

Разработка программного комплекса для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения лесных пожаров в геоинформационной системе*

А. И. Фильков, Д. А. Гладкий

Томский государственный университет, Россия

e-mail: filkov@mail.tsu.ru, six9teen@sibmail.com

Численно реализована предложенная Э.В. Коневым модель расчета скорости распространения контура лесного пожара. Разработана пользовательская среда в ArcView GIS 3.x, позволяющая при помощи созданных инструментов обрабатывать результаты расчетных моделей и осуществлять визуализацию результатов прогноза возникновения и распространения лесного пожара.

Ключевые слова: математическое моделирование, контур пожара, визуализация, прогноз возникновения и распространения, геоинформационные системы.

Введение

В настоящее время актуальны задачи реализации моделей прогноза природных пожаров на ЭВМ. Особый интерес представляют программные комплексы, осуществляющие визуализацию численного моделирования в геоинформационных системах (ГИС). Подобные комплексы обеспечивают наглядность получаемых результатов и простоту обработки данных.

Создание программных вычислительных систем и комплексов, позволяющих прогнозировать поведение природных пожаров и оценивать уровень опасности в режиме реального времени, является основной целью физико-математического моделирования в данном направлении. Среди разработанных в последние годы и внедренных компьютерных систем прогноза пожарной опасности можно выделить системы, представленные в [1–3]. В качестве общего недостатка данных систем следует отметить их неуниверсальность, т. е. невозможность использования в любой точке мира без предварительной адаптации. В первую очередь это связано с тем, что в эти системы заложены эмпирические данные, полученные для определенных растительных горючих материалов (РГМ) и климатических условий, которые существенно различаются в разных частях света. Кроме того, большинству систем присущи неточности и ошибки, возникающие при реализации заложенных в них математических моделей, например, при вводе новых данных система может выдавать неадекватные результаты.

Возможность реализации той или иной модели с помощью ЭВМ гарантирует ее дальнейшее использование в практических целях. Поэтому, как правило, на практи-

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”, г/к № П 1109 от 26.08.2009 г. и Роснауки, г/к № 02.740.11.0674.

ке применяются упрощенные математические модели. Основным требованием к такого рода моделям является их простота и малое время счета. Не следует забывать, что в реальных условиях эти системы оперируют с огромным числом данных, в силу чего возможности даже современных компьютерных систем не способны реализовать весь объем вычислений, заложенный в теоретические модели лесных пожаров, в режиме, необходимом для оперативного использования полученных результатов. Иными словами, время работы системы прогноза пожара должно быть сопоставимо со временем, необходимым для принятия решений, направленных на предупреждение или тушение пожара, эвакуацию людей, или других принципиальных мер.

С развитием геоинформационных технологий появилась возможность реализовывать интегрированные системы прогноза природных пожаров, работающие при непосредственном использовании картографических материалов, представленных в электронном виде. В такие карты может быть заложена информация о топографических особенностях местности и распределении РГМ. Полученный при этом результат представляется возможным отобразить с помощью графических средств, что, безусловно, способствует более эффективной работе людей, управляющих поведением пожара.

1. Моделирование возникновения низового лесного пожара

Вероятность возникновения пожара в данной работе рассчитывается на основе предложенной ранее детерминированно-вероятностной математической модели прогноза лесной пожарной опасности [4], в которой наряду с элементами теории вероятностей используются детерминированные уравнения для описания сушки растительных горючих материалов, а также радиационно-конвективного теплообмена слоя РГМ с окружающей средой:

$$P_j = \sum_{i=1}^N [P_{ij}(A)P_{ij}(\text{ЛП}/A) + P_{ij}(M)P_{ij}(\text{ЛП}/M)] P_{ij}(C), \quad (1)$$

$$P_{ij}(C) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{ij} > W_{i*} \text{ или при } m_i = 0, \\ \frac{F_i}{F} \left(1 - \frac{W_{ij}}{W_{i*}}\right)^k & \text{при } 0 < W_{ij} \leq W_{i*}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь P_j — вероятность возникновения лесного пожара на контролируемой лесной территории; j — момент времени; i — выдел¹ леса; $P_{ij}(A)$ — вероятность антропогенной нагрузки, достаточной для зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ); $P_{ij}(\text{ЛП}/A)$ — вероятность возникновения лесного пожара вследствие антропогенной нагрузки; $P_{ij}(M)$ — вероятность возникновения сухих гроз; $P_{ij}(\text{ЛП}/M)$ — вероятность возникновения лесного пожара от молнии при условии, что сухие грозы могут иметь место; $P_{ij}(C)$ — вероятность возникновения лесного пожара по условиям погоды; W_{ij} — влагосодержание максимального по массовой концентрации ЛГМ; W_{i*} — критическое влагосодержание максимального по массовой концентрации ЛГМ; m_i — масса ЛГМ; значение $P_{ij}(C) = 0$ соответствует случаю, когда на лесной территории нет ЛГМ (поверхность дорог, рек, озер и водонасыщенных болот), т. е. $m_i = 0$, или на слой ЛГМ выпало более 3 мм осадков, в результате чего $W_{ij} > W_{i*}$; k — эмпирический показатель степени,

¹Выдел — достаточно однотипный лесной участок, являющийся частью квартала. Квартал — часть леса, ограниченная на местности просеками или другими натурными границами.

характеризующий количественное изменение пожарной опасности; $F = \sum_{i=1}^N F_i$ — общая площадь территории, для которой определяется лесная пожарная опасность (лесничество, лесхоз, район, область или государство); F_i — площадь выдела; N — общее число выделов на прогнозируемой территории. Значения W_{ij} определяются с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих сушку ЛГМ [4].

Данная модель проверена на основе анализа случаев возникновения лесных пожаров в Тимирязевском лесхозе Томской области с 2000 по 2004 г. [4].

2. Моделирование распространения низового лесного пожара

Математическая модель расчета скорости распространения контура пожара Конева. В качестве расчетной модели были использованы упрощенная полуэмпирическая математическая модель и методика расчета выбросов от низовых лесных пожаров, предложенная Э.В. Коневым [5]. Использование данной модели обусловлено ее простотой и точностью прогноза [6]. Метод Э.В. Конева позволяет рассчитать скорость распространения каждой точки фронта пожара по ряду входных параметров. При этом вводятся следующие допущения:

- 1) считается [5], что очаг лесного пожара представляет собой плоский источник поллютантов, увеличивающийся с течением времени;
- 2) при превышении влагосодержания ЛГМ некоторого критического значения процесс горения прекращается;
- 3) запас ЛГМ не меняется по периметру контура лесного пожара, и скорость распространения не зависит от времени;
- 4) контур лесного пожара в любой момент времени в неподвижной системе координат описывается эллипсом

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad a = \frac{(\omega_A + \omega_B)t}{2}, \quad b = \omega_C t, \quad x_0 = \frac{(\omega_A - \omega_B)t}{2}. \quad (3)$$

Здесь a, b — полуоси эллипса; x, y — координаты контура эллипса; x_0, y_0 — координаты центра эллипса; t — время; $\omega_A, \omega_B, \omega_C$ — скорости распространения фронта пожара по направлению ветра, против скорости ветра и перпендикулярно скорости ветра соответственно.

Для определения скорости распространения низового лесного пожара ω_n в различных точках контура используем формулу, которая с учетом описанных выше обозначений имеет вид [5]

$$\omega_n = \omega_{n0} \frac{f_1(V_e, \alpha)(m_3/m_0)^n [1 - C_1(W - W_0) + C_2(W - W_0)^2 + D(T - T_0)]}{f_2(\beta)[1 + D(\rho - \rho_0)/\rho_0]},$$

$$f_1(V_e, \alpha) = 1 + B_1 V_e \cos \alpha, \quad 0 \leq V_e \leq V_1, \quad B_1(\alpha \leq 90^\circ) = B_1(0), \quad B_1(\alpha > 90^\circ) = B_1(\pi),$$

$$f_2(\beta) = \begin{cases} 0.86 [1 - \sin 2(\beta - 8^\circ)], & 8^\circ < \beta \leq 40^\circ, \\ 1 - \sin \beta, & -18^\circ < \beta \leq 8^\circ, \\ \approx 1.4, & \beta \leq -18^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где ω_{n0} — скорость распространения низового пожара на горизонтальной подстилающей поверхности; V_e — скорость ветра; α — угол между направлением распространения

фронта пожара и направлением ветра; β — угол наклона рельефа местности к горизонту; m_0 — запас ЛГМ в абсолютно сухом состоянии; $n = (0.2 - 0.35)$ — эмпирический коэффициент; C_1, C_2, D, B_1, V_1 — эмпирические постоянные; W — влагосодержание ЛГМ; T_0, W_0 — начальная температура слоя ЛГМ и его влагосодержание соответственно; T — температура воздуха; ρ_0 — плотность слоя ЛГМ на горизонтальной подстилающей поверхности, при которой скорость распространения лесного пожара равна ω_{n0} ; ρ — плотность слоя ЛГМ.

Численные тесты. Текущие значения скорости ветра V_e на высоте 10 м, влагосодержания W и запаса ЛГМ m_0 , температуры воздуха T , плотности слоя ЛГМ ρ , угла наклона рельефа к горизонту β , высоты слоя ЛГМ h_1 и верхней границы полога леса задавались пользователем. Данные параметры варьировались в следующих пределах: $V_e = 0 \dots 10$ м/с, $W = 5 \dots 100$ %, $m_0 = 0.01 \dots 4.5$ кг/м², $T = 10 \dots 50$ °С, $\rho = 1 \dots 30$ кг/м³, $\beta = 0 \dots 40^\circ$, $h_1 = 0.01 \dots 0.15$ м.

Полученные в результате численного моделирования соотношения между скоростями фронта и фланга, а также фронта и тыла контура пожара сравнивались с соответствующими величинами, найденными в результате экспериментов для различных значений скорости ветра (рис. 1). Численные расчеты получены при следующих входных данных: $W = 40$ %, $T = 27$ °С, $\rho = 30$ кг/м³, $\beta = 1^\circ$, $h_1 = 0.02$ м.

Из анализа кривых на рис. 1 видно, что с ростом скорости ветра экспериментальные и численные данные начинают различаться. При этом скорость фронта пожара, рассчитанная по модели (4), имеет завышенные значения по сравнению с экспериментом. Это можно объяснить следующим образом. В рассматриваемой модели (4) при расчете скорости фронта пожара на заданный промежуток времени скорость ветра считается постоянной величиной, в то время как в приводимых для сравнения экспериментах [7] данный параметр неустойчив как по величине, так и по направлению. Известно [8], что скорость ветра, как правило, непрерывно меняет свои направления и величину, причем даже в очень короткие временные периоды. Данные изменения могут быть весьма

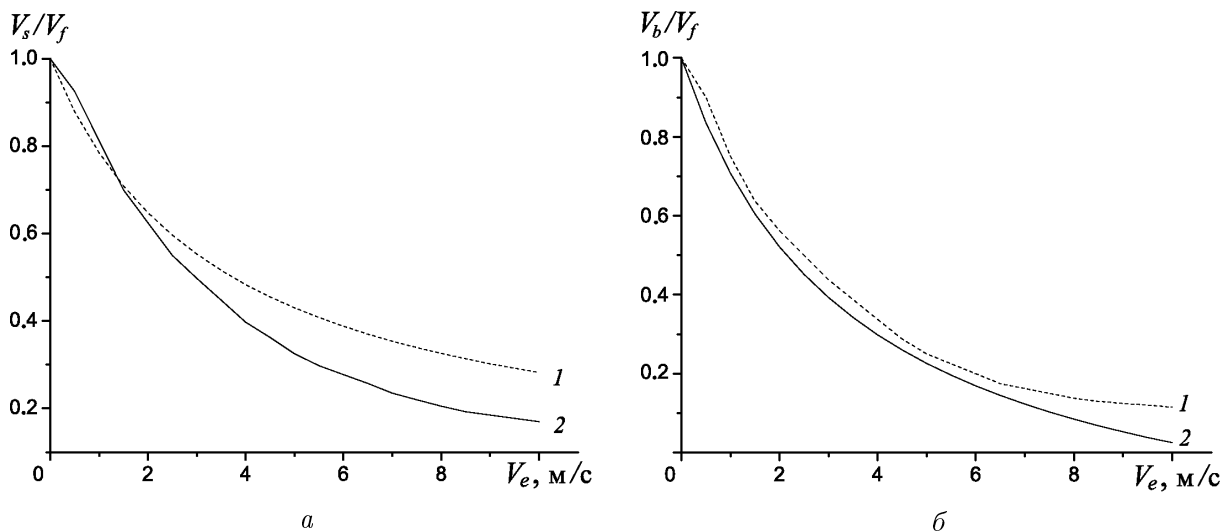


Рис. 1. Отношения скорости фланга V_s к скорости фронта контура V_f (а) и скорости тыла V_b к скорости фронта контура V_f (б), полученные в результате численного моделирования (кривые 2) и эксперимента (кривые 1) [7] при различных значениях скорости неустойчивого по направлению ветра

значительными, что в свою очередь приводит к изменению режима распространения фронта пожара [8]. При этом необходимо также учитывать неоднородность напочвенного и растительного покрова. Если скорость ветра внезапно меняется, то течение пожара будет иметь некоторое время для адаптации к новой ситуации, которое с ростом первоначальной скорости ветра также возрастает. В связи с этим в численных расчетах скорость фронта пожара с повышением скорости ветра увеличивается и имеет значения выше экспериментальных. Максимальное расхождение результатов численного моделирования и экспериментальных данных относительно диапазона изменений последних для скорости 10 м/с составляет 11 % для отношения V_s/V_f и 9 % для отношения V_b/V_f .

Было проведено также сравнение расчетных скоростей распространения пожара с экспериментальными данными [9, 10], полученными при различных метеорологических условиях и разных значениях эмпирических параметров (см. таблицу; здесь h_1 — высота слоя ЛГМ, нижний индекс *exp* — экспериментальные данные, *c* — расчетные данные по формуле (4), δ — относительная погрешность измерений). Анализ данных таблицы показывает хорошее совпадение значений скорости фронта и тыла пожара — максимальная относительная погрешность не превышает 13 %.

Таким образом, полученные результаты расчетов являются достаточными для построения комплекса прогноза распространения низовых лесных пожаров для скоростей ветра до 10 м/с на основе предложенной численной модели.

Алгоритм расчета контура пожара. Приняв за единичный шаг по времени 1 с, можно определить расстояние, на которое переместится каждая точка рассматриваемого контура, а следовательно, и координаты его точек на следующем шаге.

На начальном этапе работы программы, используя метод Конева, рассчитываются координаты контура пожара на небольшом временном интервале. Далее для расчета нового контура применяется формула (4). Зная текущие координаты точек контура, определим направление движения каждой точки как продолжение отрезка, соединяющего центр рассматриваемой фигуры с этими точками. Используя формулу (4), вычислим расстояние, на которое переместится каждая точка за временной шаг. Таким образом, определим координаты точек контура на следующем временном шаге (рис. 2).

Сравнение результатов расчета скоростей фронта и тыла контура пожара с экспериментальными данными [9, 10]

Параметр	[9]	[10]	[10]	[10]
V_e , м/с	1.5	0.3	0.4	0.8
T , °C	29	14.1	14.1	14.1
W , %	15	14	14	14
h_1 , м	0.1	0.1	0.1	0.1
ρ , кг/м ³	—	6.3	6.3	6.3
β , град	5	—	—	—
$V_{f_{exp}}$, м/с	0.0213	0.01	0.0117	0.0154
$V_{b_{exp}}$, м/с	0.0046	0.0023	0.0023	0.0022
V_{f_c} , м/с	0.0225	0.0088	0.0102	0.0167
V_{b_c} , м/с	0.005	0.002	0.0021	0.002
δV_{f_c} , %	5.6	12	12.8	8.4
δV_{b_c} , %	8,7	13	8.6	9

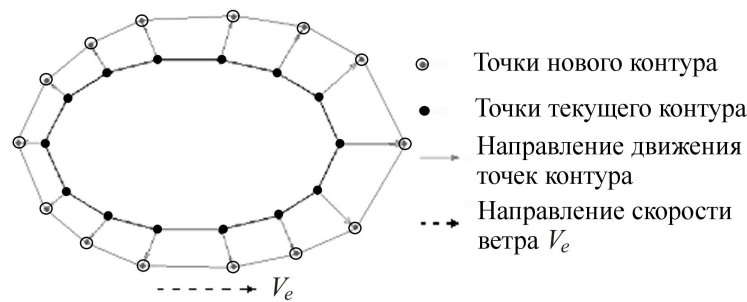


Рис. 2. Схема расчета контура пожара

Для длительных расчетов расстояние между соседними точками контура увеличивается, так как согласно алгоритму расчет контур имеет постоянное количество точек. Поэтому при достижении некоторого критического значения (в данном случае 50 м) в середину отрезка между двумя точками контура добавляется новая точка. Чтобы (1) расстояние между точками было меньше характерного размера выдела и (2) не загружать численные расчеты большим количеством точек, критическое значение определялось экспериментально.

3. Описание работы программного комплекса

Одним из самых популярных и распространенных ГИС-продуктов является ArcView GIS компании ESRI. Он легок в освоении и может использоваться в различных сферах деятельности для визуализации, запроса и анализа любой пространственной информации. ArcView 3.x относительно недорог (около тысячи долларов за одну коммерческую лицензию) и в то же время является весьма эффективным программным продуктом, относящимся к классу настольных (персональных) ГИС, позволяющих настраивать функциональность системы под решение конкретных задач с помощью встроенного языка программирования Avenue. Эти характеристики стали причиной выбора ArcView 3.x. для разработки программного комплекса с целью визуализации результатов прогноза возникновения и распространения лесных пожаров.

В качестве топографической основы использовалась карта Томской области, имеющая следующие базовые покрытия: реки, озера, дороги, населенные пункты. Для представления результатов численного моделирования применялась электронная карта Жуковского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области, позволяющая получать детальную информацию о лесорастительных условиях рассматриваемой территории [11]. В составе созданной цифровой карты имеются тематические слои: квартальная сеть², кварталы лесничества и выделы. В качестве атрибутивной информации используется стандартное лесотаксационное описание³ выделов.

С помощью Avenue были написаны модули, связывающие результаты прогноза возникновения и расчета контура низового лесного пожара с цифровой картой Жуковского лесничества. Комплекс предусматривает визуализацию прогноза возникновения пожара и двух вариантов его распространения. Для каждого варианта в графическом

²Квартальная сеть — схема деления лесного массива на части, примерно сходные по размеру.

³Лесотаксационное описание — паспорт лесного участка, по которому можно судить о его ценности и состоянии и намечать лесохозяйственные мероприятия.

интерфейсе пользователя ArcView создан инструмент (рис. 3), при нажатии на который производится выполнение определенных действий.

Прогноз возникновения низового лесного пожара. На первом шаге оператор включает соответствующий инструмент и в открывшееся диалоговое окно вводит метеоданные: текущую температуру воздуха и почвы в °С, относительную влажность воздуха в %, скорость ветра в м/с, количество выпавших осадков в мм и суммарную солнечную радиацию в Вт/м² (рис. 4, а). При нажатии кнопки “Далее” ArcView обращается к внешней программе для расчета вероятности возникновения пожара по методике [4]. Результаты работы программы записываются в текстовый файл в виде таблицы значений вероятности возникновения пожара для каждого выдела леса. Затем осуществляется автоматическое связывание данной таблицы с атрибутивной таблицей лесотаксационного описания и представление результата прогноза в виде цветовой шкалы в теме “Probability” (рис. 4, б).

Каждый выдел имеет свою цветовую заливку, соответствующую значению вероятности возникновения пожара. Цвет заливки меняется от зеленого к красному, указывающему на максимальную вероятность возникновения пожара. Это позволяет наглядно представить результаты прогноза и оперативно оценить пожарную ситуацию. Возможен также вариант представления результатов по классам пожарной опасности и влагосохранению напочвенного покрова.

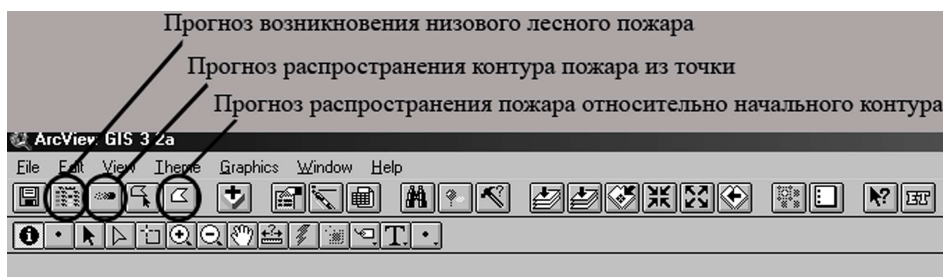


Рис. 3. Инструменты в графическом интерфейсе пользователя

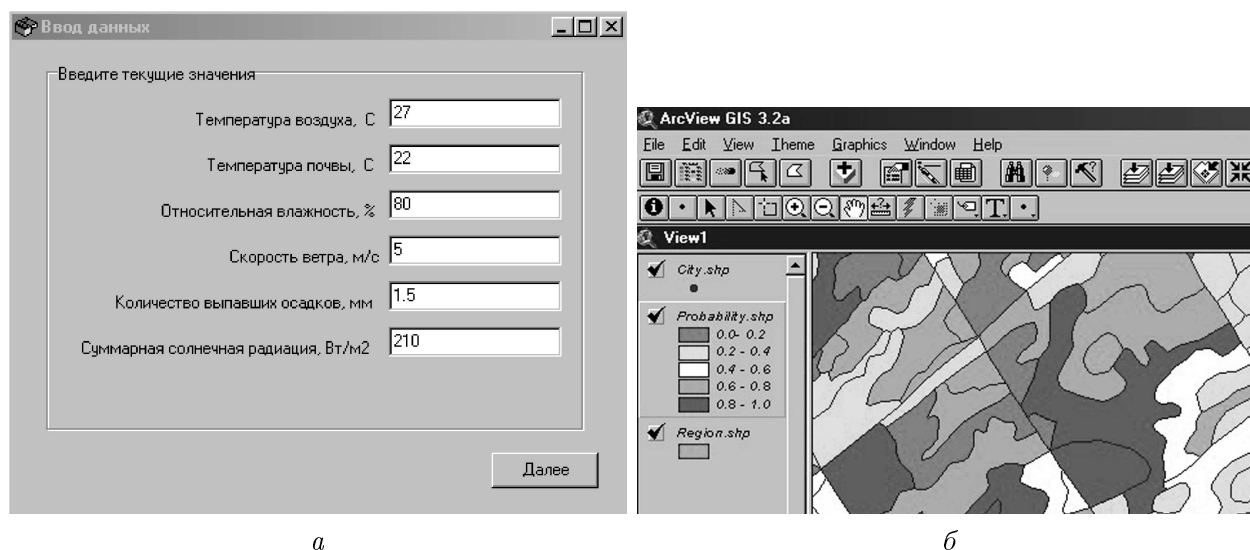
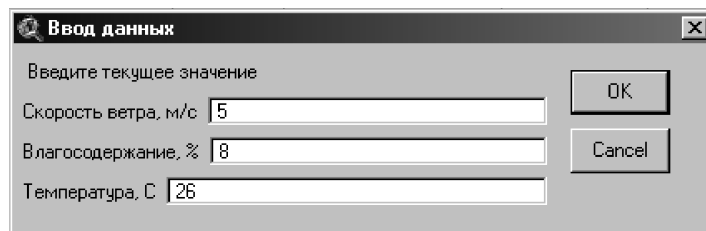


Рис. 4. Панель ввода метеоданных (а) и результат прогноза пожарной опасности (б)

Прогноз распространения контура пожара из конкретной точки. При включении данного инструмента оператором необходимо выбрать центр контура пожара на карте с помощью левой кнопки компьютерной мыши. При этом происходит автоматический процесс захвата координат текущего положения курсора и записи их в файл вместе с лесотаксационными характеристиками выдела. После получения координат центра открывается диалоговое окно, и оператор осуществляет ввод начальных метеорологических параметров (скорость ветра в м/с, температуру воздуха в °С, влажосодержание напочвенного покрова в %) и времени счета при помощи реализованных панелей ввода (рис. 5). Затем модуль осуществляет обращение к внешней программе, которая рассчитывает координаты точек контура пожара на заданный временной интервал, учитывая особенности каждого выдела. После формирования программой таблицы координат встроенный модуль подгружает их в приложение ArcView GIS и осуществляет прорисовку контура (рис. 6).



Ввод данных

Введите текущее значение

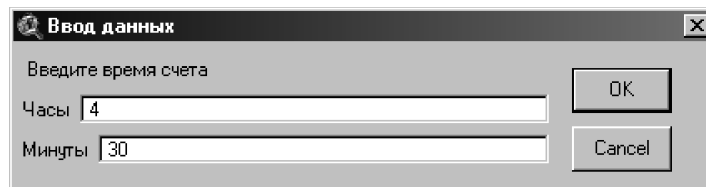
Скорость ветра, м/с

Влажосодержание, %

Температура, С

OK Cancel

а



Ввод данных

Введите время счета

Часы

Минуты

OK Cancel

б

Рис. 5. Панель ввода начальных данных (а) и времени счета (б)

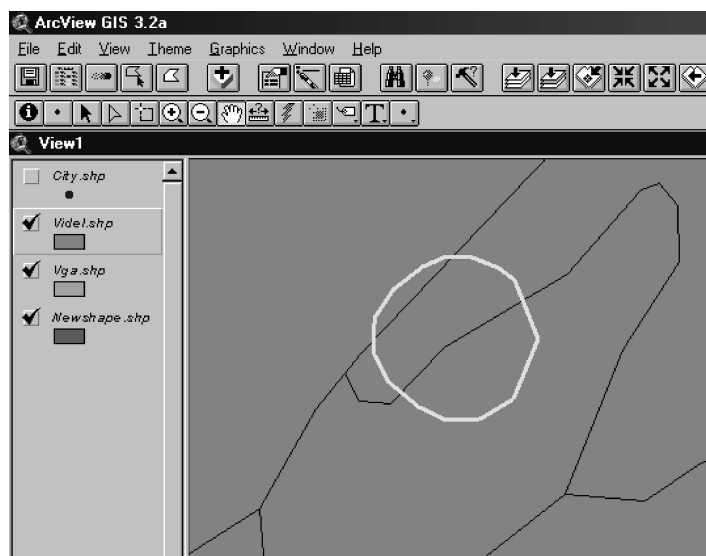
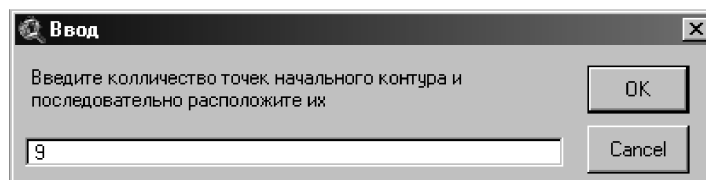
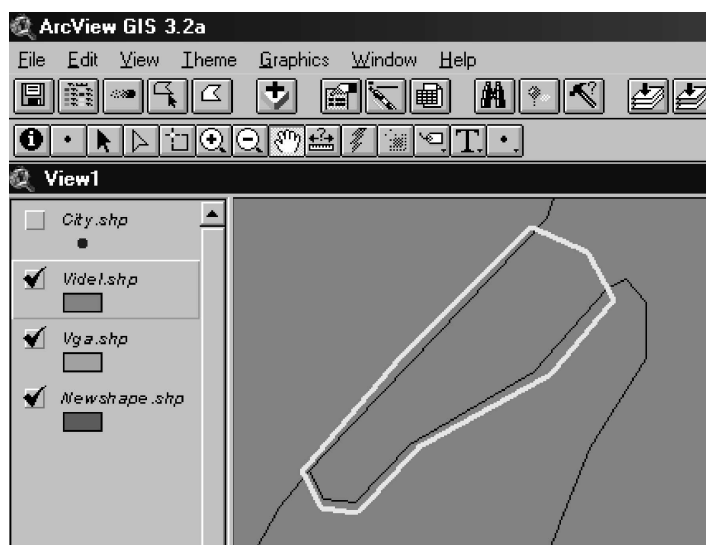


Рис. 6. Прорисовка результатов расчета контура

Прогноз распространения пожара относительно начального контура. Захват точек и соединение их в контур производится пользователем при помощи третьего инструмента. На первом этапе оператор определяет необходимое количество точек контура и формирует контур (рис. 7). Формирование контура осуществляется путем последова-



а



б

Рис. 7. Панель ввода точек начального контура (а) и его прорисовка (б)

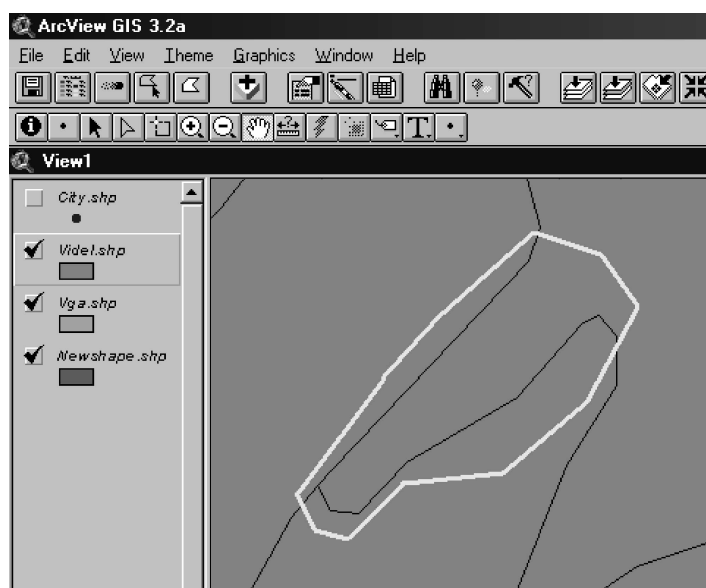


Рис. 8. Прорисовка результатов расчета

тельного выбора точек с использованием левой кнопки мыши. Прорисовка контура по выбранным точкам и передача координат контура в файл автоматизированы.

После формирования контура вводятся начальные данные аналогично модулю прогноза распространения контура пожара из конкретной точки и проводится автоматическая прорисовка результатов расчета (рис. 8).

На основании результатов расчетов оператор при возникновении чрезвычайной ситуации может принять необходимые решения.

Итак, разработанный программный комплекс позволяет:

- 1) определять вероятность возникновения лесных пожаров на охраняемой территории в прогнозируемый период с учетом состояния напочвенного покрова, природной и антропогенной нагрузки;
- 2) осуществлять прогноз распространения контура пожара с учетом текущих метеорологических данных и особенностей каждого выдела;
- 3) представлять результаты прогноза возникновения и распространения пожаров на электронной карте, что дает наглядное представление о пожароопасной ситуации на данной территории;
- 4) оценить уровень объема работ по ликвидации пожара и заранее подготовить силы и средства для его тушения на всей подверженной прогнозу территории.

Список литературы

- [1] YASSEMI S., DRAGICEVIC S., SCHMIDT M.G. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour // *Ecological Modelling*. 2008. No. 210. P. 71–84.
- [2] GUARNIERI F., ANDERSEN C.K., OLAMPI S., CHAMBINAUD N. FIRELAB: Towards a problem solving environment to support forest fire behaviour modelling // *Proc. III Intern. Conf. on Forest Fire Res. / 14th Conf. on Fire and Forest Meteorology*. Luso, 1998. Vol. I. P. 483–496.
- [3] CRUZ M.G., GOULD J. National fire behaviour prediction system // *Proc. of the Biennial Conf. of the Institute of Foresters of Australia*. Caloundra, 2009.
- [4] Гришин А.М., Фильков А.И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово: Практика, 2005. 197 с.
- [5] КОНЕВ Э.В. Физические основы горения растительных материалов при лесных пожарах и палах: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. М., 1992. 32 с.
- [6] Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. Издание официальное. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. 24 с.
- [7] ШЕШУКОВ М.А. Исследование природы лесных пожаров в основных лесных формациях Нижнего Приамурья. Красноярск: Институт леса и древесины, 1970. 204 с.
- [8] VIEGAS X.D. Wind and topography effects on fire behavior // *Wildfire Management. Proc. of the Advanced Study Course Held in Marathon. Greece (6–14 October 1997) / Eds. G. Eftichidis, P. Balabanis, A. Ghazi. Algosystems SA & European Commission DGXII, Athens, 1998. P. 125–141.*

- [9] КОРОЛЕВ Г.М., ОХРАМЕЦ Т.И. К вопросу о скорости распространения лесных пожаров // Природные пожары: Возникновение, распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 5-й Междунар. конф. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2003. С. 127.
- [10] ВАЛЕНДИК Э.Н., ВОРОБЬЕВ О.Ю., МАТВЕЕВ А.М. Прогнозирование контуров лесных пожаров на ЭВМ // Характеристика процессов горения в лесу. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 52–56.
- [11] ФИЛЬКОВ А.И. Создание крупномасштабных векторных карт для прогноза пожарной опасности // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 156–159.

*Поступила в редакцию 27 сентября 2010 г.,
с доработки — 16 апреля 2011 г.*