

ЕКОЛОГІЯ І МОНІТОРИНГ

УДК 681.142.2

**В. В. БОГОМОЛОВ, А. В. ОСТАПЧИК, А. И. БОРИСЕНКО,
Т. А. КОЧНЕВА, О. А. КУЦЕНКО, Л. В. АЛЕКСЕЕВА ***

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОЙ МОБИЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Український науково-дослідницький інститут лісного господарства та агролісосоцеліорації ім. Г. Н. Высоцького

Проанализирована и построена система эффективного получения оперативной информации о дорогах и оптимальном движении по сети дорог с целью в минимальные сроки реагировать на лесные пожары. Приведен алгоритм и технология сведения задачи нахождения минимального по времени пути между исходным и конечным пунктами и проходящего через произвольное количество промежуточных пунктов, причём все пункты произвольно расположены относительно графа дорог.

Ключевые слова: лесное хозяйство, лесные пожары, планарный граф, сеть дорог, алгоритмы поиска путей, алгоритм Флойда, алгоритм Форда, кратчайший путь, привязка объектов к графу.

Вступление. Проблема защиты лесов от пожаров – одна из важнейших и актуальнейших проблем лесного хозяйства. Оперативное обнаружение пожаров, реагирование и максимально быстрая доставка всего необходимого для ликвидации лесного пожара могут быть эффективными при использовании электронных карт дорог и нахождении кратчайшего пути из пункта отправки (например, пожарная часть) до места пожара.

Данной проблемой занимаются во многих странах и в разных аспектах (в частности, в Российской Федерации, обладающей очень протяжёнными лесными массивами), при этом большее внимание уделяется учёту рельефа местности, достижимости участков, поражённых пожарами, прогнозам распространения пожаров, что обусловлено слабой инфраструктурой дорог в районах лесов, большими размерами лесов и сложным рельефом [4, 5, 10]. В Украине данная проблема является также весьма актуальной, поскольку спецификой лесного хозяйства нашей страны является довольно большая сеть дорог, информационная обработка и учет при пожаротушении которых требуют оптимизированных алгоритмов маршрутизации путей.

Целью данной работы является создание электронных картографических материалов со всеми геометрическими, топологическими и атрибутивными данными в наиболее удобном для эффективного обнаружения и ликвидации лесных пожаров виде, а также программ автоматического расчёта всех необходимых для этого данных.

Объекты и методика исследований. Для решения поставленной задачи используется математический аппарат теории графов, топологические отношения между элементами графа и алгоритмы работы с графами [9].

Как известно, граф представляет собой непустое упорядоченное множество объектов называемых узлами и рёбрами (ребро представляет собой упорядоченную пару узлов, то есть рассматривается ориентированная разновидность графа).

Для разных областей применения виды графов могут различаться направленностью, ограничениями, накладываемыми на количество связей и дополнительными данными о вершинах или рёбрах.

Путём (или цепью) в графе называют конечную последовательность вершин, в которой каждая вершина (кроме последней) соединена ребром со следующей в последовательности вершин. Инфраструктура (сеть) дорог моделируется планарным графом (графом, полностью укладываемым в плоскость), в котором перекрёстки дорог являются узлами, а участки дорог между двумя перекрёстками – его рёбрами. Искомым решением задачи в такой постановке будет последовательность участков сети дорог (рёбер графа дорог),

*© В. В. Богомоллов, А. В. Остапчик, А. В. Борисенко, Т. А. Кочнева, О. А. Куценко, Л. В. Алексеева, 2013

составляющая непрерывный путь между начальным пунктом отправки средств пожаротушения и конечным пунктом (местом возникновения пожара), удовлетворяющий необходимым критериям (минимальное время пути, минимальное расстояние между двумя пунктами, отсутствие труднопроходимых участков дорог и т. д.)

Части и методы решения задачи.

Решаемую задачу целесообразно разбить на следующие части:

– создание правильного статического (заранее подготовленного) планарного графа для всего рассматриваемого в данном регионе множества дорог с учётом всех характеристик (одностороннее или двухстороннее движение, наличие препятствий, ограничения скорости движения, состояние покрытия дороги, вид покрытия, длина участков дорог между перекрёстками, уклон и т. д.) для применения алгоритмов поиска и построения оптимальных путей движения между начальным пунктом и конечным пунктом назначения.

– собственно использование классических алгоритмов поиска минимальных по весу путей (в нашем случае – времени движения по данному пути) между узлами графа, при этом, если искомый путь должен проходить через несколько промежуточных пунктов, то выбор наиболее выгодной последовательности посещения этих пунктов.

– наиболее громоздкая и многопараметрическая часть – привязка пунктов начала движения, промежуточных пунктов посещения и пункта назначения, которые лежат на плоскости произвольно относительно дорог, к построенному графу дорог (нахождение ближайших к перечисленным пунктам узлов графа (перекрёстков). Для определения места возникновения лесного пожара предполагается использование данных наблюдения с двух и более вышек противопожарного наблюдения и вычисления с точностью до выдела точки пересечения соответствующих азимутов.

Результаты. Для решения задачи была построена математическая модель (рис. 1). Дороги представлены на карте полилиниями, состоящими из вершин, соединённых отрезками прямых, при этом предполагается следующее:

а) если две полилинии пересекаются, то точка пересечения является узлом графа;

б) ребро графа соединяет два узла – это дорога от перекрёстка до перекрёстка, либо до границы участка дороги с данным типом покрытия (так называемый «ложный» узел графа, в котором соединяются только два ребра). Ребру присваиваются характеристики: длина, максимальная скорость движения по данной дороге, направленность (двустороннее или одностороннее движение), время движения по этому ребру от узла до узла. Время движения и есть присваиваемый ребру графа вес (в данной реализации задачи; в дальнейшем алгоритм формирования веса ребра может учитывать и другие характеристики, не рассмотренные в этой работе);

в) пункт отправления, промежуточные пункты посещения (гаражи, заправочные станции, склады, водозаборы и т. д.) и пункт назначения представляются точками на плоскости и характеризуются своими координатами. Эти пункты обычно имеют подъездные пути, но в этой работе они либо интерпретируются как дороги и входят в граф дорог, либо отождествляются с самим точечным объектом при малой протяжённости;

г) модель не рассматривает никаких других объектов, кроме перечисленных, и не учитывает возможные препятствия в виде рек, зданий, оврагов и т. д. – это требует гораздо большей детализации, которой на данном этапе нет;

д) лесной пожар, в отличие от точечных объектов (см. пункт в) является случайно расположенным произвольно относительно сети дорог площадным объектом, и, возможно, затрагивающим сами дороги и перекрёстки; пункт назначения выбирается указанием точки, куда необходимо доставить требуемые средства пожаротушения.

Дороги по бумажной карте или аэрофотоснимку оцифровываются и преобразуются в правильный планарный граф ранее разработанными программами [6, 7], при этом создаются все необходимые топологические связи между узлами и рёбрами графа. В графе допускаются висячие рёбра (тупиковые дороги без продолжения), смежные рёбра (дороги,

примыкающие друг к другу без ветвления), кратные рёбра и циклы (кольцевые дороги начинающиеся и кончающиеся в одном узле графа).

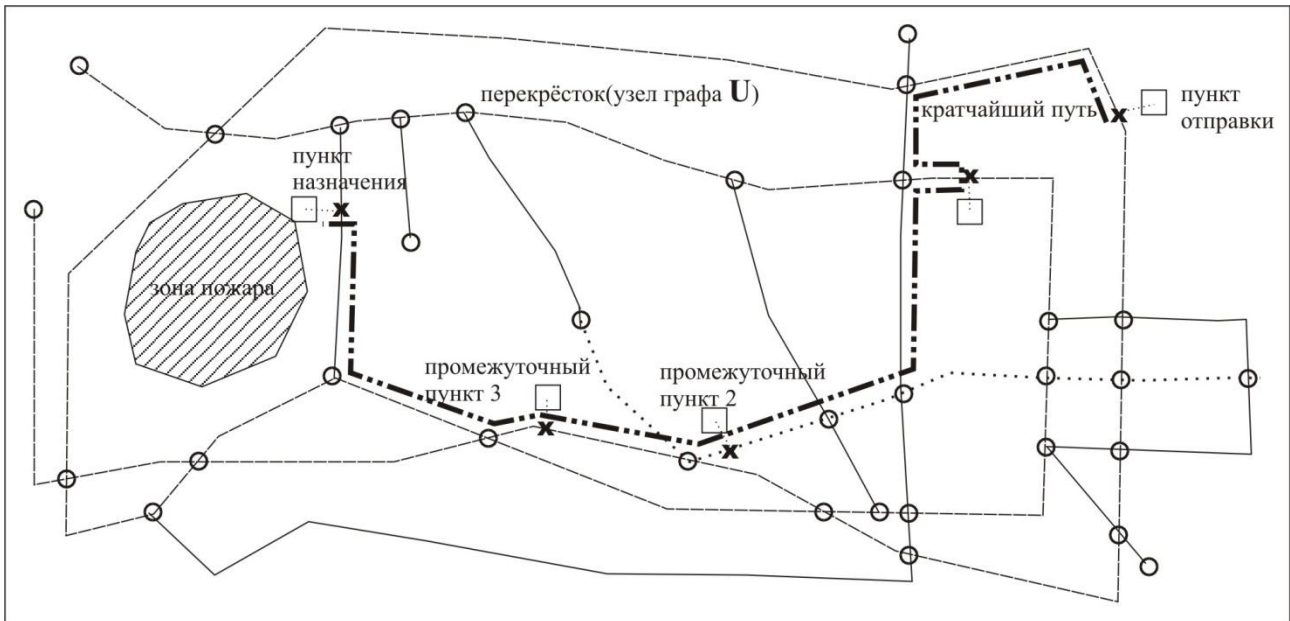


Рис. 1 – Общий вид графа, моделирующего сеть дорог. На нём видны дороги разных типов, их пересечения образуют узлы и рёбра графа, вычисленный кратчайший путь показан жирной линией, он соединяет пункт отправки и пункт назначения, последовательно проходя через промежуточные пункты.

На тестовом примере Сумской области были просчитаны затраты времени и других ресурсов. Построение графа дорог (примерно 3 500 узлов и около 5 000 рёбер) занимает в данном случае около 30 минут процессорного времени на процессоре AMD 1.6 ГГц с оперативной памятью 1 Гб. Даже с учётом того, что оцифрованные дороги специальным алгоритмом сглаживаются, чтобы убрать лишние вершины полилиний (так как время обработки графа зависит от количества сегментов всех полилиний, составляющих граф), это количество в рассмотренном примере достигает несколько десятков тысяч. Вершина полилинии может быть без ущерба для полноты информации удалена, если высота, опущенная из неё на сторону треугольника, образованного этой вершиной, ей предшествующей и следующей за ней, меньше по длине, чем заданная геометрическая точность обработки данных (обычно 1,5 м). Такие временные характеристики неудовлетворительны для практического применения, поэтому необходимо использовать статический граф, то есть предварительно созданный и перестраиваемый только при изменении сети дорог.

Это приводит к проблеме оперативного реагирования на ситуации, когда некоторые дороги вдруг стали недоступными, Решение этой проблемы рассмотрено ниже.

Наиболее удобный для практического применения на статическом графе поиск минимального по времени движения пути между двумя узлами есть алгоритм Флойда – Уоршелла [3], для которого строится матрица достижимости, каждый элемент которой содержит вес кратчайшего по весу пути между двумя узлами или метку о том, что такого пути не существует вовсе, и матрицу узлов этих путей, по которой и воссоздаётся сам кратчайший путь. Поскольку алгоритм Флойда – Уоршелла вычисляет предварительно кратчайшие пути между всеми возможными парами узлов (от каждого перекрёстка до каждого), то использование его даёт наиболее быстрый результат.

Тестовый пример Сумской области показал, что предварительное построение матриц достижимости и путей занимает примерно 30 минут, таким образом предварительная подготовка, построение графа и матриц занимает 1 час времени, зато получение пути между двумя заданными узлами происходит практически мгновенно.

К сожалению, этим методом можно пользоваться только на неизменном графе, в противном случае, если часть дорог вдруг стала недоступной в результате пожара, завала, других причин, необходимо либо тратить очень много времени на перестройку графа, либо использовать другой метод, не требующий построения матриц. Этим методом может быть алгоритм Дейкстры [2] или алгоритм Форда [1], при использовании которых можно отметить недоступные рёбра графа и таким образом получить кратчайший путь без перестройки всего графа и матриц, правда, время отклика в этом случае будет значительно больше, нежели для алгоритма Флойда.

Рассмотрим третью часть задачи. Классические алгоритмы поиска путей на взвешенном графе дают решение только для узлов, то есть путь от узла к узлу. Однако определённые точечные объекты расположены произвольным образом относительно графа, что значительно усложняет задачу поиска путей, так как необходимо найти именно те узлы графа, путь до которых плюс путь между этими узлами является кратчайшим.

Эта задача легко поддаётся принципиальному решению, если расширить граф, соединив точечные объекты кратчайшими по длине отрезками со всеми непосредственно видимыми из этих точек полилиниями, создав на этих полилиниях новые узлы (перекрёстки) и перестроить весь граф. В этом случае все пункты – отправки, промежуточные, назначения явно включаются в граф и алгоритм поиска путей найдёт минимальный по времени движения путь из одного пункта в другой. Однако практического значения такое точное решение не имеет, так как требует полной перестройки графа, полного пересоздания необходимых матриц и применения весьма расточительного алгоритма сшивки пунктов отправки, промежуточных и назначения к графу.

Для каждого точечного пункта необходимо:

а) обнаружить все рёбра, до которых можно дотянуться не пересекая другие рёбра, в том числе и те, которые частично закрываются другими рёбрами, то есть все непосредственно, частично или полностью достижимые рёбра;

б) построить кратчайшие отрезки к достижимым рёбрам, при этом учесть, что кратчайший путь, к сожалению, не определяется ни самой близкой вершиной полилинии, ни перпендикуляром к сегментам полилинии, ни отрезками, соединяющими пункт с серединами сегментов (рис. 2), а определяется минимальным значением расстояния до всех перечисленных элементов;

в) в найденных точках кратчайшего расстояния до достижимых рёбер создать новые узлы и от каждого нового узла дойти до двух смежных с ним (рис. 3), посчитав время движения от нового узла до двух смежных;

г) для пары точек (пункт отправки – пункт прибытия) мы получаем $N \times M$ возможных путей, где N и M – это количество достижимых узлов графа из первой и второй точки. Из них, приплюсовав веса вновь образованных рёбер, можно выбрать путь с минимальным весом, то есть наиболее быстрого достижения цели.

Громоздкость этой последовательности действий и объём вычислений заставляют отказаться от полностью автоматической привязки точечного объекта к графу до тех пор, пока не будет разработан эффективный алгоритм нахождения кратчайшего расстояния от точки до графа. Каким же образом найти компромисное решение? Как показал достаточно полный анализ задачи, компромис возможен только при внесении в решение эмпирических факторов нематематического характера, а именно – при участии человека, использующего механизм поиска минимального по времени пути, в задании оперативных входных данных, а именно – где бы не находились пункты отправки, посещения и назначения, необходимо поставить маркер (точку) вблизи желаемого места въезда на дорогу, тогда эта дорога (ребро) будет отмечена как единственная ближайшая и именно она будет использована в поиске пути. Затем находится ближайшая точка на выбранном ребре, но узел не создаётся, а просто находятся два узла этого ребра и вычисляется вес двух кусков от точки пересечения до этих

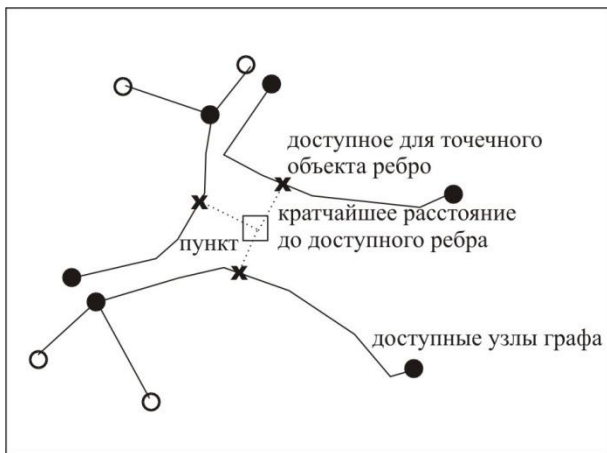


Рис.2 – Пункт, через который должен пройти кратчайший путь, доступные ему рёбра графа и достижимые узлы (в данном примере для пункта видно 6 доступных узлов)

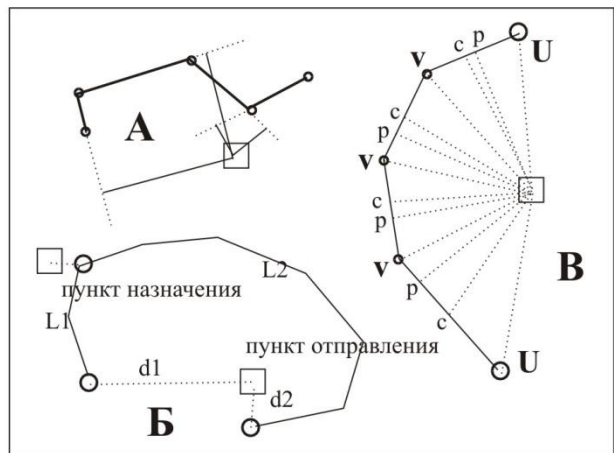


Рис.3 – *A* – пример отсутствия перпендикуляра из точки на сегменты полилинии; *B* – расстояние $d1 > d2$, но весь путь $L1+d1 < L2+D2$ (путь из более дальнего узла короче); *B* – все расстояния для проверки близости точки к полилинии (*U* – узел, *V* – вершина, *c* – середина сегмента, *P* – основание перпендикуляра)

узлов. Таким образом для каждого пункта посещения мы получаем два узла графа, при этом граф не изменяется и не перестраивается, из $2 \times 2 = 4$ путей выбирается минимальный с учётом весов кусков рёбер от точек пересечений до узлов графа, между которыми определяется минимальный путь.

Дальнейшее развитие задачи.

1. В данной работе не учитываются топографические особенности местности, препятствия, рельеф. Основное внимание уделено оптимизации алгоритмов маршрутизации на больших графах и созданию соответствующей картографической базы данных. В дальнейшем развитии разработанной системы оперативного реагирования на пожары будет учтён рельеф местности, который будет строиться по оцифрованным линиям уровня и даст возможность корректировать принятое решение о кратчайшем пути к месту лесного пожара путём наложения сети дорог на карту рельефа местности и визуального определения районов, трудно достижимых из-за различных препятствий (участков дорог с большим уклоном, оврагов и т.д.). Предусматривается трёхмерная визуализация рельефа местности, что повысит наглядность и эффективность принятия оперативных решений.

2. Предполагается расширить решение задачи и учитывать рёбра графа, нарушающие планарность (дороги, которые пересекаются, но не имеют перекрёстка). Этот случай в данной задаче не рассматривается, так как в лесном хозяйстве он маловероятен (нет многоярусных дорог), а алгоритм создания графа дорог строит только планарные графы. Разрабатываемые алгоритмы близости произвольных точек плоскости к сети дорог (графу, рёбрами которого являются дороги, а узлы – перекрёстками дорог) позволят построить наглядную визуальную картину доступности всех участков леса к пунктам средств пожарной безопасности, то есть выявить наиболее пожароопасные участки. В дальнейшем предполагается моделировать любое множество «возможных» (новых) дорог для улучшения доступности проблемных участков леса, что позволит давать эффективные рекомендации для прокладки дорог.

3. Будут учтены кратные рёбра графа (несколько дорог, соединяющих два перекрёстка), два и более ребра, опирающиеся на одни и те же узлы. При построении матрицы достижимости графа учитывается только одно из кратных рёбер, имеющее наименьший вес, а при нахождении ближайшего ребра к пункту отправки или назначения это ребро может оказаться недоступным. Эта проблема может быть разрешена при построении статического

графа путём нахождения всех кратных рёбер и искусственного разбиения их на два примыкающих друг к другу ребра (рис. 4). После такого разбиения в графе уже не будет кратных рёбер. Будут обработаны смежные рёбра имеющие общий узел, но не образующие перекрёстка (дорога одного типа имеет продолжение в виде дороги другого типа), непроходимые участки дорог (завалы, затопления, зоны пожаров и т.д.) будут маркироваться без исключения их из рассмотрения, при поиске оптимального пути следования транспортных средств будут включены в рассмотрение кольцевые дороги (рис. 5).

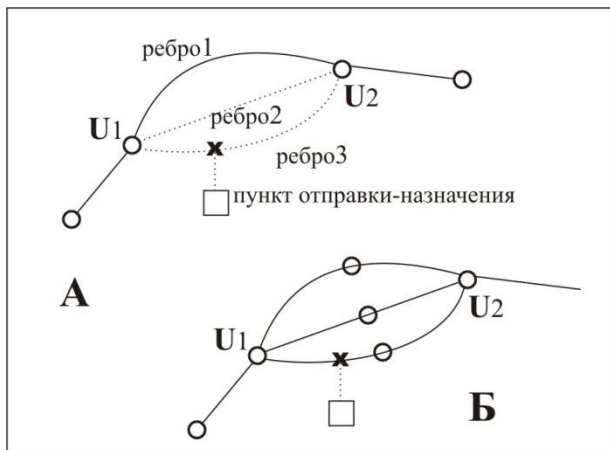


Рис.4 – А – три кратных ребра, соединяющие узлы $U1$ и $U2$, в матрицу попало первое ребро, а ближайшим к пункту оказалось третье; Б – разбиение кратных рёбер дополнительными узлами снимает проблему – кратных ребер больше нет

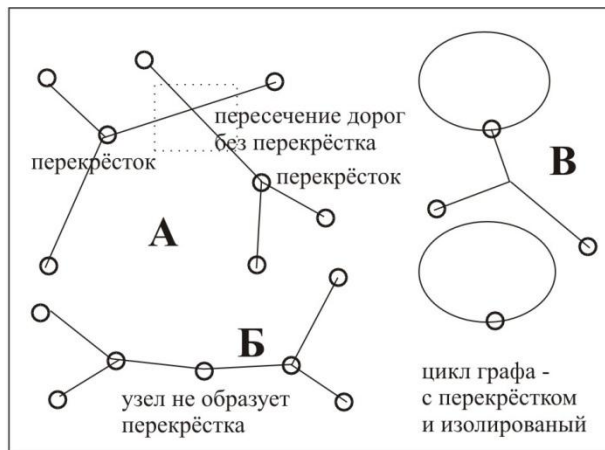


Рис.5 – Варианты дорог: А – дороги, нарушающие планарность графа; Б – смежные дороги; В – кольцевые дороги

4. Будет продолжена разработка структуры динамического графа на основе предопределённого, ранее созданного и выверенного статического графа дорог для учёта изменений в дорожной сети в данный момент (стихийные бедствия, техногенные проблемы). Оперативное изменение графа и топологических отношений между его элементами без полной перестройки графа, что позволит осуществлять оптимальную мобилизацию транспортных средств для тушения пожаров в реальном времени.

Выводы. В данной работе рассмотрена и решена задача создания компьютерной системы поддержки принятия решений при возникновении лесных пожаров, в которую входят средства картографирования, отображения сети дорог, отображение найденного пути, хранение базы данных с картографическими и топологическими данными, определение координат места возникновения пожара. Разработана технология построения ответа на запрос о минимальном по времени пути по сети дорог от пункта отправки до пункта назначения с посещением произвольного числа промежуточных пунктов.

Реализация построенной технологии включает в себя следующие элементы:

- подготовка в электронном виде карты дорог (множество полилиний) с исправлением геометрических ошибок оцифровки (слипание линий и т. д.) и редукцией входных данных (удалением избыточных точек полилиний) для оптимизации объёма вычислений;
- предварительное построение правильного планарного графа дорог со всеми топологическими отношениями между узлами (перекрёстками) и рёбрами (участками дорог между перекрёстками);
- вычисление минимального расстояния от всех точек заданного участка леса до сети дорог и визуальное отображение полученных результатов для выявления неблагоприятных с точки зрения доступности для транспортных средств мест, моделирование новых дорог для оптимизации сети лесных дорог;

– предварительное построение матриц достижимости и узлов минимальных путей с помощью алгоритма Флойда – Уоршелла;

– задание пунктов отправки, промежуточного посещения и назначения точечными маркерами вблизи выбранных дорог или места пожара и определение места возникновения лесного пожара по данным вышек наблюдения, интерактивная коррекция места расположения пунктов отправки и промежуточного посещения по результатам вычисления наиболее эффективного пути, проходящего через них;

– учёт недоступных в данный момент участков дорог, при недостатке времени на перестройку графа дорог использование алгоритмов Беллмана – Форда или Дейкстры нахождения кратчайшего пути, которые не требуют построения матриц достижимости и путей, что несколько увеличивает время отклика программы на запрос минимального пути, но позволяет сохранить оперативность реагирования на пожары в случае неожиданных изменений в сети дорог; в дальнейшем развитии задачи предусмотрено построение рельефа местности по оцифрованным линиям уровня и использование его визуального представления для эффективного решения задачи;

– программная реализация решения описаной в статье задачи в виде АРМ «Система принятия решений при тушении лесных пожаров»;

Разработанный АРМ внедрён в ГП «Свесское ЛХ» Сумской области и в ГП «Луганское ЛХ» Житомирской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритм Беллмана — Форда [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Беллмана_—_Форда
2. Алгоритм Дейкстры [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Дейкстры
3. Алгоритм Флойда — Уоршелла [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Флойда_—_Уоршелла
4. *Данилкин Ф. А.* Трассировка маршрута движения по цифровым картам местности / Ф. А. Данилкин, Д. С. Наумов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – Вып. 31, № 1. – С. 86–88.
5. *Дорогов А. Ю.* Алгоритмы оптимального движения мобильных объектов по пересеченной местности и транспортной сети / А. Ю. Дорогов, В. Ю. Лесных, И. В. Раков, Г. С. Титов // ААЭКС. – 2009. – № 1. – С. 138–146.
6. *Кочкарь Д. А.* Алгоритм формирования планарного графа при подготовке цифровых лесных карт / Д. А. Кочкарь, В. В. Богомолов, А. В. Остапчик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 6 (33). – с. 34–39.
7. *Кочкарь Д. А.* Формирование топологических отношений между геометрическими объектами цифровой лесной карты на основе анализа планарного графа / Д. А. Кочкарь, В. В. Богомолов, А. В. Остапчик, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 7 (41). – с. 95–99.
8. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристоферс. – М. : Мир, 1978. – 433 с.
9. *Препарата Ф.* Вычислительная геометрия. Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М. : Мир, 1989. – 487 с.
10. *Ушанов С. В.* Оптимальная маршрутизация при управлении борьбой с лесными пожарами / С. В. Ушанов, О. В. Фадеенков // Хвойные бореальной зоны. – 2007. – № 4–5. – с. 405–407.

Bogomolov V. V., Ostapchik A. V., Borisenko A. I., Kochneva T. A., Kutsenko O. A., Aleksyeyeva L. V.

GRAF THEORY APPLICATION FOR DEVELOPMENT OF VEHICLE OPTIMAL MOBILIZATION ALGORITHM IN CASE OF FOREST FIRES

Ukrainian Research Institute of Forestry & Forest Melioration named after G. M. Vysotsky

System of effective obtaining of just-in-time information about roads and optimum traffic on the road network to respond to forest fires in the shortest possible time was analyzed.

Algorithm and technology of reducing the task of finding the quickest way between starting and end points are represented. The path goes through an arbitrary number of intermediate points. All points are situated arbitrarily to graph.

Key words: forestry, forest fire, planar graph, road network, pathfinding algorithm, Floyd algorithm, Ford algorithm, shortest path, snapping object to graph.

Богомолів В. В., Остапчик О. В., Борисенко О. І., Кочнева Т. А., Куценко О. О., Алексеева Л. В.

**ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ГРАФІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОЇ МОБІЛІЗАЦІЇ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ**

Український науково-дослідний інститут лісового господарства і агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

Проаналізовано і побудовано систему ефективного отримання оперативної інформації про дороги і оптимальний рух мережею доріг з метою якнайшвидше реагувати на лісові пожежі. Наведено алгоритм і технологію зведення задачі знаходження мінімального за часом шляху між вихідним і кінцевим пунктами, який проходить через довільну кількість проміжних пунктів, причому всі пункти довільно розташовані відносно графа доріг.

Ключові слова: лісове господарство, лісові пожежі, планарний граф, мережа доріг, алгоритми пошуку шляхів, алгоритм Флойда, алгоритм Форда, найкоротший шлях, прив'язка об'єктів до графа.

E-mail: LabNit@rambler.ru

Одержано редколегією 23.11.2012