

К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Гладской И. Б., Павлова А. В., Рубцов С. Е.

TO MODELING THE SPREAD OF FOREST FIRES USING GIS TECHNOLOGIES

I. B. Gladskoy, A. V. Pavlova, S. E. Rubtsov

Kuban State University, Krasnodar, Russia
e-mail: kmm@fpm.kubsu.ru

Abstract. When modeling fire situations, discrete cellular-automaton approaches, as well as geographic information systems (GIS) with the ability to store and visualize spatial information, are very effective tools. In the paper we describe the methods of cellular automaton modeling, which allows to expand the possibilities of studying the processes associated with the spread of the fire front. In order to use GIS as a means of cartographic visualization for the simulation results, a digital elevation model (DEM) of the terrain for the mountainous and coastal regions of the Krasnodar region was constructed and a technology for creating a 3D terrain model of these territories was developed. For a model description of real computational areas, in this paper, we have constructed a digital terrain model of the territory of the Krasnodar region. We also edited the topographic foundation covering the territory of the Krasnodar region and consisting of 29 sheets of undesignated (in geographical coordinates) digital data in the ArcInfo coating format of a scale of 1 : 200,000. The cartographic representation of the territory of the Krasnodar region in the ArcView, constructed according to that data in the Gauss – Kruger projection, was divided into sections 10×10 km in size. We used ArcView tools to obtain the TIN and GRID representations of the terrain.

The combination of functions implemented in the author's algorithms with GIS functions for processing attributive and graphic spatial data will provide effective solutions for modeling a spatially distributed process.

Keywords: triangulation, composite cellular automata, fire front propagation, GIS, digital elevation model.

Введение

Динамика природных пожаров в России и за рубежом подтверждает насущную необходимость разработки продуманных стратегий борьбы со стихией огня, основанных на анализе механизмов распространения пожара, возможных сценариев его развития и прогнозирования последствий.

На сегодняшний день при изучении процессов распространения природных пожаров применяются различные модели, существенно различающиеся набором входных данных, подходами и алгоритмами [1–6]. Разработаны модели для различных типов лесных пожаров (верховых, низовых, подземных), степных по-

жаров. Проблема описания распространения огня чрезвычайно сложна и представляется исследователями как совокупность разнообразных физико-химических процессов. Применение простых методик, использующих эмпирические зависимости, требует знания характеристик подстилающей поверхности и метеорологических данных. Более сложные модели позволяют учесть рельеф местности, наличие искусственных и естественных преград, состав и свойства растительного покрова, такие модели часто используют многомерные уравнения газовой динамики.

Для эффективного планирования противопожарных мероприятий и успешных дей-

Гладской Игорь Борисович, канд. физ.-мат. наук, директор Центра информационной безопасности (ЦИБ) Кубанского государственного университета; e-mail: i.glad@list.ru.

Павлова Алла Владимировна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: pavlova@math.kubsu.ru.

Рубцов Сергей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: rub_serg@mail.ru.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и администрации Краснодарского края (19-41-230005).

ствий по предупреждению и ликвидации таких стихийных бедствий и их последствий необходимы не только разработка прогностических моделей разного уровня, но также привлечение наземной и спутниковой информации о моделируемых процессах. Задачи создания такого рода системы, над которой работают ученые Кубанского университета, включают: разработку и реализацию алгоритмов динамики распространения пожара с учетом рельефа и наличия препятствий; моделирование воздействий на пожар с целью его локализации; адаптацию разработанных алгоритмов для топографических данных из ГИС, включая триангуляцию расчетных областей; создание моделей рассеяния газообразных и аэрозольных продуктов горения, использующих конечно-разностные, факторизационные и клеточно-автоматные (КА) подходы; разработку программных средств и проведение вычислительных экспериментов по расчету прогнозных положений фронта пожара, пространственно-временного распределения загрязнений с их графической визуализацией и экспортом в ГИС.

Авторами реализованы пространственные КА-модели ряда сценариев рассеяния и трансформации примесей [7, 8], создана клеточно-автоматная модель, имитирующая динамику очага возгорания на триангуляционной сетке [9], которые могут быть использованы в составе комплекса моделей процессов распространения пожара и миграции загрязняющих аэрозольных и газообразных продуктов горения в атмосфере, применимых для прогнозирования возможности возникновения, интенсивности, сценария развития пожара и оценки его воздействия на окружающую среду. Для описания реальных расчетных областей в настоящей работе построена цифровая модель местности территории Краснодарского края с использованием геоинформационных систем.

1. Моделирование рельефа местности Краснодарского края

Отсутствие информационного обеспечения разработанных математических моделей зачастую не позволяет в полной мере реализовать их потенциал. Но на сегодняшний день привлечение технологий использования наземной и спутниковой информации позволяет повысить эффективность моделей.

При моделировании пожарных ситуаций весьма эффективным инструментом являются геоинформационные системы (ГИС), обладающие возможностями хранения и визуализации пространственной информации. Существующие пакеты ГИС не имеют специализированных средств моделирования, поэтому представляет интерес создание расширений, обеспечивающих возможности реализации имитационной модели. На сегодняшний день имеются отечественные и зарубежные разработки, использующие ГИС для проведения мониторинга и получения прогноза пирологической обстановки, например, разработанная «ИНТРО-ГИС» специализированная подсистема ArcGIS «Лесной пожар» в виде расширения для ArcGIS Desktop и инструмента геообработки для публикации на ArcGIS Server [10]. В основу ее положена модель симуляции распространения пожара, разработанная Mark A. Finney [11].

С целью использования ГИС в качестве средства картографической визуализации результатов моделирования выполнено построение цифровой модели рельефа (ЦМР) местности для горных и прибрежных районов территории Краснодарского края и разработана технология создания 3D модели рельефа этих территорий. На рис. 1 представлены используемые при моделировании листы топоосновы.

Была проведена верификация и выполнено редактирование топоосновы, охватывающей территорию Краснодарского края и состоящей из 29 листов неспроектированных (в географических координатах) цифровых данных в формате покрытий ArcInfo масштаба 1 : 200 000 (рис. 1). Картографическое представление в ArcView территории Краснодарского края, построенное по этим данным в проекции Гаусса – Крюгера, было разбито на участки размером 10×10 км. Для удобства описания и последующего анализа были введены декартовы координаты с началом, совпадающим с левым нижним углом листа карты K37-I (рис. 1), со стандартным направлением координатных осей и единицей масштаба 10 м.

В ArcView GIS имеются стандартные средства (расширения Spatial Analyst и 3D Analyst) для анализа поверхностей и их визуализации в среде ArcView. Эти средства были использованы для получения TIN (Triangulated Irregular Network — нерегулярная триангуляционная сетка) и GRID (Grid —

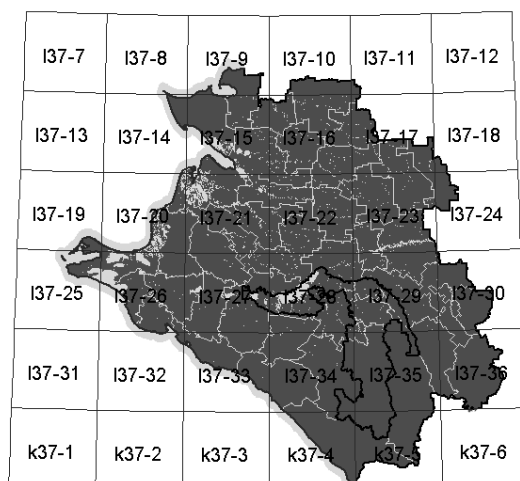


Рис. 1. Листы топоосновы, используемые при моделировании

регулярная матрица значений высот, полученная при интерполяции исходных данных) представлений рельефа местности для описанных выше участков размера 10×10 км. Основными исходными данными для построения рельефа были линейные слои уровней и точечные слои отметок высот. На рис. 2 представлены результаты предварительного моделирования рельефа внутри 10-километровой зоны посредством 3D Analyst.

В результате была получена предварительная цифровая модель рельефа горных массивов и прибрежных районов территории Краснодарского края (рис. 3).

Поскольку формат TIN ориентирован на использование в самой ГИС ArcView и не очень удобен для внешнего использования в других приложениях, то средствами макроязыка из этих представлений рельефа были извлечены соответствующие данные и сохранены в файлах в подходящем формате в виде матриц высот (в узлах сетки с шагом 40 м). Так каждый исследуемый участок рельефа размером 10×10 км был представлен регулярной матрицей высот, сформированной из 62 500 значений (иначе говоря, каждому такому участку был поставлен в соответствие набор из 62 500 троек координат точек равномерно распределенных по его поверхности, на основе которого в дальнейшем строилась некоторая «усредненная» модель поверхности).

Получаемые таким образом данные преобразуются в удобный для дальнейшей обработки формат и накапливаются в базе данных.

2. Модель распространения фронта пожара

В настоящее время развитием клеточно-автоматных моделей (КА-моделей) в плане возможности имитации различных физико-химических процессов на основе применения КА занимаются многие исследователи. Среди таких моделей можно выделить так называемые диффузионные, агрегационные и реакционные [12–14 и др.]. Область применения таких моделей постоянно расширяется. В частности, клеточные автоматы используются при создании моделей распространения фронта пожара (поверхности, до которой дошел процесс распространения горящих частиц) и распределения концентрации продуктов горения с течением времени. Среди всего многообразия антропогенных и природных факторов, негативно воздействующих на состояние экосистемы, пожары можно выделить как один из самых разрушительных, наносящих огромный экологический и материальный ущерб. И использование КА-моделей служит расширению и развитию подходов к моделированию этого чрезвычайно сложного процесса, разработке эффективных в эксплуатации моделей.

При создании клеточно-автоматных моделей прямоугольные сетки получили наибольшее распространение. Но зачастую при моделировании того или иного процесса требуется учет формы поверхности, например, рельефа местности. В таких случаях применение триангуляционных сеток, позволяющих строить системы непересекающихся треугольников с

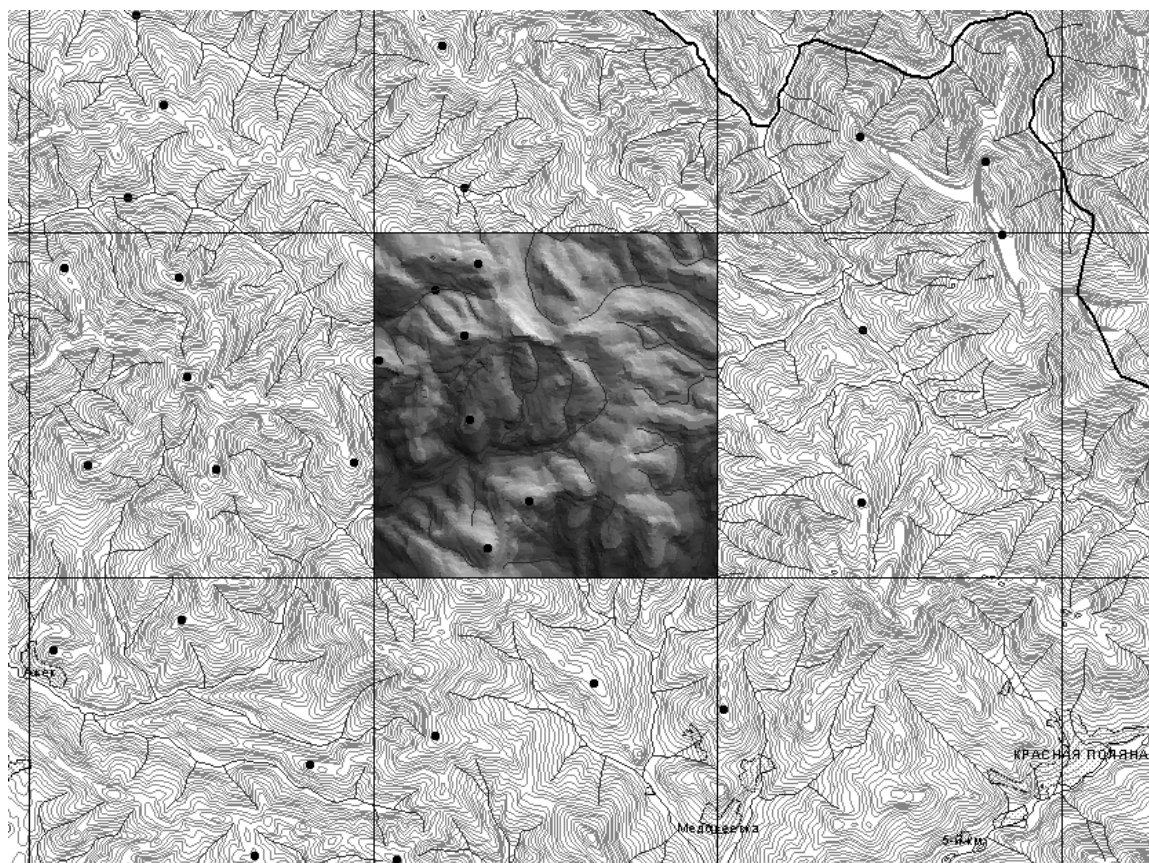
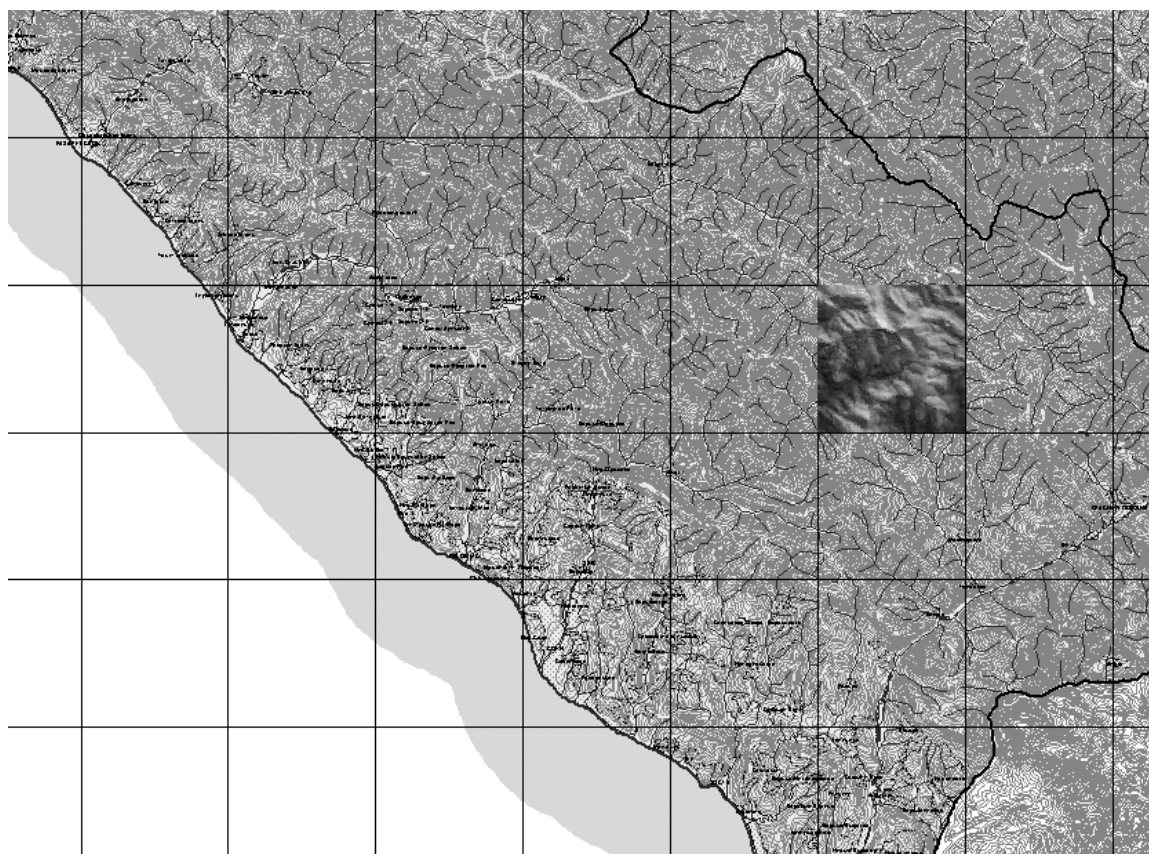


Рис. 2. Предварительное моделирование рельефа внутри десятикилометровой зоны

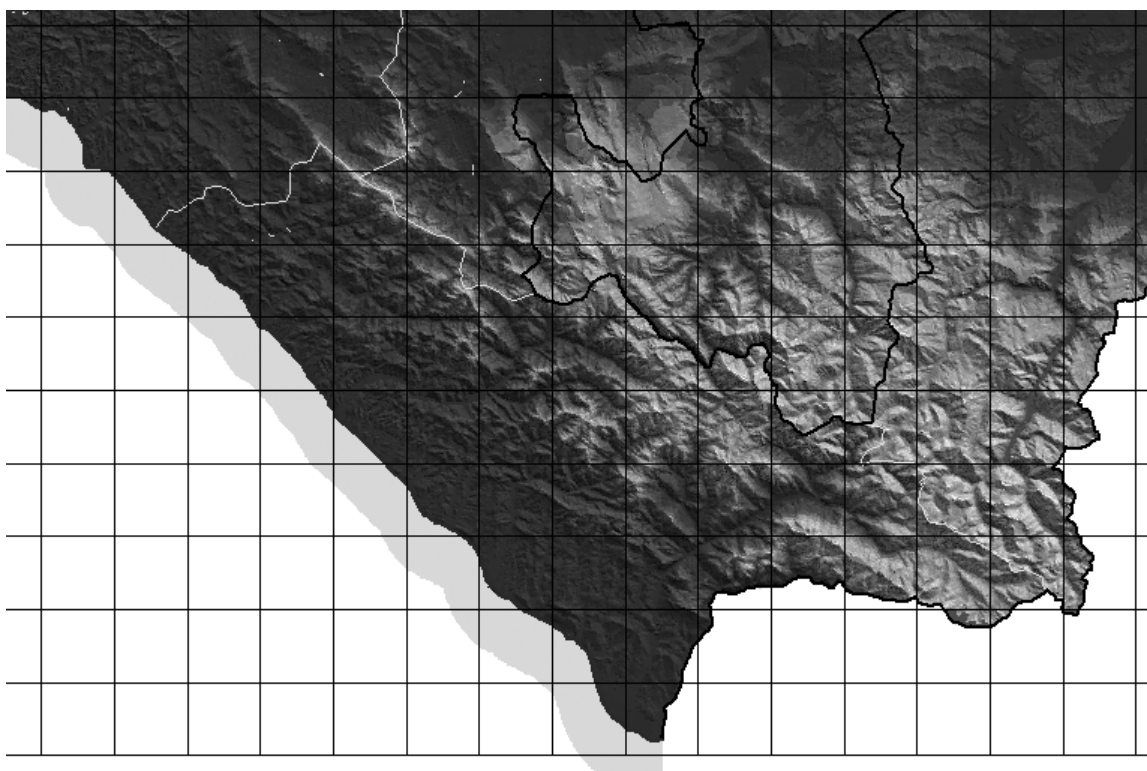


Рис. 3. TIN-модель рельефа южной части Краснодарского края, полученная на предварительном этапе моделирования

вершинами в опорных точках поверхности, является более предпочтительным. Альтернатива в виде триангуляционных сеток имеет преимущества, так как алгоритмы разбиения на треугольники имеют меньшую вычислительную сложность, нежели при использовании других полигонов [14]. Рассмотрение КА-моделей на различных триангуляционных сетках позволяет имитировать сложные процессы различной природы, моделируемые совместной работой множества простых вычислителей, на криволинейных поверхностях в трехмерном пространстве. При этом треугольники в триангуляции не обязательно должны быть правильными и одинаковыми по площади. Эту особенность стоит принимать во внимание при реализации клеточных автоматов, требующих уточнения имитации процесса на определенных участках поверхности.

Для построения сложных КА, в которых ряд правил перехода моделирует диффузию, также могут быть использованы триангуляционные сетки. Конфигурируя клеточный автомат, имитирующий наивную диффузию, на триангуляционной сетке, правило перехода

можно задать, случайным образом выбирая одну из соседних клеток и проводя обмен состояниями. Но, чтобы использовать геометрические особенности моделируемой поверхности, правило перехода можно расширить. Например, при необходимости можно провести балансировку вероятностей, когда соседняя клетка с самым коротким общим ребром (или меньшей площадью) выбирается с большей вероятностью, чем с самым длинным (большей площадью).

Для моделирования распространения фронта пожара, как описано в [9], применен композиционный клеточный автомат, в основе которого лежит наивная диффузия, реализованная на триангуляционной сетке.

При построении такого КА к элементам триангуляционной сетки на каждом такте применяется несколько правил, в данном случае следующих: после итерации диффузии для всего введенного клеточного пространства $\Omega = \{a(m), m : m \in M\}$ производится осреднение, т.е. определяются значения средней концентрации частиц ϕ .

Компьютерная реализация модели предоставляет пользователю возможность перехо-

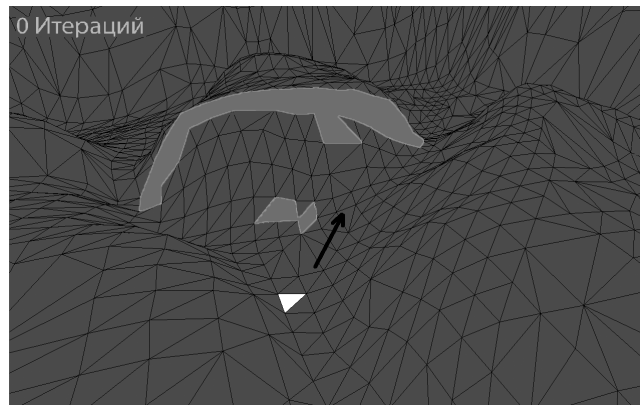


Рис. 4. Результаты работы композиционного КА на триангуляционной сетке

да от булевых значений к более наглядному непрерывному распределению концентрации частиц. Данный переход осуществляется путем осреднения значений состояний клеток автомата по выбранной окрестности. Для осреднения применяются различные алгоритмы, к часто используемым относится, например, осреднение по окружности. Из центра каждого треугольника проводится окружность радиус которой определяется пользователем. Производится подсчет попавших в круг ячеек сетки N , при этом ячейка, где располагается центр, автоматически попадает в круг. Пусть из общего числа ячеек N_1 имеет состояние «1». Тогда средняя концентрация находится по формуле $\phi = N_1/N$. Такой алгоритм обладает вычислительной сложностью $O(n^2)$ [14], где n — количество треугольников сетки. Большая вычислительная сложность является главным недостатком данного подхода.

Другой подход — осреднение по ближайшим соседствующим ячейкам менее требователен к вычислительным ресурсам. В таком случае подсчет клеток с состоянием «1» производится среди заданного числа соседей по формуле $\phi = N_1/(N_2 + 1)$, где $N_2 \in \{1, 2, 3\}$. Данный алгоритм имеет вычислительную сложность $O(n)$, но результат оказывается гораздо менее наглядным, потому что функция концентрации может принимать только одно из семи значений $\phi \in \{0, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 1\}$. Однако этот же подход может быть обобщен на окрестность более высокого уровня. Осредненная концентрация будет отображаться более наглядно, если распространить алгоритм с первого на j -й уровень соседства, $j \geq 2$.

Следующим этапом работы автомата является дискретизация. После проведения осреднения найденные значения заменяются в каждой клетке на значение $\psi = 0,5\phi(1 - \phi)$, тем самым моделируется поток. Далее производится операция, обратная осреднению, собственно и называемая дискретизацией, т.е. каждой клетке, содержащей значение $\psi \in [0, 1]$, ставится в соответствие булево значение по формуле

$$a' = \begin{cases} 1, & \tau < \psi; \\ 0, & \tau \geq \psi, \end{cases}$$

где τ — случайное число из интервала $[0, 1]$. Описанный клеточный автомат при учете реальных особенностей процесса может, в частности, имитировать распространение фронта пожара.

Рассмотрим пример использования КА для моделирования процесса распространения низового лесного пожара с учетом направления ветра и коэффициента горючести подстилающей поверхности. Скорость и направление ветра задаются вектором в трехмерном пространстве.

На рис. 4 представлен пространственный вид поверхности, вдоль которой распространяется пожар на старте работы автомата. Здесь клетки зеленого массива, в которых возможно воспламенение отображены на рисунке темно-серым цветом, клеткам горящего леса соответствуют белые области, негорючим участкам (препятствиям) — светло-серые клетки. Стрелка соответствует заданному направлению ветра.

Рис. 5 иллюстрирует этапы работы автомата, который содержит клетки четырех типов: клетки зеленого массива, в которых

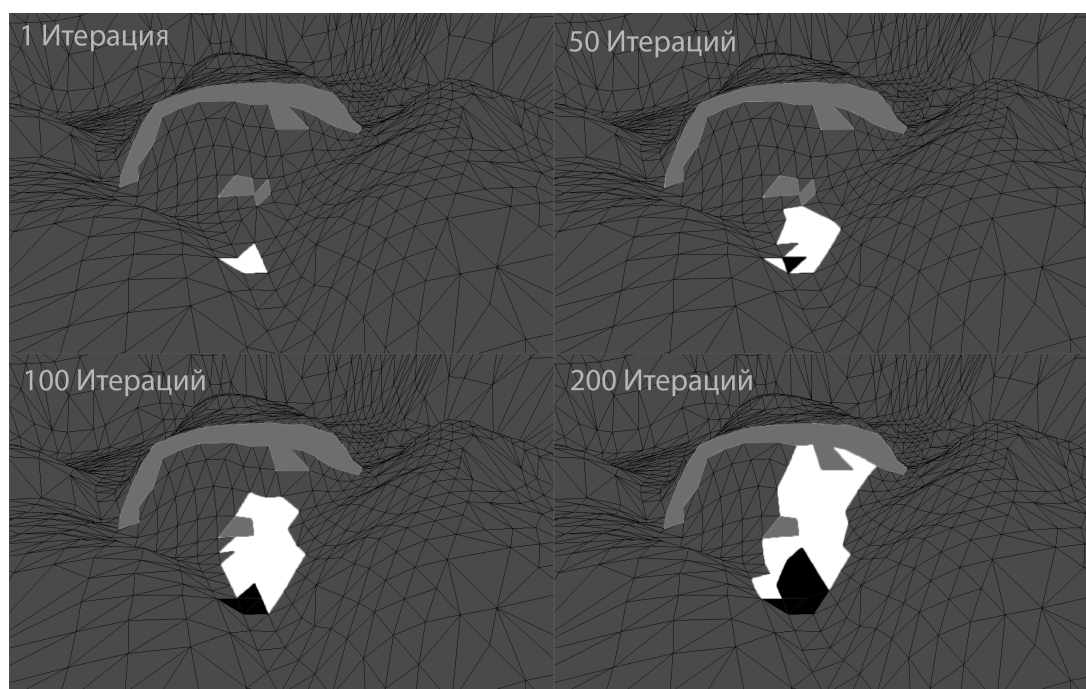


Рис. 5. Результаты работы КА-модели

возможно воспламенение (отображены на рис. 5 темно-серым цветом); клетки горящего леса (белые области); выгоревшая поверхность, где повторное возгорание невозможно (отображены черным цветом); препятствие, например каменистый участок, не подверженное горению (области светло-серого цвета). На рисунке приведены результаты работы автомата для 1-й, 50-й, 100-й и 200-й итераций. Горючие характеристики массива приняты одинаковыми.

Как видно из рис. 5, наиболее быстро пожар распространяется в направлении ветра.

Представленный пример работы КА позволяет оценить площадь возгорания и протяженность фронта. Реализованная клеточно-автоматная модель на триангуляционной сетке предоставляет возможность ее расширения, в частности, введение препятствий, задание переменных ветровых характеристик. Предлагаемый алгоритм программной реализации КА позволяет легко иллюстрировать процесс на любой поверхности, позволяя в динамике получать площади и контуры распространения природных пожаров.

Заключение

В работе представлена цифровая модель рельефа территории Краснодарского края с

использованием геоинформационных систем. Описана клеточно-автоматная модель распространения пожара на триангуляционной сетке.

Наряду с развитием комплексных КА для описания процессов распространения пожара и миграции загрязняющих аэрозольных и газообразных продуктов горения в атмосфере в дальнейшем предполагается реализация телекоммуникационного канала, связывающего выбранные точки цифровой модели с результатами мониторинга их реальных прообразов на местности, а также накопление и обработка большого объема получаемой таким образом информации посредством использования комплекса программ для решения задач анализа и оперативного прогноза.

Комбинация функций, реализованных в авторских алгоритмах, со стандартными функциями ГИС обработки атрибутивных и графических пространственных данных, включая такие тематические слои как рельеф суши (отметки высот, горизонтали, формы рельефа), гидрография (гидрографическая сеть, гидротехнические сооружения, переправы и пр.), населенные пункты и др., позволит получить эффективные решения моделирования пространственно распределенного процесса.

Литература

1. Kourtz P.H., O'Regan W.G. A model for a small forest fire to simulate burned andburning areas for use in a detection model // *Forest Science*. 1971. Vol. 17, Iss. 2. P.163–169.
2. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения и распространения верховых лесных пожаров в осредненной постановке // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. Вып. 2. С. 24–30.
3. Асылбаев Н.А. Математическое моделирование распространения степного пожара // *Компьютерные исследования и моделирование* 2010. Т. 2. № 4. С. 377–384.
4. Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // *Математическое моделирование*. 2008. Т. 20. №1 1. С. 28–34.
5. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // *Фундаментальные науки. Информатика*. 2011. № 12. С. 51–56.
6. Кузык А.Д., Карабын О.А. Математическое моделирование распространения лесного пожара с учетом ветра и рельефа // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2013. Vol. 32. Iss. 4. P. 107–113.
7. Рубцов С.Е., Павлова А.В. Клеточно-автоматные модели диффузионно-реакционных процессов многокомпонентных примесей // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2017. № 6. С. 55–60.
8. Рубцов С.Е., Павлова А.В., Олейников А.С. Клеточно-автоматное моделирование диффузии многокомпонентной примеси // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2017. № 4. Вып. 1. С. 86–93.
9. Павлова А.В., Родионов П.Р., Рубцов С.Е. К клеточно-автоматным моделям пожаров // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. Вып. 4. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 245–251.
10. Митакович С.А. Прогнозирование распространения лесного пожара в ArcGIS // *ГИС: теория и практика. ArcGIS 10.1*. 2012. № 3 (62). https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=7818&SECTION_ID=252
11. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator // *Model Development and Evaluation*. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4. 1989.
12. Toffoli T., Margolus N. *Cellular Automata Machines*. MIT Press, 1987. 279 p.
13. Bandman O. Comparative Study of Cellular automata Diffusion Models // *Lecture Notes in Computer Science*. 1999. Vol. 1662. P. 395–399.
14. Евсеев А.А., Нечаева О.И. Клеточно-автоматное моделирование диффузионных процессов на триангуляционных сетках // *Прикладная дискретная математика*. 2009. № 4. С. 72–83.

References

1. Kourtz, P.H., O'Regan, W.G. A model for a small forest fire to simulate burned andburning areas for use in a detection model. *Forest Science*, 1971, vol. 17, iss. 2, pp. 163–169.
2. Perminov, V.A. Matematicheskoe modelirovanie vznikhoveniya i rasprostraneniya verhovyyh lesnyh pozharov v osrednennoj postanovke [Mathematical modeling of the occurrence and propagation of high forest fires in an averaged setting]. *ZHurnal tekhnicheskoy fiziki* [J. of Technical Physics], 2015, vol. 85, iss. 2, pp. 24–30. (In Russian)
3. Asylbaev, N.A. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya stepnogo pozhara [Mathematical modeling of the spread of the steppe fire]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer Research and Modeling], 2010, vol. 2, no. 4, pp. 377–384. (In Russian)
4. Mysheckaya, E.E. Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov s primeneniem mnogoprocessornyh EVM [Mathematical modeling of forest fires using multiprocessor computers]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2008, vol. 20, no. 11, pp. 28–34. (In Russian)
5. Barovik, D.V., Taranchuk, V.B. Algoritmicheskie osnovy postroeniya komp'yuternoy modeli prognoza rasprostraneniya lesnyh pozharov [Algorithmic basis for constructing a computer model for forecasting the spread of forest fires]. *Fundamental'nye nauki. Informatika* [Fundamental Sciences. Computer science], 2011, no. 12, pp. 51–56. (In Russian)
6. Kuzyk, A.D., Karabyn, O.A. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya lesnogo pozhara s uchetom vetra i rel'efa [Mathematical modeling of the spread of a forest fire taking into account wind and topography]. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2013, vol. 32, iss. 4, pp. 107–113. (In Russian)
7. Rubtsov, S.E., Pavlova, A.V. Kletochno-avtomatnye modeli diffuzionno-reakcionnyh processov mnogokomponentnyh primesej [Cellular automaton models of diffusion-reaction processes of multicomponent impurities]. *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2017, no. 6, pp. 55–60. (In Russian)
8. Rubtsov, S.E., Pavlova, A.V., Olejnikov, A.S. Kletochno-avtomatnoe modelirovanie diffuzii mnogokomponentnoj primesi [Cellular automaton modeling of diffusion of a multicompo-

- ment admixture]. *Ekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2017, no. 4, pt. 1, pp. 86–93. (In Russian)
9. Pavlova, A.V., Rodionov, P.R., Rubtsov, S.E. K kletочно-avtomatnym modelyam pozharov [To cellular-automaton models of fires]. In *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyj analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system* [Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems], vol. 4. Izd-vo YUNC RAN, Rostov n/D, 2019, pp. 245–251. (In Russian)
 10. Mitakovich, S.A. Prognozirovaniye rasprostraneniya lesnogo pozhara v ArcGIS [Predicting the spread of forest fires in ArcGIS]. *GIS: teoriya i praktika. ArcGIS 10.1* [GIS: theory and practice. ArcGIS 10.1] 2012. no. 3 (62). https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=7818&SECTION_ID=252. (In Russian)
 11. Finney, M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator. Model Development and Evaluation*. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4. 1989.
 12. Toffoli, T., Margolus, N. *Cellular Automata Machines*. MIT Press, 1987.
 13. Bandman, O. Comparative Study of Cellular automata Diffusion Models. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999, vol. 1662, pp. 395–399.
 14. Evseev, A.A., Nechaeva, O.I. Kletочно-avtomatnoye modelirovanie diffuzionnyh processov na triangulyacionnyh setkah [Cellular automaton modeling of diffusion processes on triangulation grids]. *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied Discrete Mathematics], 2009, no. 4, pp. 72–83. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2019

© Гладской И. Б., Павлова А. В., Рубцов С. Е., 2019

Статья поступила 28 ноября 2019 г.