

## **Применение методов имитационного моделирования при тушении пожаров различного генеза**

Имитационное моделирование — метод исследования объектов, основанный на том, что изучаемый объект заменяется имитирующим объектом. С имитирующим объектом проводят эксперименты (не прибегая к экспериментам на реальном объекте) и в результате получают информацию об изучаемом объекте. Имитирующий объект при этом является из себя информационный объект. В работе показано, что применение методики исчисления пожаров может быть реализовано на основе прогнозирования и значительного выделения оптимальной структуры методики тушения локальных пожаров.

Ключевые слова: пожары, тушение, генез, моделирование, сложные ситуации.

При создании методики по имитационному моделированию необходимо разобраться с терминами. Проблема была в том, что общепринятые термины не годились для описания статистических данных, собранных в процессе имитации. Термины: процесс и экземпляры процесса были неприемлемы, потому что обычно не используется процесс в парадигме Аристотеля. Парадигма Аристотеля не стыкуется с примененным метааппаратом [2]. При этом практическое применение данной методики было простое – моделирование и имитация пожаров с целью принятия управленческих решений. В программе создавался виртуальный объект, описание которого состояло из описания сценариев и их взаимодействия. Сценарии прогонялись внутри программы, а также моделировались ресурсы и их взаимодействия (рис. 1).

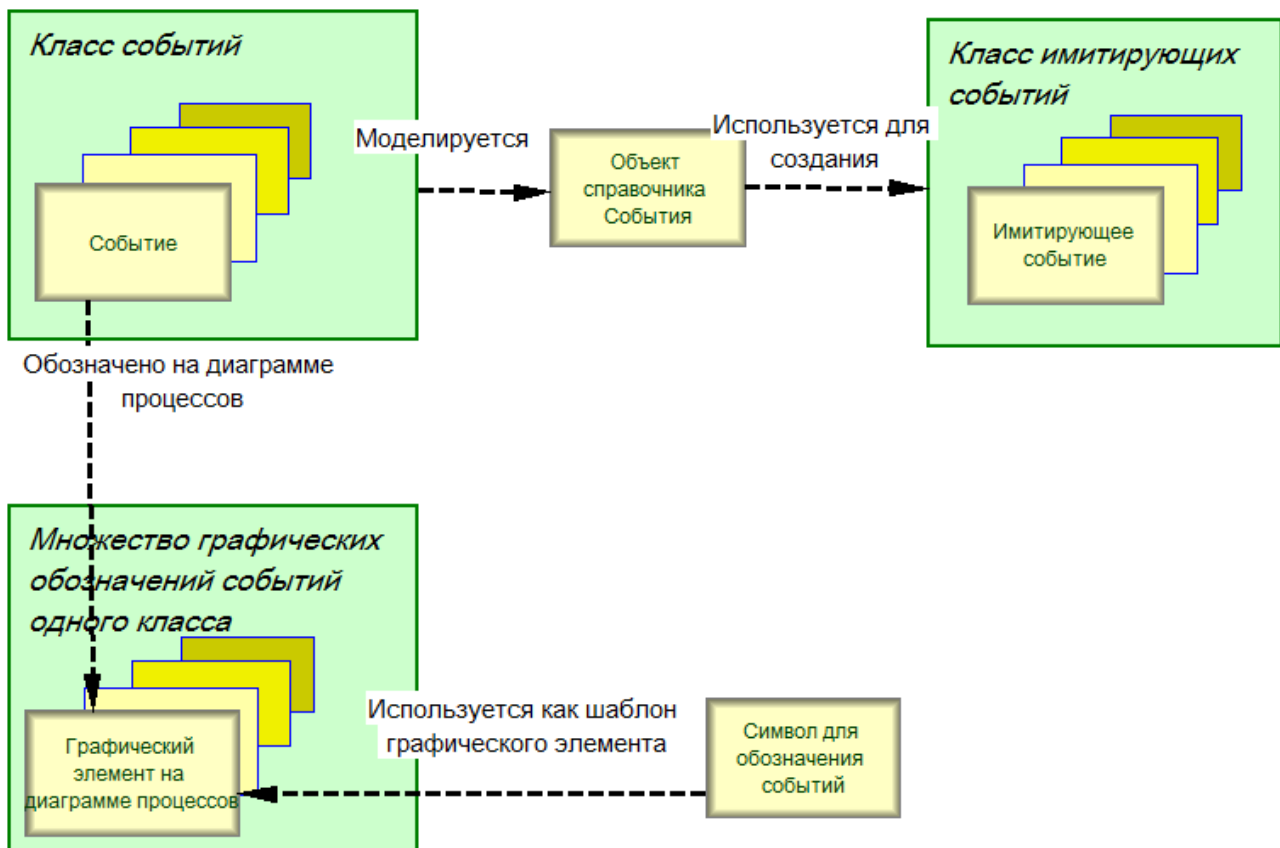


Рисунок 1. Структура имитационного моделирования

Цель имитационного моделирования — получение приближенных знаний о некотором параметре объекта, не производя непосредственное измерение его значений. Понятно, что это необходимо тогда и только тогда, когда измерение невозможно, или оно стоит дороже проведения имитации. При этом для изучения этого параметра мы можем пользоваться другими известными параметрами объекта и моделью его конструкции [3]. Допуская, что модель конструкции достаточно точно описывает объект, предполагается, что полученные в ходе имитации статистические распределения значений параметра моделирующего объекта будут в той или иной степени совпадать с распределением значений параметра реального объекта [5].

Понятно, что математический аппарат, который был применен, — это статистическая математика. Понятно, что математическая статистика не использует термины экземпляры и типы. Она работает с объектами и множествами. В итоге для написания методики

мы использовали логическую парадигму на основе которой создан стандарт ИСО 15926. Основой его является наличие объектов, классов и классов [1].

Необходимо выявить некоторые определения, которые следует ввести для объяснения механизмов моделирования и анализа результатов имитации. Этих примеров будет достаточно, чтобы понять модель предметной области [4].

Примеры определений:

Операция. Моделируемая операция: Реальная или проектируемая операция. Описание ее может содержать следующие атрибуты:

- участвующие в операции объекты и субъекты,
- события, возникающие в процессе выполнения операции.

Имитирующая операция: Объект, созданный в программе для имитации моделируемой операции. Имитирующая операция описывается следующими имитирующими событиями:

- начало операции,
- завершение операции,
- завершение времени технологического ожидания,
- постановка операции в очередь к ресурсам,
- прерывание выполнения операции,
- возобновление выполнения операции,
- действие с переменной и тд.

Класс моделируемых операций: Множество моделируемых операций, объединенных по какому-то признаку: например, по совпадению наборов типов входных и выходных объектов. Пример: класс операций «Забить гвоздь» — это множество всех операций, объединенных вместе по признаку совпадения типа предмета труда — гвоздя и однотипности воздействия на него.

Класс имитирующих операций: Множество имитирующих операций, имитирующих множество моделируемых операций.

Операция (объект в справочнике:) Объект справочника, хранящий информацию о:

– классе моделируемых операций. Например, закон распределения времени выполнения операции моделируемого класса есть параметр класса.

– любой моделируемой операции класса. Например, нормативно-правовой акт, в соответствии с которым выполняется каждая моделируемая операция.

Операция (как элемент диаграммы:) Графическое обозначение моделируемых операций одного класса на диаграмме.

Операция (как элемент нотации): Условное обозначение в нотации моделирования процессов, шаблон для обозначения моделируемых операций. Имеет разные названия в зависимости от нотации

Событие. Моделируемое событие: Реальное, или проектируемое событие.

Пример:

Для операции: технологическое ожидание в рамках операции по покраске корпуса машины, закончилось в 09-20.

Для процесса: событие заявка оформлена, произошедшее в 09-30, произошло в рамках процесса «прием заявки».

Имитирующее событие: Объект, созданный для имитации моделируемого события. Этот объект создается в памяти компьютера в ходе выполнения имитации.

Класс моделируемых событий: Множество моделируемых событий, объединенных вместе по какому-то признаку. Пример:

Для операции: множество всех событий, знаменующих собой начала операций по оформлению заявок.

Для процесса: множество всех событий, которые привели к стартам процессов приема заявок.

Класс имитирующих событий: Множество имитирующих событий, созданных для имитации множества моделируемых событий. Примеры: Отчет о событиях, имитирующих начало операций исследуемого класса, можно увидеть в отчетах по проведенной имитации, например, в форме «Хронология выполнения процессов».




Событие (как объект в справочнике): Объект справочника «События», хранящий информацию о:

- классе моделируемых событий, например, закон распределения момента возникновения стартового события есть параметр класса,
- объектах класса моделируемых событий, например название события.

Событие (как объект на диаграмме): Графическое обозначение моделируемых событий одного класса. Используется на диаграмме. Данному событию как элементу на диаграмме соответствует хранимый в системе объект справочника «События».

Событие (как элемент нотации): Условное обозначение, используемое в нотации моделирования процессов, для обозначения моделируемых событий. В разных нотациях используются разные условные обозначения для различных классов событий.

На рисунке изображено отношение между сущностями: события собраны в классы событий. Класс событий описан при помощи объекта справочника «События». События одного класса изображены на диаграммах процессов при помощи графических элементов. На основе объекта справочника «События» движок имитации создает имитирующие события (рис. 2).

Нотация	Условное обозначение	Название условного обозначения
Процесс/Процедура		Действие
ЕРС		Функция
ВРМН		Задача

## Рисунок 2. Отношение между сущностями в структуре имитационного моделирования

**Моделируемый процесс:** Последовательность моделируемых операций. Описание этой последовательности удобно представить в виде диаграммы Ганта. Описание содержит события. Например, события: «старт процесса» и «завершение процесса».

**Имитирующий процесс:** Объект, созданный для имитации моделируемого процесса. Этот объект создается в памяти компьютера в ходе выполнения имитации.

**Класс моделируемых процессов:** Множество моделируемых процессов, объединенных по какому-либо признаку. Самым распространенным объединением является объединение процессов, имеющих общую модель. В качестве модели может быть использована диаграмма процессов, выполненная в любой нотации моделирования: Процесс, Процедура, EPC, BPMN.

**Класс имитирующих процессов:** Множество имитирующих процессов, созданных в рамках имитации, для имитации активности.

**Процесс (как объект в справочнике):** Объект справочника «Процессы».

**Процесс (диаграмма процессов):** Модель процессов одного класса, выполненная в виде диаграммы. На основе этой модели создаются имитирующие процессы.

В качестве задачи, которую мы решали мы рассмотрели тушение лесных пожаров. В таблицах 1 и 2 мы представили количество лесных пожаров в динамике.

Таблица 1. Статистические данные о площади лесных насаждений

Наименование	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Общая площадь земель лесного фонда, тыс. га	5368,8	9751,2	9751,2	9751,2	9751,2	9751,2
Площадь земель, покрытых лесной растительностью, тыс.га	4516,6	8816,2	8842,8	8856	8869,4	8880,6
Общий средний прирост, млн. куб. м	14,64	29,42	29,64	29,66	29,64	29,62

Таблица 2. Статистические данные о характере лесных пожаров

	2012	2013	2014	2015	2016
Число случаев лесных пожаров	246	312	216	720	182
из них по причинам:	0	0	0	0	0
сельскохозяйственной палы	4	38	82	28	2
по вине граждан	238	274	124	638	164
Лесная площадь, пройденная пожарами, га	892	1132	788	4666	1080

Для корреляции полученных данных использовался смежный показатель количества дней с грозой, что выступает как дополнительный фактор повышения опасности. Данные о грозовой активности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Число дней с грозой по годам

2014	2015	2016	2017	2018
38	42	46	64	44

Для формирования линейного тренда применялась формула, которая основана на методе наименьших квадратов. Дополнительно рассчитывался коэффициент корреляции. Ряды признаков основались на параметрах общих неизвестных [x;y]. Средние выборочные  $x_B$   $y_B$  рассчитывались по формуле:

$$x_B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad y_B = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1)$$

Для расчета среднеквадратического отклонения использовалась формула

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (x - x_B)^2} \quad (2)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (y - y_B)^2} \quad (3)$$

Для расчета корреляционного момента использовалась формула:

$$K_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_B) \cdot (y_i - y_B) \quad (4)$$

Для поиска выборочного коэффициента регрессии использовали формулу:

$$r_B = \frac{K_{xy}}{s_x^2} \quad (5)$$

Функциональная формула линейной регрессии основывалась на коэффициентах:

$$y - y_B = r_B \cdot (x - x_B) \quad (6)$$

Для применения выборочного коэффициента регрессии формула приобретала следующий вид:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (7)$$

Исходя из этого применяли коэффициент входного фактора модели:

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (8)$$

И формировали наблюдаемое значение каждого критерия:

$$T_{nabl} = \frac{r_{xy} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (9)$$

Мы проверили значение критерия Стюдента при 2 степенях свободы:

$$T_{nabl} = \frac{r_{xy} \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} = \frac{\sqrt{0.0694} \cdot \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0.0694}} = 0.3862 \quad (10)$$

Далее вычислим значение антропогенного фактора для количества пожаров. Мы предполагаем, что значение имеет решающее значение и таким образом формирует целостную картину (табл. 4).

Таблица 4. Вычисление процента антропогенного фактора возникновения пожара от числа случаев всех пожаров

	2014	2015	2016	2017	2018
Число случаев лесных пожаров	246	312	216	720	182
из них по причинам:	0	0	0	0	0
сельскохозяйственной палы	4	38	82	28	2
по вине граждан	238	274	124	638	164
Итого антропогенный фактор	242	312	206	666	166
	98,37%	100,00%	95,37%	92,50%	91,21%



Проведем анализ на основе данных многомерного анализа. Рассчитаем как параметры модели регрессной статистики, так и линейной многомерной модели и регрессионной статистики (таблица 5-8).

Таблица 5. Исходные данные для многомерного анализа

Процент антропогенного фактора X	Среднегодовое число дней с грозой Y	Лесная площадь, пройденная пожарами (га) Z
0,9837	19	446
1,0000	21	566
0,9537	23	394
0,9250	32	2333
0,9121	22	540

Таблица 6. Параметры модели «Регрессионная статистика»

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,9574
R-квадрат	0,9166
Нормированный R-квадрат	0,8333
Стандартная ошибка	338,3395
Наблюдения	5

Таблица 7. Дисперсионный анализ модели

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	2518081,48	1259040,74	11,00	0,008
Остаток	2	228947,32	114473,66		
Итого	4	2747028,80			

Таблица 8. Коэффициенты линейной многомерной модели

	Коэффициенты
Y-пересечение	-6337,6896
Процент антропогенного фактора X	3349,8816
Среднегодовое число дней с грозой Y	170,7122

Отдельно мы рассмотрели факторные признаки на основе формулы:

$$R_{\text{нор}}^2 = 1 - \left(1 - R^2\right) \frac{n-1}{n-m-1} \quad (11)$$

Это позволило на основе критерия Фишера и данной формулы определить искомые значения (таблица 9-13).

Таблица 9. Разыгранные значения Z (эксперимент 1),

№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
1	0,9290	20	188,68
2	0,9366	20	214,20
3	0,9509	27	1457,04
4	0,9655	30	2017,88
5	0,9997	20	425,35
6	0,9188	29	1690,76
7	0,9446	26	1265,17
№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
8	0,9901	23	905,46
9	0,9736	30	2045,23
10	0,9217	24	847,03
Средние	0,9531	24,9000	1105,68

Таблица 10. Разыгранные значения Z (эксперимент 2),

№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
1	0,9573	23	795,52
2	0,9948	19	238,36
3	0,9935	19	233,82
4	0,9755	23	856,66
5	0,9136	24	819,70
6	0,9538	20	271,59
7	0,9598	22	633,15
8	0,9283	24	869,06
9	0,9173	24	832,27
10	0,9960	23	925,20
Средние	0,9590	22,1000	647,53

Таблица 11. Данные эксперимента 3

№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
1	0,7038	24	117,1406
2	0,7486	24	267,2178
3	0,7918	23	241,1006
4	0,7075	28	812,3472
5	0,7329	28	897,2821
6	0,7404	19	0,0000
7	0,7680	27	844,1173
8	0,7596	27	815,9899
9	0,7973	26	771,5269
10	0,7280	30	1222,4580
Средние	0,7478	25,6000	598,9180

Таблица 12. Данные эксперимента 4

№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
1	0,6021	29	629,9652
2	0,6231	25	17,4155
3	0,6503	30	961,9462
4	0,6495	21	0,0000
5	0,6349	26	227,7194
6	0,6229	28	528,9926
№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
7	0,6094	19	0,0000
8	0,6962	24	91,6805
9	0,6611	31	1168,9514
10	0,6511	26	281,9462
Средние	0,6401	25,9000	390,8617

Таблица 13. Данные эксперимента 5

№	X (доля)	Y (дней)	Z (га)
1	0,5929	27	257,7400
2	0,5325	25	0,0000
3	0,5315	26	0,0000
4	0,5237	28	196,4297
5	0,5197	20	0,0000
6	0,5768	23	0,0000
7	0,5102	21	0,0000
8	0,5941	30	773,9138
9	0,5865	25	0,0000
10	0,5007	24	0,0000
Средние	0,5469	24,9000	122,8084

Исследовав числовые данные и проанализировав результаты вычислительного эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- прирост площади зеленых насаждений составляет 15,4 тыс.га в год и примерно 11% этого прироста уничтожается в ходе пожаров;
- вероятность лесного пожара увеличивается с увеличением количества грозных дней в году;
- вероятность лесного пожара увеличивается в связи с неблагоприятной деятельностью человека;
- количество зафиксированных лесных пожаров, произошедших по вине человека составляет 95% от общего количество пожаров;
- площадь лесных пожаров не снижается в последние несколько лет.

Если увеличить процент антропогенного фактора на 0,01, то площадь лесных пожаров увеличивается на  $3349,8816/100=33,49$  (га). Если число дней с грозой в году увеличивается на 1, то площадь лесных пожаров увеличивается на 170,7122 (га) в год. И это утверждение верно на 95,74% (значение множественного R многомерной регрессионной модели).

Сравнение данных экспериментов 1 и 5 говорит о том, что если грозовая активность останется на прежнем (высоком) уровне и при этом процент антропогенного фактора снизится от 0,95 до 0,55, площадь лесных пожаров уменьшится, чуть ли не в 10 раз.

В связи с этим, исследование, назначением которого является оптимизация математической модели и комплекса программ мониторинга и прогнозирования возникновения природных пожаров на основе имитационного моделирования, является актуальным.

#### Список литературы

1. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B. J. Stocks, M.E.Alexander, R. S. Mc Alpine et al. Canadian Forestry service, 1987. 500 p.
2. Deeming I.E., Lancaster I.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.HI. The National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service Research Paper RM-84 February, 1972. 165 p
3. Garcia Diez E. L., Rivas Soriano L., de Pablo F., Garcia Diez A. Prediction of the daily number of forest fires// Int. J. Wildland Fire. 1999. V. 9, N3. P. 207—211.
4. Viegas D. X., Bovio G., FerreiraA. etal. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe// Ibid. 1999. V. 10, N 4. P. 235—246.
5. 14. Preisler H. K., Brillinger D. R., Burgan R. E., Benoit J.W. Probability based models for estimation of wildfire risk // Int. J. Wildland Fire. 2004. V. 13, N2. P. 133—142.