

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БОРЬБЫ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ): ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В СРЕДЕ JULIA

А.П. Суходолов^{1, 2}, П.Г. Сорокина^{1, 2}, А.В. Лебедева¹

¹ *Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

² *Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация*

Информация о статье

Дата поступления
30 июля 2019 г.

Дата принятия к печати
30 августа 2019 г.

Дата онлайн-размещения
12 сентября 2019 г.

Ключевые слова

Математическое моделирование; лесные пожары; экология; модель Паркса; язык программирования Julia

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Эколого-экономическая оценка функционирования пресноводных биогеоценозов, фундаментальный и прикладные аспекты», № гос. регистрации АААА-А19-119070190033-0, № Минобрнауки 0279-2019-0003

Аннотация

Лесные пожары крайне негативно влияют на природную среду, наносят значительный ущерб лесным, охотничье-промысловым ресурсам и народному хозяйству страны. Вопросы борьбы с лесными пожарами и их предотвращения особенно важны для Восточной Сибири с ее гигантскими просторами, низкой плотностью населения и слабым развитием дорожной сети на таежных территориях. Организация и проведение масштабных противопожарных мероприятий в Восточной Сибири требуют колоссальных финансовых и материально-технических ресурсов. В этой связи актуальным становится эколого-математическое моделирование ситуаций, возникающих при противодействии лесным пожарам. Целью исследования таких моделей является выработка противопожарной стратегии, которая обеспечивала бы приемлемый экологический уровень и в то же время была экономически выгодной. В данной работе внимание уделяется решению задачи оптимального управления противодействием лесным пожарам, прототипом которой служит известная модель Паркса. Для анализа модели применяется современный язык программирования Julia, спроектированный для проведения математических вычислений и численных исследований. В качестве модельной территории исследования выбрана Иркутская область.

MATHEMATICAL MODEL OF FIGHT AGAINST FOREST FIRES IN TERMS OF IRKUTSK OBLAST: COMPUTATIONAL EXPERIMENTS IN TERMS OF THE JULIA LANGUAGE

Alexander P. Sukhodolov^{1, 2}, Polina G. Sorokina^{1, 2}, Alina V. Lebedeva¹

¹ *Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation*

² *Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation*

Article info

Received
July 30, 2019

Accepted
August 30, 2019

Available online
September 12, 2019

Abstract

Forest fires extremely undermine the environment, cause serious damage to the forests, wildlife resources and national economy of the country. The issues of fight against forests fires and their prevention are especially important for Eastern Siberia with its huge spaces, low population density and poor development of the road network on the taiga territories. Organizing and delivering largescale fire prevention activities entails enormous financial and material and technical

Keywords

Mathematical modeling; forest fires; ecology; Parks model; Julia programming language

Acknowledgements

The work is made with support of the RF Ministry of Science and Higher Education, the Project «Ecological and economic assessment of functioning of freshwater biocoenosis, fundamental and applied aspects», State Registration № AAAA-A19-119070190033, Min. Sci. and HE № 0279-2019-0003

Для Восточной Сибири характерна высокая лесистость и значительные запасы лесных и охотничье-промысловых ресурсов. Здесь преобладают таежные леса преимущественно ценных хвойных пород — сосна, лиственница, кедр, пихта, ель. Таежные леса региона образуют «легкие планеты», способствуют поддержанию водного баланса и воспроизводству самых эффективных в России гидроэнергетических ресурсов Байкало-Ангарского, Енисейского и Ленского бассейнов. Кроме того, они поддерживают большое видовое разнообразие растительного и животного мира, в них обитают ценные виды промысловых животных, что благоприятствует развитию охотничье-промысловых хозяйств. Наконец, большие запасы спелой и перестойной древесины в регионе (свыше 70 % общероссийских запасов) являются основой для развития предприятий лесопромышленного комплекса. Ценные породы хвойной древесины (сосна, кедр, лиственница, пихта, ель) пользуются спросом на мировом рынке.

Вместе с тем таежные леса подвержены частым лесным пожарам, которые регуляр-

resources Therefore, ecological-mathematical modeling of situations arising from countering forest fires becomes relevant. The purpose of investigations of such models is to develop a fire fighting strategy that would ensure an acceptable environmental level and, at the same time, be economically effective. This article pays attention to solving the problem of optimal control of forest fire fighting, the prototype of which is the well-known model by G.M. Parks. To analyze the model, the modern programming language Julia is used, which is designed to perform mathematical calculations and numerical investigations. It mostly designed for mathematical calculations and numerical analysis of various problems. Irkutsk Oblast has been chosen as a model territory of research.

но фиксируются во всех субъектах региона. Так, в течение лета 2019 г. в лесах Восточной Сибири было зафиксировано около 6 тыс. пожаров, а общая пройденная огнем площадь оценивалась в 8,9 млн га (табл. 1). При этом на долю Восточной Сибири приходится основная часть (88,4 %) пораженной огнем лесной площади (табл. 2).

Среди субъектов РФ одним из «лидеров» по количеству лесных пожаров и пройденной огнем площади таежных лесов является Иркутская область, размер территории которой составляет 774 846 км² (4,52 % российской территории). По этому показателю Иркутская область находится на шестом месте в России после Республики Саха (Якутия), Красноярского и Хабаровского краев, Тюменской и Магаданской областей.

Иркутская область больше любого западноевропейского государства и по территории сопоставима с Турцией — 780 580 км². В ее пределах могли бы разместиться Бельгия, Великобритания, Голландия, Дания, Италия и Португалия, вместе взятые. Область граничит со всеми субъектами Российской Федерации, входящими в состав Восточ-

Таблица 1

Сведения о лесопожарной обстановке в некоторых субъектах РФ, входящих в Восточно-Сибирский экономический район, за период с 1 января по 26 августа 2019 г.*

Субъект Российской Федерации	Количество пожаров	Площадь, пройденная огнем	
		тыс. га	%
Республика Саха (Якутия)	1 575	4 104,6	46,1
Красноярский край	1 910	2 373,9	26,6
Иркутская область	1 084	1 622,4	18,2
Забайкальский край	791	532,6	6,0
Республика Бурятия	583	266,8	3,0
Республика Тыва	34	10,9	0,1
<i>Всего в Восточной Сибири</i>	<i>5 977</i>	<i>8 911,2</i>	<i>100,0</i>

* Составлена по данным: Авиалесоохрана : офиц. сайт. URL: <https://aviales.ru>.

**Сведения о лесопожарной обстановке в некоторых регионах
Российской Федерации за период с 1 января по 26 августа 2019 г. ***

Регион Российской Федерации	Количество пожаров	Площадь, пройденная огнем	
		тыс. га	%
Восточная Сибирь	5 977	8 911,2	88,4
Другие регионы РФ	6 764	1 172,2	11,6
<i>Всего в РФ</i>	12 741	10 083,4	100,0

* Составлена по данным: Авиалесоохрана : офиц. сайт.

но-Сибирского экономического района: с Красноярским (на западе) и Забайкальским (на востоке) краями, с республиками Саха (на северо-востоке), Бурятия (на юго-востоке и юге) и Тыва (на юго-западе). Общая протяженность границ области превышает 7,2 тыс. км, в том числе по оз. Байкал 520 км.

Территория Иркутской области, как и соседних с ней субъектов РФ, входящих в состав Восточно-Сибирского макрорегиона, характеризуется высокой лесистостью. Лесными насаждениями занято 71,5 млн га (почти 90 % ее территории). Иркутская область

располагает уникальными лесными ресурсами. Здесь сосредоточено около 12 % запасов древесины спелых лесов страны, а доля особо ценных хвойных пород значительна даже в масштабах планеты. В соответствии со статистическими данными по землям, покрытым лесной растительностью, обеспеченность населения Иркутской области выше общероссийского показателя (5,5 га на человека) в 4,8 раза и выше мирового показателя (0,5 га) в 44,0 раза. В целом на долю Иркутской области приходится 2 % мировых запасов древесины.

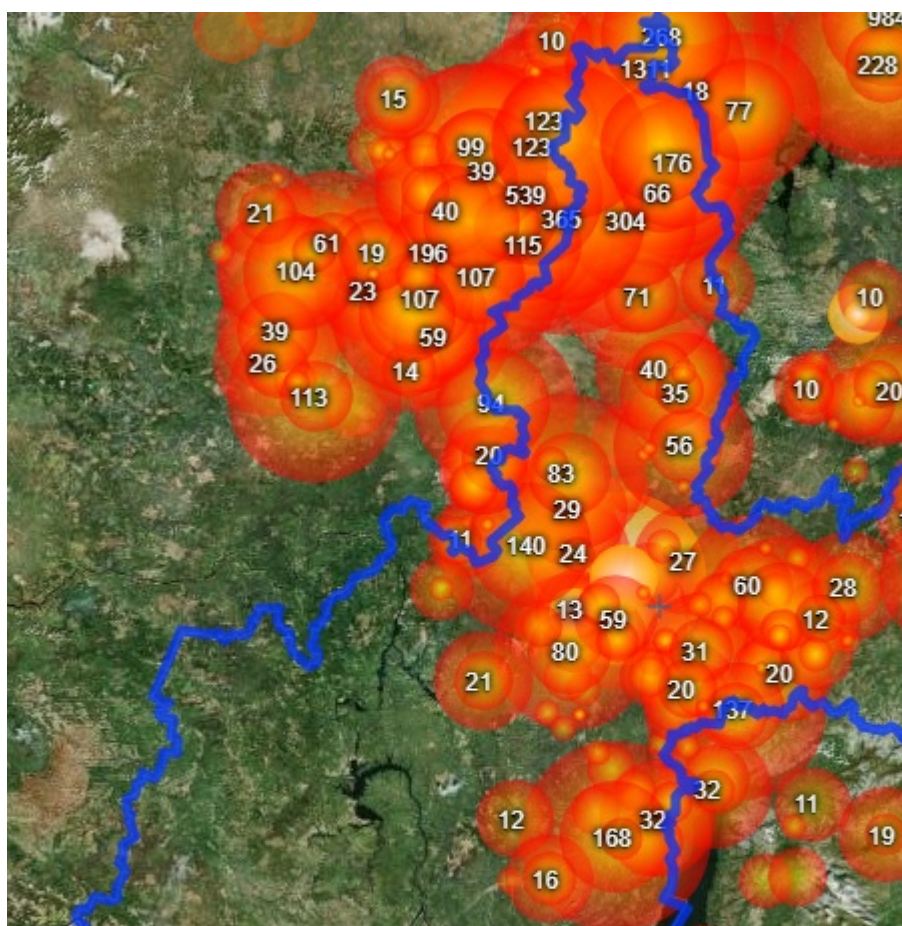


Рис. 1. Очаги лесных пожаров на территории Иркутской области и прилегающих к ней Красноярского и Забайкальского краев, республик Бурятия и Саха (Якутия) по состоянию на 25 июля 2019 г.

За период с 1 января по 26 августа 2019 г. в Иркутской области зарегистрировано более 1 тыс. лесных пожаров¹, общая площадь которых превысила 1 млн га, что сопоставимо с площадью таких стран, как Ямайка (10,9 тыс. км²), Ливан (10,4 тыс. км²), Кипр (9,3 тыс. км²). О масштабах распространения огня в регионе можно судить по данным рис. 1. Совершенно очевидно, что в результате столь значительных пожаров происходят огромные потери природных ресурсов, что, в свою очередь, приводит к экологическим, экономическим и социальным последствиям [1–4]. Так, установлено, что во время интенсивного горения тайги концентрация угарного газа по сравнению с его фоновым содержанием в воздухе повышается почти в 30 раз, метана — в 2 раза, углекислого газа — на 8 % [2], что вызывает ухудшение здоровья жителей Иркутской области [3]. Кроме этого, из-за ежегодных масштабных лесных пожаров, полыхающих рядом с Байкалом, в воду озера попадают химические компоненты (например, аммоний), которые способствуют размножению различных микроорганизмов, разрушающих экосистему Байкала.

Лесной пожар — это стихийное и неконтролируемое распространение огня. Моделирование данного процесса является весьма сложным, что отражено в [5–17] (и этот перечень трудов далеко не полный).

Анализ ведущих зарубежных работ по рассматриваемой проблематике показывает, что все большее количество исследований проводится с применением современных языков программирования, таких как Python, R, Java [10–12]. Эти программные продукты применяются для анализа и визуализации данных, что повышает качество проводимых исследований. Несмотря на достаточное количество программных средств, в отечественных исследованиях они не находят столь широкого распространения, как за рубежом.

В нашей работе используется довольно молодой универсальный язык программирования Julia [18]. Julia — современный популярный высокопроизводительный язык программирования с динамической типизацией для математических вычислений, который применяется для разработки исследовательского программного обеспечения, апробации и тестирования новых методов решения задач. Существенными плюсами данного языка являются простой синтаксис и высокая скорость выполнения программ. Наши исследования проводятся в последней версии, вышедшей в 2018 г.

¹ Авиалесоохрана : офиц. сайт. URL: <https://aviales.ru>.

В вычислительном эксперименте использован пакет IPOPT (Interior Point OPTimizer), предназначенный для численного решения задач оптимизации большого размера.

В работе уделено внимание модели оптимизации доставки и вывода противопожарных сил к месту лесного пожара из [7–9]. После определенных преобразований она может быть записана в виде следующей задачи оптимального управления (P):

$$J = \int_{t_a}^{t_c} (2C_s u_2(t) - \alpha(t)x(t) + \beta(t)) dt + 2C_s x(t_c) \rightarrow \min,$$

$$x = u_1 - u_2, \quad x(t_a) = x_a,$$

$$-m \leq u_1(t) - u_2(t) \leq M,$$

$$u_1(t) \geq 0, \quad u_2(t) \geq 0, \quad 0 \leq x(t) \leq X,$$

$$g(t_c, x(t_c)) = x(t_c) - r(t_c) / E(t_c - t_a) = 0,$$

$$\alpha(t) = C_B E(t - t_a) - C_x \text{ и } \beta(t) = C_T + C_B r(t).$$

Фазовая переменная $x(t)$ обозначает объем противопожарных сил, борющихся с пожаром в момент времени t . Пара управляющих переменных $u_1(t)$ и $u_2(t)$ представляет собой скорости доставки и вывода противопожарных сил к месту пожара и от него соответственно. Траектория $x(\cdot)$ предполагается кусочно-гладкой функцией, а управления $u_1(\cdot)$ и $u_2(\cdot)$ — кусочно-непрерывными.

Дадим содержательную интерпретацию параметров модели:

— t_a и t_c — момент начала активных противопожарных действий и момент локализации пожара (последний, вообще говоря, предполагается нефиксированным);

— $r(t)$ — функция скорости распространения огня (при отсутствии противодействия);

— C_s — параметр, означающий удельные затраты на переброску (увеличение или уменьшение) противопожарных сил (денежных единиц на единицу сил);

— C_T — параметр, характеризующий потери леса при неконтролируемом горении в единицу времени (денежных единиц на единицу времени);

— C_B — затраты на единицу площади леса, поврежденной огнем в итоге пожара (денежных единиц на единицу площади);

— C_x — удельные затраты на сопротивление в силочасах (денежных единиц на единицу сил в единицу времени);

— m — максимальная скорость вывода противопожарных сил из леса (единиц сил на единицу времени);

— M — максимальная скорость доставки противопожарных сил на пожар (единиц сил на единицу времени);

– E — коэффициент эффективности противопожарной борьбы на данном участке (единиц сил на единицу времени);

– x_a — начальный объем противопожарных сил (единиц сил);

– X — максимально допустимый объем привлекаемых противопожарных сил (единиц сил).

Настоящая статья посвящена численному исследованию задачи (P). При этом мы используем так называемый direct approach, т.е. подход к исследованию задач оптимального управления, когда применяется полная дискретизация задачи динамической оптимизации с последующим применением методов и средств математического программирования. Данный подход подвергается критике со стороны специалистов в области оптимального управления, однако зачастую при решении практических задач оптимизации оказывается эффективным.

Дискретный аналог задачи (P) представим в виде задачи (P_d):

$$J = y(t_N) + 2C_s x(t_N) \rightarrow \min,$$

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + h[u_1(t_k) - u_2(t_k)],$$

$$y(t_{k+1}) = y(t_k) + h[2C_s u_2(t_k) - \alpha(t_k)x(t_k) + \beta(t_k)],$$

$$x(t_0) = x_a, y(t_0) = 0,$$

$$-m \leq u_1(t_k) - u_2(t_k) \leq M,$$

$$u_1(t_k) \geq 0, u_2(t_k) \geq 0, 0 \leq x(t_k) \leq X,$$

$$g(t_N, x(t_N)) = x(t_N) - r(t_N) / E(t_N - t_0) = 0,$$

$$\alpha(t) = C_B E(t - t_a) - C_x \text{ и } \beta(t) = C_T + C_B r(t).$$

Здесь в качестве управлений и траекторий понимаются пары последовательностей $(u_1, u_2), (x, y)$:

$$u_1 = \{u_1(t)\}, u_2 = \{u_2(t)\}, t = t_0, t_1, \dots, t_{N-1},$$

$$x = \{x(t)\}, y = \{y(t)\}, t = t_0, t_1, \dots, t_N.$$

Отметим, что y — это несущественная фазовая переменная, введенная для сведения интегрального слагаемого в целевом функционале к терминальному. Поэтому мы не даем ей экономической интерпретации в дальнейшем изложении статьи.

Перейдем к представлению проведенных расчетов. Предложим несколько примеров, каждый из которых сопровождается таблицей с указанием значений параметров задачи. Рисунки устроены следующим образом: на a изображается траекторная компонента x , на b и v — управления u_1 и u_2 соответственно.

Пример 1

Значения параметров задачи

Параметр	t_0	t_N	N	C_s	α	β
Значение	0	100	1 000	10	10	1
Параметр	m	M	E	r	x_0	X
Значение	30	30	1	5	2	1 000

На рис. 2 показывается, что фазовое ограничение на объем задействованных

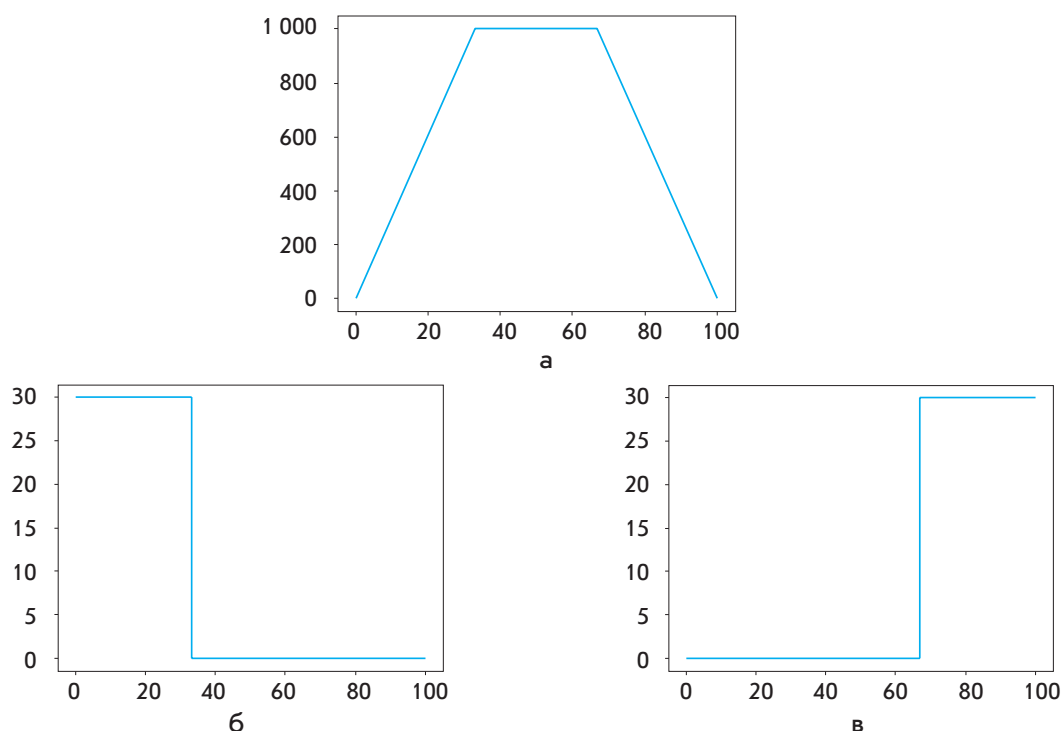


Рис. 2. Оптимальные траектория (а), управление u_1 (б) и управление u_2 (в) для примера 1

противопожарных сил активно: их начальный объем $x_0 = 2$ увеличивается до максимально возможного уровня $X = 1\ 000$ к моменту начала наиболее активной фазы тушения. При этом управления u_1 и u_2 принимают максимальные значения на начальном и финальном этапах соответственно.

Пример 2

Значения параметров задачи

Параметр	t_0	t_N	N	C_s	α	β
Значение	0	24	1 000	50	1	1
Параметр	m	M	E	r	x_0	X
Значение	10	30	1	5	2	100

Найденное решение представлено на рис. 3. Оно характеризуется исключительно выводом противопожарных сил на финальном промежутке времени.

Для локализации пожара достаточно имеющихся на начальном этапе противоборствующих сил в размере $x_0 = 2$.

Далее будем предполагать, что скорость распространения огня увеличивается следующим образом:

$$r(t) = \begin{cases} 1, & t \in [1, 6], \\ 15, & t \in (6, 12]. \end{cases}$$

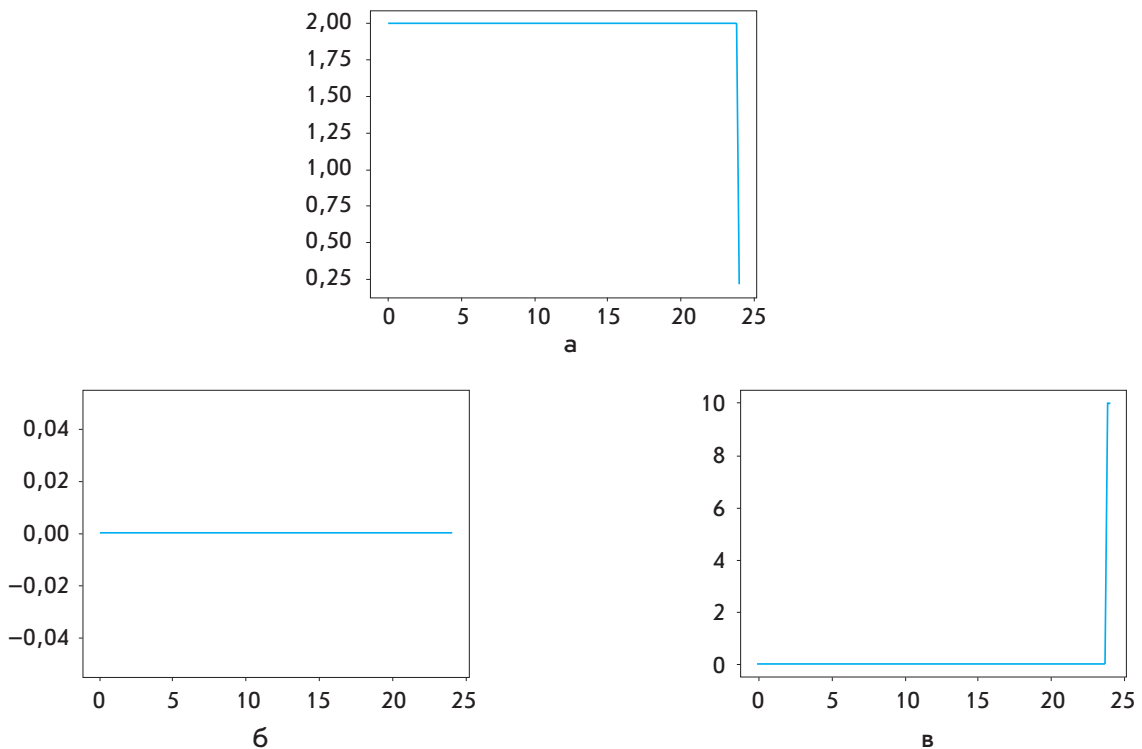


Рис. 3. Оптимальные траектория (а), управление u_1 (б) и управление u_2 (в) для примера 2

Пример 3

Значения параметров задачи

Параметр	t_0	t_N	N	C_s	C_i	C_b
Значение	0	12	300	1	0	0
Параметр	C_x	m	M	E	x_0	X
Значение	0	3	3	1,6	1	100

При коэффициенте эффективности противопожарной борьбы $E = 1,6$ на данном участке объем противоборствующих сил уменьшается с $x_0 = 1$ до определенного уровня, достаточного для локализации пожара в момент времени $t_c = 12$ (рис. 4). Заметим, что всплеск управления u_1 , представленный на графике, фактически близок к нулю. Как и в примере 2, для локализации пожара не потребовалось привлечения дополнительных сил.

Примечательно, что управление u_2 принимает промежуточные значения из допустимого множества $[0, 3]$.

Пример 4

Значения параметров задачи

Параметр	t_0	t_N	N	C_s	C_i	C_b
Значение	0	10	300	1	1	0
Параметр	C_x	m	M	E	x_0	X
Значение	0	3	3	1	0	10

Найденные оптимальные траектория и управления представлены на рис. 5.

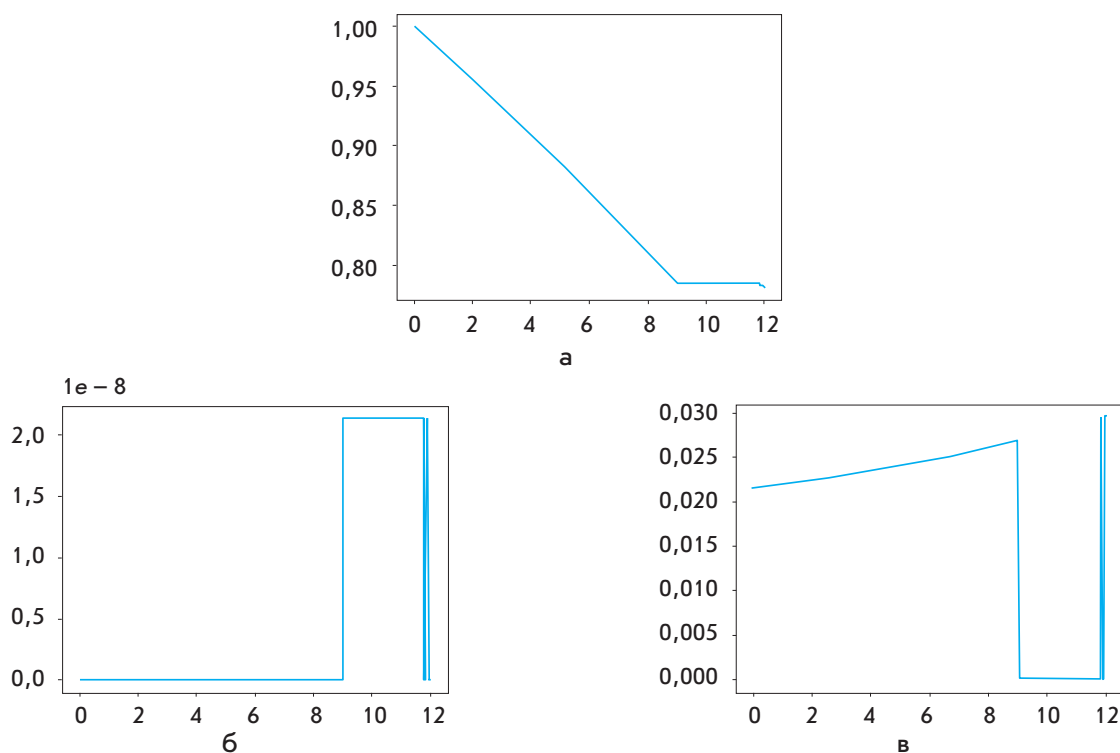


Рис. 4. Оптимальные траектория (а), управление u_1 (б) и управление u_2 (в) для примера 3

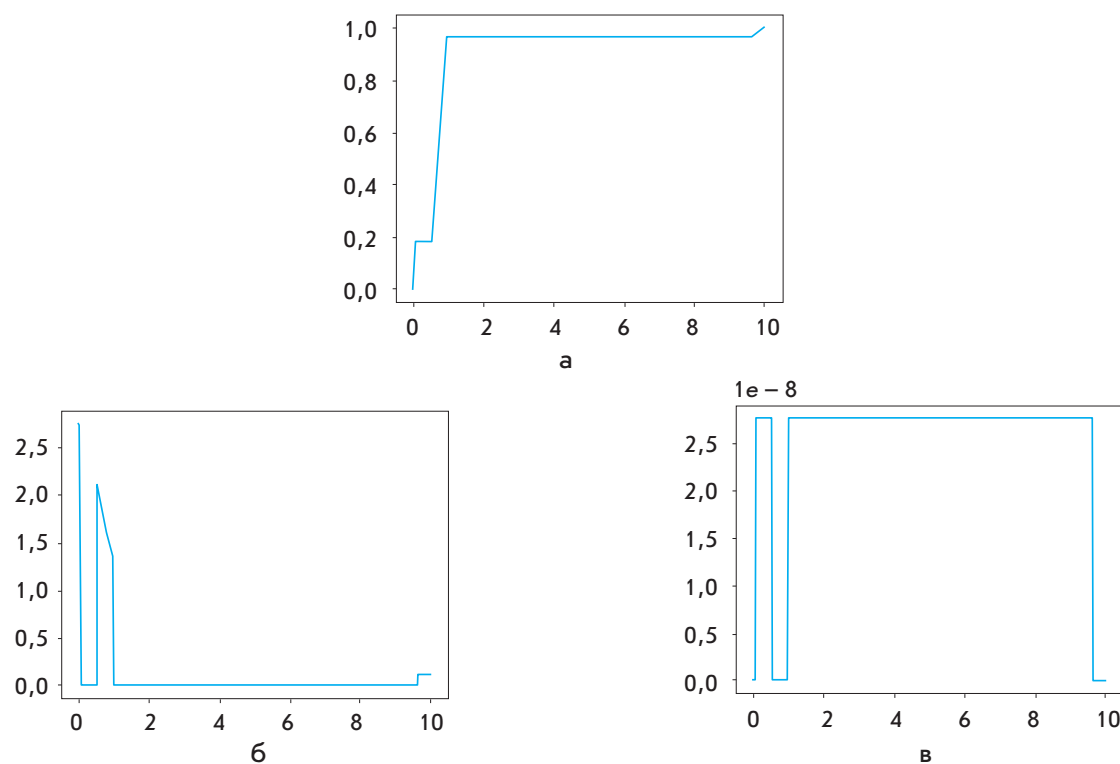


Рис. 5. Оптимальные траектория (а), управление u_1 (б) и управление u_2 (в) для примера 4

Приведенное на рис. 5 решение качественно отличается от оптимальных стратегий в примерах 2 и 3: здесь оптимальное управление предполагает исключительно увеличение противопожарных сил. Примечательно, что их наращивание происходит в три этапа (пер-

вые два — в начале временного интервала, последний — в конце). При этом интенсивность привлечения сил нигде не максимальна. Представленные примеры иллюстрируют различные тактики противопожарной борьбы:

– наискорейшая доставка всех доступных сил с максимально интенсивным их выводом на заключительном этапе;

– непривлечение дополнительных средств, противоборство имеющимися на месте силами с последующим их выводом;

– сдержанное поэтапное увеличение противопожарного контингента.

Указанные тактики находят свое применение в реальности. Так, отсутствие активных противопожарных мероприятий на севере Иркутской области часто объясняется экономической нецелесообразностью (затраты превышают возможный прогнозируемый ущерб, а огонь не угрожает населенным пунктам и объектам экономики).

Современные математические методы и средства на данный момент являются весьма доступными. Конечно, их использование требует определенных навыков и понимания исследуемой области познания. В данной статье проиллюстрировано, как с применением языка программирования Julia можно проводить численные исследования некоторых содержательных математических моделей и поставленных задач оптимизации в них.

Отметим, что в работе представлены первые попытки применения языка Julia для решения актуальной народно-хозяйственной задачи оптимального управления лесными пожарами. Дальнейшие исследования в этом направлении будут связаны с рассмотрением модификаций представленной модели и более усложненных задач оптимизации. Для полноты исследования планируется с использованием регрессионного анализа установить зависимость количества лесных пожаров от факторов (причин), влияющих на их возникновение.

Следует отметить, что в большинстве случаев лесные возгорания происходят в результате антропогенного воздействия, лишь небольшая их доля возникает по естественным причинам (1,5 % от общего числа) [19]. В этой связи особое место в лесном законодательстве занимают охранительные нормы. Например, согласно практике применения уголовного законодательства, в 2014 г. по факту 16 069 лесных пожаров возбуждено 2 400 уголовных дел [20]. К наиболее распространенным составам пре-

ступлений, которые связаны с пожарами, можно отнести умышленное уничтожение (повреждение) чужого имущества, совершаемое путем поджога или иным общеопасным способом (ч. 2 ст. 167 УК РФ), уничтожение или повреждение чужого имущества в крупном размере, совершенные путем неосторожного обращения с огнем или иными источниками повышенной опасности (ст. 168 УК РФ), нарушение правил пожарной безопасности (ст. 219 УК РФ), уничтожение или повреждение лесных насаждений (ст. 261 УК РФ)². И хотя в уголовном законодательстве отсутствует определение термина «пожар», для исследований в области криминологии ученые нередко используют термин «криминальный пожар». Его применение позволяет получить более точное представление о крайне существенной роли человека в нарушении экологической безопасности лесов [19].

Уничтожение и повреждение лесов наносят огромный экологический ущерб как отдельному государству, так и всему мировому сообществу. Эффективное предупреждение и минимизация числа и распространения лесных пожаров невозможны без совершенствования правового и организационного механизмов в сфере обеспечения пожарной безопасности лесных насаждений. Среди мер по предотвращению лесных возгораний большое значение приобретает эффективное правоприменение с достаточными санкциями.

Таким образом, при построении модели борьбы с лесными пожарами следует учитывать то, что данная проблема носит еще и криминальный характер, а значит, требует всестороннего и многопланового исследования. Необходим учет таких антропогенных факторов, как неосторожное обращение с огнем и умышленный поджог, а также детерминантов этих преступлений. С учетом данных показателей возможно построение криминологического прогноза преступности, посягающей на лесную безопасность, и определение ее основных тенденций, что послужит основой для разработки системы программ, решений, новых законодательных актов в сфере охраны лесов от пожаров.

² Уголовный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон РФ от 13 июня 1996 г. № 63-ФЗ // СПС «КонсультантПлюс».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суходолов А.П. Экономическая доступность лесных ресурсов как рентообразующий фактор и основа оценки лесосырьевого потенциала / А.П. Суходолов, А.А. Измestьев // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2012. — № 6. — С. 32–35.
2. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродсодержащих газов от лесных пожаров в Сибири / А.В. Панов, А.С. Прокушкин, А.В. Брюханов [и др.] // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 5. — С. 30–38.

3. Тихонова И.В. Частота хронической патологии верхних дыхательных путей у подростков: роль некоторых факторов / И.В. Тихонова, Н.В. Ефимова // Гигиена и санитария. — 2012. — Т. 91, № 6. — С. 51–53.
4. Иванова Д.А. К вопросу об экологических проблемах лесов Байкальского региона: экономический аспект / Д.А. Иванова. — DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(1).24-31 // Известия Байкальского государственного университета. — 2019. — Т. 29, № 1. — С. 24–31.
5. Доррер Г.А. Концепция системы управления борьбой с природными пожарами / Г.А. Доррер, И.А. Буслов, С.В. Яровой // Сибирский пожарно-спасательный вестник. — 2016. — № 1. — С. 38–44.
6. Коляда А.В. Оптимизация процесса тушения лесного пожара с использованием имитационного моделирования / А.В. Коляда // Ученые записки Российского государственного социального университета. — 2010. — № 8. — С. 89–94.
7. Parks G.M. Development and Application of a Model for Suppression of Forest Fires / G.M. Parks // Management Science. — 1964. — Vol. 10, № 4. — P. 760–766.
8. Parlar M. Optimal Forest Fire Control: an Extension of Park's Model / M. Parlar, R.G. Vicson // Forest Sei. — 1982. — Vol. 28, № 2. — P. 345–355.
9. Parlar M. Optimal Forest Fire Control with Limited Reinforcements / M. Parlar // Optimal Control Applications Methods. — 1983. — Vol. 4. — P. 185–191.
10. Veiga J.R. An Integer Linear Programming Model to Select and Temporally Allocate Resources for Fighting Forest Fires / J.R. Veiga, M.J.G. Villamayor, B.C. Méndez // Forests. — 2018. — Vol. 9, № 583. — P. 2–18.
11. A Study of Evacuation Planning for Wildfires / C. Artigues, E. Hébrard, Y. Pencolé, A. Schutt, P. Stuckey // The Seventeenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation. — Lille, 2018. — P. 1–17.
12. Assignment Problems in Wildfire Suppression: Models for Optimization of Aerial Resource Logistics / J.R. Veiga, I.G. Costa, M.J.G. Villamayor [et al.] // Forest Science. — 2018. — Vol. 64, iss. 5. — P. 504–514.
13. Болданова Е.В. Методические подходы к прогнозированию лесных пожаров в Иркутской области / Е.В. Болданова, Г.В. Давыдова // Активизация интеллектуального и ресурсного потенциала регионов: новые вызовы для менеджмента компаний : материалы 3-й Всерос. конф., Иркутск, 18 мая 2017 г. / под ред. С.В. Чулева, Н.Н. Даниленко. — Иркутск, 2017. — С. 45–51.
14. Пьянова Э.А. Лесные пожары в Забайкалье: численное моделирование / Э.А. Пьянова, А.А. Фалейчик, Л.М. Фалейчик // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : материалы 15-й междунар. науч.-практ. конф. — Чита, 2015. — С. 125–129.
15. Белых О.А. Оценка эффективности инструментов реализации принципов устойчивого управления лесными системами в Восточной Сибири / О.А. Белых, Г.Д. Русецкая // Лесной вестник. Forestry Bulletin. — 2019. — Т. 23, № 1 (131). — С. 5–13.
16. Дицевич Я.Б. Противодействие преступности в сфере лесопользования: проблемы и перспективы / Я.Б. Дицевич, О.А. Белых, Г.Д. Русецкая. — DOI: 10.17150/2500-4255.2017.11(2).308-317 // Всероссийский криминологический журнал. — 2017. — Т. 11, № 2. — С. 308–317.
17. Кулагина И.Ю. Проблемы восстановления лесов в России / И.Ю. Кулагина // Экономическое развитие общества в современных кризисных условиях : материалы междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. — Уфа, 2017. — Ч. 2. — С. 128–131.
18. Шеррингтон М. Осваиваем язык Julia / М. Шеррингтон. — Москва : ДМК Пресс, 2016. — 416 с.
19. Антонченко В.В. Криминальные пожары / В.В. Антонченко // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. — 2015. — № 3 (15). — С. 99–104.
20. Антонченко В.В. Обеспечение пожарной безопасности лесных и иных насаждений: уголовно-правовой аспект / В.В. Антонченко // Экологическое право. — 2018. — № 3. — С. 8–12.

REFERENCES

1. Sukhodolov A.P., Izmet'sev A.A. Economic Accessibility of Forest Resources as Rent-forming Factor and Assessment Basis for Forest Raw Material Potential. *Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy*, 2012, no. 6, pp. 32–35. (In Russian).
2. Panov A.V., Prokushkin A.S., Bryukhanov A.V., Korets M.A., Ponomarev E.I. A Complex Approach for the Estimation of Carbonaceous Emissions from Wildfires in Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorologiya i Gidrologiya*, 2018, no. 5, pp. 30–38. (In Russian).
3. Tikhonova I.V., Efimova N.V. Prevalence of the Chronic Respiratory Tract Pathology in Teenagers: Role of Some Factors. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2012, vol. 91, no. 6, pp. 51–53. (In Russian).
4. Ivanova D.A. On the Issue of Ecological Problems of the Baikal Region Forests: An Economic Aspect. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 24–31. DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(1).24-31. (In Russian).
5. Dorrer G., Buslov I., Yarovoy S. Conception of Managing System for Wild Fire Struggle. *Sibirskii pozharno-spatel'nyi vestnik = Siberian Fire and Rescue Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 38–44. (In Russian).
6. Kolyada A.V. Optimizing Process of Forest Fire Fighting Operations with Use of Simulation Modelling. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo sotsial'nogo universiteta = The Scientific notes of the Russian State Social University*, 2010, no. 8, pp. 89–94. (In Russian).
7. Parks G.M. Development and Application of a Model for Suppression of Forest Fires. *Management Science*, 1964, vol. 10, no. 4, pp. 760–766.
8. Parlar M., Vicson R.G. Optimal Forest Fire Control: an Extension of Park's Model. *Forest Sei*, 1982, vol. 28, no. 2, pp. 345–355.

9. Parlar M. Optimal Forest Fire Control with Limited Reinforcements. *Optimal Control Applications Methods*, 1983, vol. 4, pp. 185–191.
10. Veiga J.R., Villamayor M.J.G., Méndez B.C. An Integer Linear Programming Model to Select and Temporally Allocate Resources for Fighting Forest Fires. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 583, pp. 2–18.
11. Artigues C., Hébrard E., Pencolé Y., Schutt A., Stuckey P. A Study of Evacuation Planning for Wildfires. *The Seventeenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation*. Lille, 2018, pp. 1–17.
12. Veiga J.R., Costa I.G., Villamayor M.J.G., Méndez B.C., Díaz J.L.S. Assignment Problems in Wildfire Suppression: Models for Optimization of Aerial Resource Logistics. *Forest Science*, 2018, vol. 64, iss. 5, pp. 504–514.
13. Boldanova E.V., Davydova G.V. Methodological Approaches to Forecasting Forest Fires in Irkutsk Oblast. In Chuprov S.V., Danilenko N.N. (eds.). *Aktivizatsiya intellektual'nogo i resursnogo potentsiala regionov: novye vyzovy dlya menedzhmenta kompanii. Materialy 3-i Vserossiiskoi konferentsii. Irkutsk, 18 maya 2017 g.* [Activating Intellectual and Resource Potential of the Regions: New Challenges for Company Managers. Materials of the 3rd All-Russian Research Conference. Irkutsk, May 18, 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 45–51. (In Russian).
14. Pyanova E.A., Faleichik A.A., Faleichik L.M. Forest Fires in Zabaikalye: Numerical Investigation. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov. Materialy 15-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Kulaginsky Readings: Technique and Technologies of Productions. Materials of the 15th International Scientific and Practical Conference]. Chita, 2015, pp. 125–129. (In Russian).
15. Belykh O.A., Rusetskaya G.D. Instruments Effectiveness Assessment to Implement Sustainable Management Principles of Forest Systems in Eastern Siberia. *Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1 (131), pp. 5–13. (In Russian).
16. Ditsevich J.B., Belykh O.A., Rusetskaya G.D. Counteracting crimes in the sphere of forest resources' use: problems and perspectives. *Vserossiiskii kriminologicheskii zhurnal = Russian Journal of Criminology*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 308–317. DOI: 10.17150/2500-4255.2017.11(2).308-317. (In Russian).
17. Kulagina I.Ju. Problems of Forest Restoration in Russia. *Ekonomicheskoe razvitie obshchestva v sovremennykh krizisnykh usloviyakh. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Economic Development of Society in Present-Day Crisis Terms. Materials of International Research Conference]. Ufa, 2017, pt. 2, pp. 128–134. (In Russian).
18. Sherrington M. *Mastering Julia*. Packt Publishing, 2015. 410 p. (Russ. ed. Sherrington M. *Osvaivaem yazyk Julia*. Moscow, DMK Press Publ., 2016. 416 p.).
19. Antonchenko V.V. Criminal Fires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii = Bulletin of Saint Petersburg University of SFS of MES of Russia*, 2015, no. 3 (15), pp. 99–104. (In Russian).
20. Antonchenko V.V. Maintenance of Fire Safety of Forests and Other Plantations: a Criminal Law Aspect. *Ekologicheskoe pravo = Environmental Law*, 2018, no. 3, pp. 8–12. (In Russian).

Информация об авторах

Суходолов Александр Петрович — профессор, Байкальский государственный университет, заведующий лабораторией междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: science@bgu.ru.

Сорокина Полина Геннадьевна — старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Байкальский государственный университет, младший научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ermolaeva_polina@mail.ru.

Лебедева Алина Витальевна — руководитель Школы молодых ученых, студент, Институт государства и права, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: alinal2020@mail.ru.

Для цитирования

Суходолов А.П. Математическая модель борьбы с лесными пожарами в Восточной Сибири (на примере Иркутской области): вычислительные эксперименты в среде Julia / А.П. Суходолов, П.Г. Сорокина, А.В. Лебедева // Известия Байкальского государственного университета. — 2019. — Т. 29, № 3. — С. 349–358. — DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(3).349-358.

Authors

Alexander P. Sukhodolov — Professor, Baikal State University, Head of the Laboratory of Interdisciplinary Ecological and Economic Research and Technology, Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: science@bgu.ru.

Polina G. Sorokina — Senior Lecturer, Department of Mathematics and Computer Science, Baikal State University, Junior Researcher, Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: ermolaeva_polina@mail.ru.

Alina V. Lebedeva — Head of School of Young Scientists, Student, Institute of State and Law, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: alinal2020@mail.ru.

For Citation

Sukhodolov A.P., Sorokina P.G., Lebedeva A.V. Mathematical Model of Fight Against Forest Fires in Terms of Irkutsk Oblast: Computational Experiments in Terms of the Julia Language. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 349–358. DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(3).349-358. (In Russian).