнений, природных катастроф или других ЧС.

Перспективным выглядит анализ сети тропинок и ее оптимизации с учетом затрат калорий на маршрут для людей с разным уровнем спортивной подготовки.

Существенным недостатком решения оптимизационной задачи алгоритмом Дейкстры с достаточными условиями оптимальности определения точек минимума является невозможность оценить пожарные риски из-за сложности и количества взаимодействующих факторов пожара для оценок вероятностных оценок эвакуации людей в безопасную зону, пока фактически не начнется лесной пожар.

Естественным выглядит продолжение изучения объекта исследования статьи расчетом оптимального пути эвакуации через создание математической модели различных вариантов возникновения и развития лесного пожара, оценки пожарных рисков для расчета достоверных вероятностных сценариев эвакуации туристов парка в безопасную зону.

Выводы

Рассчитаны оптимальные пути эвакуации из национального парка «Красноярские столбы» при лесном пожаре с использованием алгоритма Дейкстры в разработанной программе ЭВМ. Построен оптимальный путь эвакуации для моделирования ситуации пожара в геоинформационной системе 2GIS. Оценена стратегия уклонения от пожара. Определены эффективные маршруты эвакуации, которые позволяют людям оперативно покинуть опасную зону пожара и добраться до места, где они будут в безопасности. Цель исследования достигнута.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shashi Shekhara, Kwang Soo Yanga, Venkata M.V. Gunturia, Lydia Manikondaa, Dev Olivera et al. Experiences with evacuation route planning algorithms // International Journal of Geographical Information Science. 2012. Vol. 26. No. 12. Pp. 2253–2265. DOI: 10.1080/13658816.2012.719624
2. Фуряев И.В., Злобина Л.П. Условия возникновения и распространения пожаров в лесных районах Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. 2017. № 1–2. Pp. 66–74. DOI: 10.15372/SJFS20230602
3. McGee T.K. Evacuating first nations during wildfires in Canada // Fire Safety Journal. 2021. Vol. 120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103120
4. Кротов В.Ф., Лагоша Б.А., Лобанов С.М., Данилина Н.И., Сергеев С.И. Основы теории оптимального управления : учеб. пособие для экономических вузов / под ред. В.Ф. Кротова. М. : Высшая школа, 1990. 430 с.

5. *Anne Ganteaume, Renaud Barbero, Marielle Jappiot, Eric Maille.* Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface // *Journal of Safety Science and Resilience.* 2021. Vol. 2. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001
6. *Ioannis Zikeloglou, Efthimios Lekkas, Stylianos Lozios, Maria Stavropoulou.* Is early evacuation the best and only strategy to protect and mitigate the effects of forest fires in WUI areas? A qualitative research on the residents' response during the 2021 forest fires in NE Attica, Greece // *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2023. Vol. 88. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2023.103612
7. *Вайсброт И.А., Ямских Г.Ю., Чернов В.И., Орлова О.С.* Роль геоинформационных технологий в развитии экологического туризма красноярской дестинации // *Географическая среда и живые системы.* 2022. № 1. С. 93–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-93-109
8. *Гуля А.Н., Колбовский Е.Ю., Гайрабеков У.Т.* Картографо-геоинформационное обеспечение устойчивого развития горных регионов // *ИНТЕРКАРТО. ИНТЕРГИС.* 2019. Т. 25. № 1. С. 47–65. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-47-65. EDN UKOVIE.
9. *Mohamad Hassan Ansari, Masoud Bijani, Enayat Abbasi, Imaneh Goli.* Determinants of local community participation in forest fire management in the northern Iran // *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2024. Vol. 107. P. 104478. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104478
10. *Eva Dodsworth.* Geographic Information Systems // *Reference Module in Social Sciences.* 2024. Vol. 1. Pp. 415–427. DOI: 10.1016/B978-0-323-95689-5.00126-7
11. *Ананович З.В.* Использование матриц смежности для визуализации больших графов // *Электронные библиотеки.* 2019. Т. 22. № 1. С. 2–36. DOI: 10.26907/1562-5419-2019-22-1-2-36
12. *Курапов С.В., Давидовский М.В.* Вычислительные методы определения инвариантов графа // *International Journal of Open Information Technologies.* 2021. Vol. 9. No. 2. Pp. 1–8.
13. *Орловский С.Н., Карнаухов А.И., Соколова В.А., Ореховская А.А., Марков В.А., Кривоногова А.С.* Математическое описание распространения лесного пожара // *Systems Methods Technologies.* 2022. № 4 (56). С. 100–104. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-4-100-104
14. *Перминов В.А.* Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2010. 40 с.
15. *Терентьева О.А.* Математическое моделирование предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2023. 22 с.
16. *Файзрахманов Г.П.* Прогнозирование распространения лесного пожара на основе апостериорного моделирования его нестационарной динамики : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2006. 149 с.
17. *Jason, Melvin Siever, Alvin Valentino, Kristien Margi Suryaningrum, Rezki Yunanda.* Dijkstra's algorithm to find the nearest vaccine location // *Procedia Computer Science.* 2023. Vol. 216. No. 3. Pp. 5–12. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.105
18. *Yesy Diah Rosita, Erly Ekayanti Rosyida, Muhammad Adik.* Rudiyanto Implementation of Dijkstra Algorithm and Multi-Criteria Decision Making for Optimal Route Distribution // *Procedia Computer Science.* 2019. No. 161. Pp. 378–385. DOI: 10.1016/j.procs.2019.11.136
19. *Balzotti L., Franciosa P.G.* Non-crossing shortest paths lengths in planar graphs in linear time // *Discrete Applied Mathematics.* 2024. Vol. 346. DOI: 10.2139/ssrn.4167477
20. *Близнякова Е.А., Куликов А.А., Куликов А.В.* Сравнительный анализ методов поиска кратчайшего пути в графе // *Архитектура, строительство, транспорт.* 2022. № 1. С. 80–87. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87. EDN OOHLSV.
21. *Крутько Д.А., Буряченко В.В.* Проблема поиска кратчайшего пути в трехмерном пространстве на территории Торгашинского хребта // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики.* 2022. Т. 2. С. 1452–144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-poiska-kratchayshego-puti-v-trehmernom-prostranstve-na-territorii-torgashinskogo-hrebta>
22. *Архипова О.О., Каплунов А.Н., Шевырев Л.Ю.* Решение транспортной задачи «алгоритмом Дейкстры» // *Тенденции развития науки и образования.* 2021. № 69–2. С. 29–32. DOI: 10.18411/lj-01-2021-51. EDN QKZHTZ.
23. *Колосова Е.С., Попова С.В.* Транспортная задача как метод решения экономических задач // *Студенческий вестник : электрон. научн. журн.* 2020. № 24 (122). URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/122>
24. *Жукова Т.В., Гладких Д.А.* Программа визуализации графовых алгоритмов // *Актуальные проблемы обучения математике, информатике и информатизации образования : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 120-летию со дня рождения А.Н. Колмогорова.* 2023. С. 116–121. EDN BZUPDF.
25. *Меженский Д.В., Петров В.В.* Влияние скорости ветра на распространение пожаров. Особенности тушения // *Современные вопросы безопасности : сб. тр. II Вузовской науч.-техн. конф. молодых исследователей.* Волгоград, 2024. С. 65–68. EDN RXERTW.

REFERENCES

- Shashi Shekhara, Kwang Soo Yanga, Venkata M.V. Gunturia, Lydia Manikondaa, Dev Olivera et al. Experiences with evacuation route planning algorithms. *International Journal of Geographical Information Science*. 2012; 26(12):2253-2265. DOI: 10.1080/13658816.2012.719624
- Furyaev I.V., Zlobina L.P. Conditions of occurrence and spread of fires in forest areas of the Krasnoyarsk Territory. *Conifers of the boreal zone*. 2017; 1-2:66-74. DOI: 10.15372/SJFS20230602 (rus).
- McGee T.K. Evacuating First Nations during wildfires in Canada. *Fire Safety Journal*. 2021; 120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103120
- Krotov V.F., Lagosha B.A., Lobanov S.M., Danilina N.I., Sergeev S.I. *Fundamentals of the theory of optimal control : textbook for economic universities*. Ed. by V.F. Krotov. Moscow, Higher School, 1990; 430. (rus).
- Anne Ganteaume, Renaud Barbero, Marielle Jappiot, Eric Maille. Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. *Journal of Safety Science and Resilience*. 2021; 2. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001
- Ioannis Zikeloglou, Efthimios Lekkas, Stylianos Lozios, Maria Stavropoulou. Is early evacuation the best and only strategy to protect and mitigate the effects of forest fires in WUI areas? A qualitative research on the residents' response during the 2021 forest fires in NE Attica, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023; 88. DOI: 10.1016/j.ijdr.2023.103612
- Weissbrot I.A., Yamskikh G.Yu., Chernov V.I., Orlova O.S. The role of geoinformation technologies in the development of ecological tourism in the krasnoyarsk destination. *Geographical environment and living systems*. 2022; 1:93-109. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-93-109 (rus).
- Gunya A.N., Kolbovsky E.Yu., Gayrabekov U.T. Cartographic and geoinformation support for sustainable development of mountain regions. *INTERCARTO. INTERGIS*. 2019; 25(1):47-65. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-47-65. EDN UKOVIE. (rus).
- Mohamad Hassan Ansari, Masoud Bijani, Enayat Abbasi, Imaneh Goli. Determinants of local community participation in forest fire management in the northern Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2024; 107:104478. DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104478
- Eva Dodsworth. Geographic Information Systems. *Reference Module in Social Sciences*. 2024; 1:415-427. DOI: 10.1016/B978-0-323-95689-5.00126-7
- Apanovich Z.V. Using adjacency matrices to visualize large graphs. *Russian Digital Libraries Journal*. 2019; 22(1):2-36. DOI: 10.26907/1562-5419-2019-22-1-2-36 (rus).
- Kurapov S.V., Davidovsky M.V. Computational methods for determining graph invariants. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021; 9(2):1-8. (rus).
- Orlovsky S.N., Karnaukhov A.I., Sokolova V.A., Orekhovskaya A.A., Markov V.A., Krivonogova A.S. Mathematical description of the spread of forest fire. *System methods and technologies*. 2022; 4(56):100-104. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-4-100-104 (rus).
- Perminov V.A. *Mathematical modeling of the occurrence of crown and mass forest fires : author's abstract dis. ... Doctor of Physics and Mathematics Sciences*. Tomsk, 2010; 40. (rus).
- Terentyeva O.A. *Mathematical modeling of forest fire prevention based on the theory of Markov processes : abstract of thesis dis. ... cand. tech. Sciences*. Omsk, 2023; 22. (rus).
- Faizrakhmanov G.P. *Forecasting the spread of a forest fire based on a posteriori modeling of its non-stationary dynamics : dis. ... cand. tech. Sciences*. Irkutsk, 2006; 149. (rus).
- Jason, Melvin Siever, Alvin Valentino, Kristien Margi Suryaningrum, Rezki Yunanda. Dijkstra's algorithm to find the nearest vaccine location. *Procedia Computer Science*. 2023; 216(3):5-12. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.105
- Yesy Diah Rosita, Erly Ekayanti Rosyida, Muhammad Adik. Rudiyanto Implementation of Dijkstra Algorithm and Multi-Criteria Decision Making for Optimal Route Distribution. *Procedia Computer Science*. 2019; 161:378-385. DOI: 10.1016/j.procs.2019.11.136
- Balzotti L., Franciosa P.G. Non-crossing shortest paths lengths in planar graphs in linear time. *Discrete Applied Mathematics*. 2024; 346. DOI: 10.2139/ssrn.4167477
- Bliznyakova E.A., Kulikov A.A., Kulikov A.V. Comparative analysis of methods for finding the shortest path in a graph. *Architecture, Construction, Transport*. 2022; 1:80-87. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87. EDN OOHLSV. (rus).
- Krutko D.A., Buryachenko V.V. The problem of finding the shortest path in three-dimensional space on the territory of the torgashinsky ridge. *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*. 2022; 2:1452-144. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-poiska-kratchayshego-puti-v-trehmernom-prostranstve-na-territorii-torgashinskogo-hrebt> (rus).
- Arkhipova O.O., Kaplunov A.N., Shevryev L.Yu. The solution of the transport problem by the Dijkstra algorithm. *Trends in the Development of Science and Education*. 2021; 69-2:29-32. DOI: 10.18411/lj-01-2021-51. EDN QKZHTZ. (rus).
- Kolosova E.S., Popova S.V. Transport problem as a method for solving economic problems. *Student Bulletin : electron. scientific magazine*. 2020; 24(122). URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/122> (rus).

24. Zhukova T.V., Gladkikh D.A. Program for visualization of graph algorithms. *Current Problems in Teaching Mathematics, Computer Science and Informatization of Education : Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 120th anniversary of the birth of A.N. Kolmogorov*. 2023; 116-121. (rus).
25. Mezheny D.V., Petrov V.V. Influence of wind speed on fire spread. Features of extinguishing. *Modern Safety Issues : collection of works of the II University scientific and technical conference of young researchers*. Volgograd, 2024; 65-68. EDN RXERTW. (rus).

Поступила 04.05.2024, после доработки 29.11.2024;

принята к публикации 02.12.2024

Received May 4, 2024; Received in revised form November 29, 2024;

Accepted December 2, 2024

Информация об авторах

МАСАЕВ Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева), Россия, 660000, г. Красноярск, пр-т им. газеты Красноярский Рабочий, 31; ORCID: 0000-0002-5825-2708; e-mail: faberi@list.ru

ШНАЙДЕР Виктория Александровна, магистр, Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева), Россия, 660000, г. Красноярск, пр-т им. газеты Красноярский Рабочий, 31; ORCID: 0009-0004-4465-0993; e-mail: shnayder.01@mail.ru

Вклад авторов:

Масаев С.Н. — разработка концепции исследования; разработка программы; научное руководство.

Шнайдер В.А. — сбор и обработка данных; расчет путей эвакуации; написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey N. MASAIEV, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Siberian State University of Science and Technology named after acad. M.F. Reshetnev, 31, pr-t them. newspapers Krasnoyarsk Worker, Krasnoyarsk, 660000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5825-2708; e-mail: faberi@list.ru

Victoria A. SHNAYDER, Master's degree, Siberian State University of Science and Technology named after acad. M.F. Reshetnev, 31, pr-t them. newspapers Krasnoyarsk Worker, Krasnoyarsk, 660000, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-4465-0993; e-mail: shnayder.01@mail.ru

Contribution of the authors:

Masaev S.N. — development of the research concept; program development; scientific guidance.

Shnayder V.A. — data collection and processing; calculation of escape routes; writing an article.

The authors declare no conflicts of interests.