

Ю. И. Кузьменко, Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. Н. Пискун, Л. В. Гавловская

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

ГИС-подход к решению задачи прогнозирования развития природных пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения на основе модели Ротермела

Ключевые слова:

топливные модели, геоинформационное обеспечение, распространение пожара, моделирование.

Представлены результаты использования программного обеспечения (ПО) на базе геоинформационной системы с открытым кодом GRASS GIS 7.6 и алгоритма расчета скорости распространения пожара на основе кода Эндрюса, реализованного в системе BEHAVE PLUS. Для реализации ПО на тестовой территории Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) было создано специализированное геоинформационное обеспечение, включающее актуальные карты растительного покрова ЧЗО, идентифицированного в типах топливных моделей (fuel models), карты радиоактивного загрязнения почвы ЧЗО, морфометрических характеристик местности и метеорологических условий. На основе тестовых расчетов получены выходные карты распространения пожара за различные временные промежутки и карты суммарных запасов ^{137}Cs в периметре пожара, являющихся входной информацией для дальнейшего моделирования выбросов в атмосферу и переноса радиоактивного аэрозоля во время пожара на близлежащие территории.

Введение

Проблема лесных пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения (ЧЗО) является актуальной, поскольку они ежегодно уничтожают и повреждают растительность на радиоактивно загрязненных территориях, вызывая подъем и перенос радиоактивного аэрозоля на значимые расстояния. Это оказывает влияние на экологическое состояние окружающей среды, включая населенные пункты. Зарубежный и отечественный опыт показывает успешное использование специализированного программного обеспечения (ПО) для прогноза поведения и распространения природных пожаров на основе полуэмпирической модели Ротермела [1] с учетом пространственного распределения комплексов растительных горючих материалов и локальных природно-географических условий.

Природные пожары в ЧЗО и прилегающих территориях являются важным фактором перераспределения радионуклидов путем атмосферного переноса в результате подъема радиоактивного аэрозоля и последующего осаждения на большом расстоянии от места пожара. Развитие пожара, как правило, происходит в неоднородной среде, представленной различными видами подстилающей поверхности и множеством типов природных горючих материалов с различными свойствами. Успешное прогнозирование динамики развития пожаров зависит от актуальности картографических данных, получаемых с помощью данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) о состоянии растительного покрова и распределении комплексов растительных горючих материалов (РГМ) по территории ЧЗО. Многие факторы влияют на поведение пожара в окружающей природе. Основные факторы: топливо (геометриче-

© Ю. И. Кузьменко, Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. Н. Пискун, Л. В. Гавловская, 2020

ская форма, влагосодержание РГМ), погода (влагосодержание воздуха, количество осадков, скорость и направление ветра), топография местности (уклон и экспозиция) и близость населенных пунктов определяют поведение и масштабность пожаров. Актуальность и непрерывность в пространстве получения природных характеристик (морфометрических характеристик местности, типов подстилающей поверхности и растительного покрова) обеспечивается использованием геоинформационных систем (ГИС) и современных данных ДЗЗ с пространственным разрешением до 30 м.

В настоящее время существует большое число моделей (теоретических, статистических, полуэмпирических) развития природных пожаров, детально описывающих различные процессы горения и распространения огня [1–6]. Такие модели направлены на максимально точное описание различных процессов, влияющих на динамику пожара. Однако их использование связано с необходимостью точного знания большого количества характеристик, описывающих состояние среды и условий распространения пожара [7, 8].

Состояние вопроса и актуальность проблемы

Ежегодно в ЧЗО возникают десятки лесных пожаров, в результате которых сгорает, повреждается, а затем и гибнет большое количество леса. Ущерб от лесных пожаров на радиоактивно загрязненной территории не ограничивается только стоимостью уничтоженной древесины. Сгоревшие радиоактивно загрязненные растительные материалы (сухие деревья, подрост, вырубка, подстилка и т. д.) остаются на земле в виде пепла и переносятся как во время пожара, так и после на дальние или близкие расстояния в зависимости от ветрового режима в пограничном слое атмосферы. Природные пожары представляют собой опасные стихийные бедствия, приносящие огромный ущерб и создающие угрозу для людей и материальных ресурсов, находящихся вблизи районов их возникновения и развития. Оценки распространения фронта пожара в условиях неоднородного распределения запасов лесных и травяных горючих материалов, наличия препятствий для распространения огня (дороги, лесные просеки, водные объекты и т. д.) и воздействия ветра в зоне пожара проводятся с использованием моделей распространения пожаров и топливных моделей (fuel models). Выходные данные этих моделей используются в модели атмосферного переноса

и осаждения радиоактивных веществ и продуктов горения на подстилающую поверхность. Задачей данной работы было найти и адаптировать для условий ЧЗО свободно распространяемую компьютерную прогнозную модель для пространственно-временного моделирования распространения пожаров, которая бы позволила прогнозировать развитие и динамику пожаров как источник переноса и вторичного радиационного загрязнения. В процессе решения этой задачи были проанализированы ряд моделей и практических подходов, подробное описание которых можно найти в [4–6]. В результате был выбран вариант, основанный на наиболее известной в мире и наиболее проверенной натурными данными модели Ротермела [9, 10], которая успешно используется уже много лет в Национальной системе оценки пожарной опасности США NFDRS (National Fire Danger Rating System) и ее системе прогнозирования BEHAVE PLUS и FlamMap [10–12].

Краткая характеристика исследуемой территории ЧЗО

Территория исследования площадью 8 300 км² расположена в пределах физико-географической области Киевского Полесья, в поймах рек Припять, Уж, Тетерев. Рельеф территории характеризуется общим уклоном в восточном направлении с преобладающими высотами 115–145 м над уровнем моря и максимальным повышением до 170 м в северо-западной и юго-западной частях. На востоке расположены верховья Киевского водохранилища р. Днепр. В пойме р. Уж была расположена сеть мелиоративных каналов, которая в последние годы находится в нерабочем состоянии, что приводит к заболачиванию местности. В течение последних 30 лет произошли изменения в состоянии растительного покрова на нежилых и необрабатываемых сельскохозяйственных территориях.

Одним из опасных антропогенных факторов воздействия на природную среду ЧЗО являются лесные пожары, которые приносят краткосрочные изменения в экологическую ситуацию на территории ЧЗО и за ее пределами в зависимости от мощности и продолжительности пожаров и степени радиоактивного загрязнения леса, травянистой растительности, лесной подстилки и почвы. Оценим рассмотренные данные за прошедшие годы (1993–2010), наиболее обеспеченные информацией о происходящих пожарах в ЧЗО. За этот период произошло около 800 случаев пожаров с разной площадью возгорания.

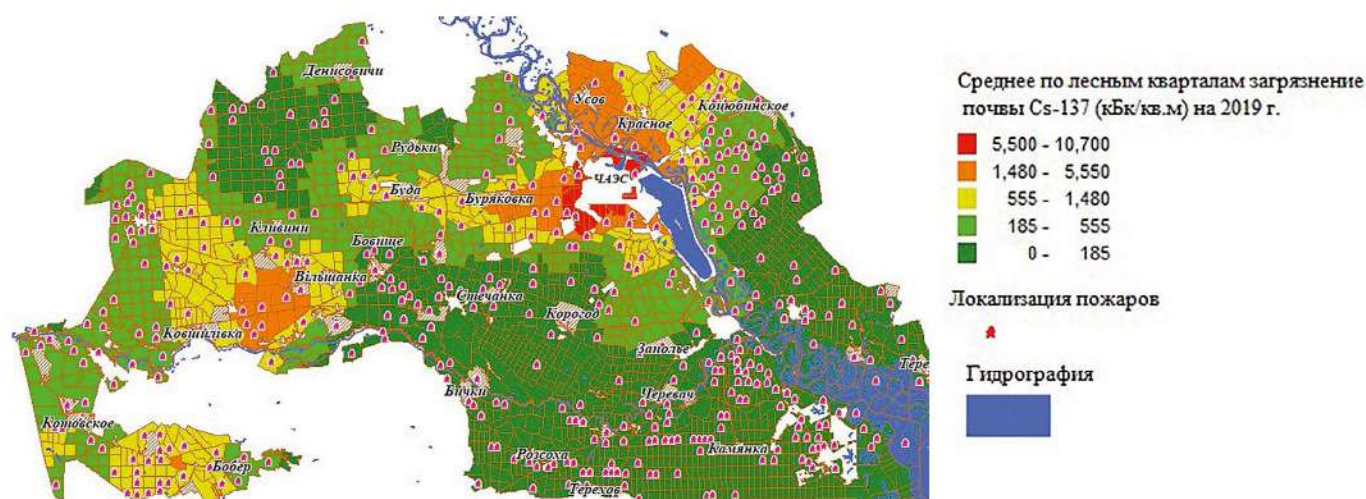


Рис. 1. Пространственное распределение загрязнения почвы ^{137}Cs под лесом на 2019 г. и локализация пожаров за период 1993–2010 гг.

На рис. 1 представлена картосхема с локализацией пожаров по территории ЧЗО и уровнями загрязнения почвы на лесных территориях, рассчитанными на 2019 г. и усредненными в пределах лесных кварталов [13–16]. Для данного периода (1993–2010) наиболее мощные пожары происходили на брошенных землях с травяной растительностью и разрушенными зданиями. В последнее время, в апреле и августе 2015 г., произошли особо крупные пожары на территории ЧЗО. В течение 26–30 апреля 2015 г. в зоне отчуждения вследствие несвоевременного реагирования возник пожар особо крупных размеров площадью до 10 000 га. Значительная площадь лесов была полностью уничтожена верховыми пожарами. Крупные пожары наблюдались 28 июля и 14–20 августа 2015 г. площадью до 5400 га¹.

За рассмотренный период (1993–2010) количество пожаров произошло вне зависимости от погодных условий. Это подтверждается и динамикой годовой суммы осадков за период 1956–2019 г. в г. Чернобыль (данные с сайта <http://www.pogodaiklimat.ru>), представленной на рис. 2.

Заметим, что кривая сумм осадков за год колеблется около среднего значения, равного 611 мм/год со стандартной ошибкой 27 мм. За рассматриваемый период с пожарами с 1993 по 2010 г. экстремальных случаев (минимальный или максимальный экстремум), за исключением 1970 г., не наблюдалось. За последние четыре года намечен тренд на уменьшение годовой суммы осадков (с 773 в 2016 г. до 373 мм/год в 2019 г.).

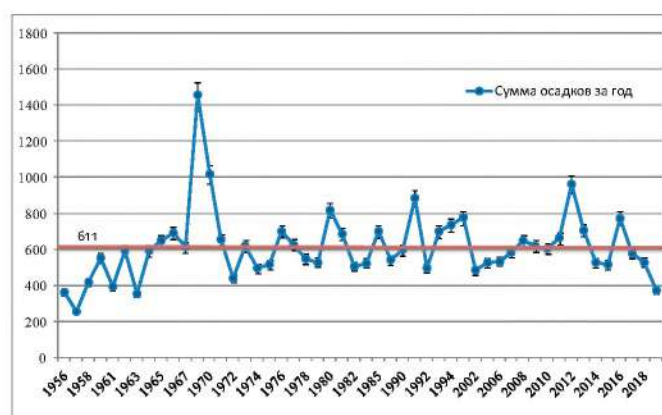


Рис. 2. Динамика суммы осадков (мм/год) по г. Чернобыль за период с 1956 по 2019 гг.

На основании данных Атласа радиоактивного загрязнения территории Украины [13] и опубликованной пространственной базы данных радиоактивного загрязнения 60-км зоны вокруг Чернобыльской АЭС [14] представим краткую характеристику территории исследования степени радиоактивного загрязнения по состоянию на 2019 г. Дополнительно использовались данные, полученные в рамках проекта «Дозиметрическая паспортизация населенных пунктов Украины» [18]. Так, на рис. 3 представлены данные о пространственном распределении загрязнения почвы ^{137}Cs и ^{90}Sr и о суммарных площадях (%) зон радиоактивного загрязнения по территории исследования.

По состоянию на 2019 г. загрязнение почвы ^{137}Cs с градацией выше 555 kBq/m² составляет 22% от всей

¹ <http://chornobyl.in.ua/pozar-chernobyl-2015.html>

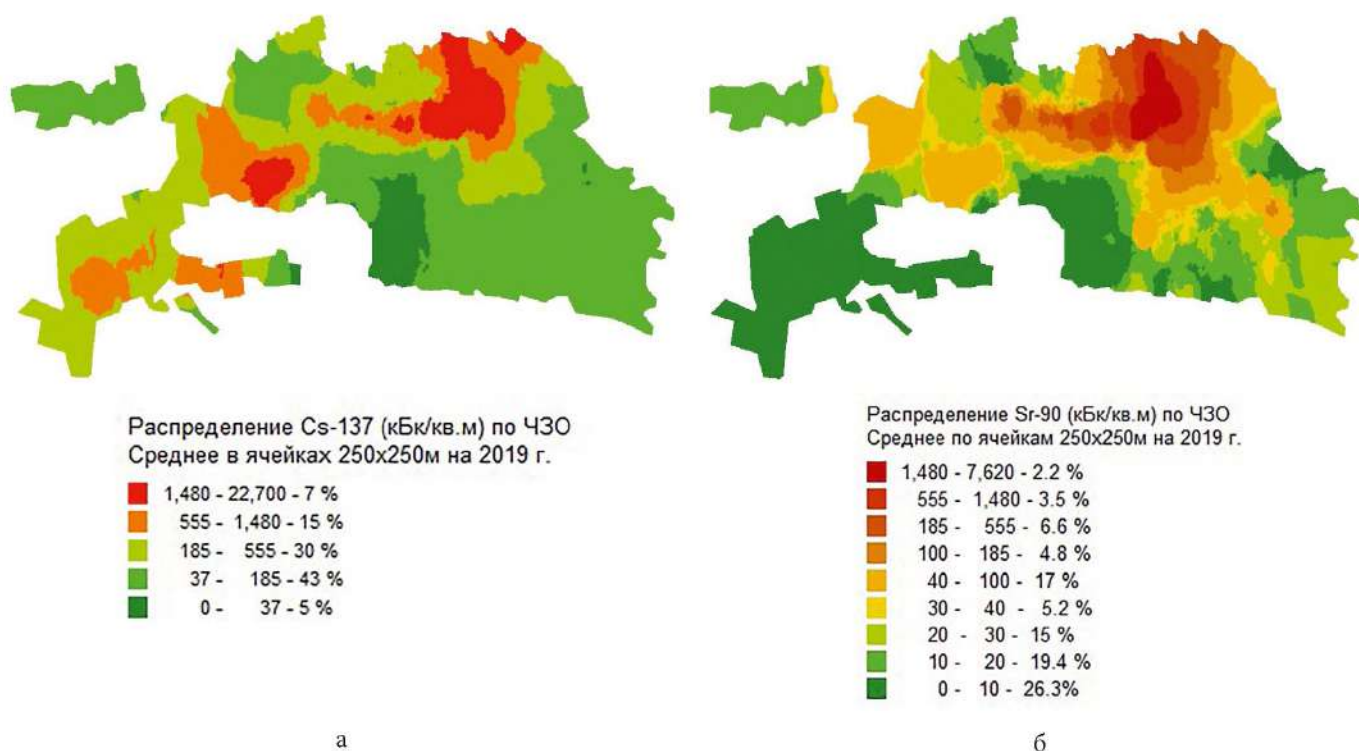


Рис. 3. Пространственное распределение загрязнения почвы ¹³⁷Cs (а) и ⁹⁰Sr (б) по территории исследования

территории исследования ЧЗО, а загрязнение ⁹⁰Sr — около 6% территории ЧЗО.

Лесные пожары, происходящие в зоне отчуждения, влияют на экологическую ситуацию и приводят к разрушению растительного покрова территории и оголению почвы, что способствует подъему и переносу радиоактивной пыли на дальние расстояния.

Растительный покров ЧЗО является типичным для Полесской зоны. В настоящее время основными природными комплексами зоны отчуждения являются хвойные, лиственные и смешанные леса, суходольные и переувлажненные луга, биоценозы болот и водно-болотных угодий. К техногенно нарушенным территориям относятся залежи, территории отселенных населенных пунктов, участки предприятий, которые относятся к основному и вспомогательному циклам производства ЧЗО. В связи с этим подстилающая поверхность зоны имеет довольно пеструю структуру. Согласно материалам лесоустройства 2017 г. [16], территория, покрытая древесной растительностью, составляет 65%, а 35% территории отнесены к непокрытым лесной растительностью землям. Анализ породного состава лесного покрова зоны по данным обследований 2017 г. свидетельствует, что 39% лесов составляют хвойные и 26% лиственные породы.

Решение задачи прогнозирования распространения природных пожаров в ЧЗО на основе модели Ротермела

Для вычислений скорости распространения огня и моделирования распространения пожаров по территории ЧЗО была применена наиболее распространенная на сегодняшний день полуэмпирическая модель поверхностных пожаров, созданная Ротермелом [1, 9]. Программная реализация модели была выполнена Xu (1994) [19] и представлена в виде двух модулей «r.gros» и «r.spread» в геоинформационной системе с открытым кодом GRASS GIS. Вычисления скорости распространения огня базируются на модели BEHAVE [2], разработанной и действующей в NFDRS — Национальной системе оценки пожарной опасности США. Входными данными являются модель топлива, влажность топлива, скорость и направление ветра, уклон и аспект местности. Скорость распространения вычисляется с помощью уравнения

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_W + \Phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

где R — скорость распространения, м/с; I_R — интенсивность реакции, кВт/м (скорость выделения энергии на единицу площади фронта пожара); ξ — коэффици-

ент распространения теплового потока (доля интенсивности реакции, затраченная на нагрев соседних частиц топлива до воспламенения без учета ветра); Φ_w — коэффициент ветра (безразмерный множитель, учитывающий влияние ветра на увеличение коэффициента распространения теплового потока); Φ_s — коэффициент уклона (безразмерный множитель, учитывающий влияние уклона местности на коэффициент распространения теплового потока); ρ_b — объемная плотность топливного слоя, кг/м³; ϵ — эффективное число нагрева (доля топливной частицы, которая нагревается до температуры воспламенения в момент возгорания); Q_{ig} — количество тепла необходимого для нагрева 1 кг топливного слоя до возгорания, кДж/кг.

Детальное описание основной математической модели и объяснения входных данных содержится в работе [1].

Модуль распространения «t.spread» использует принцип Гюйгенса для имитации эллиптически анизотропного распространения, где каждая точка кромки пожара рассматривается в качестве независимого потенциального источника распространения, и это локальное распространение является эллипсоидальным [20]. Размеры и ориентация эллипсов меняются от одной ячейки раstra к другой под действием различных факторов влияния. Локальные направления ветра и уклона определяют ориентацию осей эллипсов. Модуль «t.spread» использует специфическую реализацию алгоритма кратчайшего пути.

Анализ опубликованных материалов свидетельствует о многообразии используемых моделей распространения пожаров как со стандартными, так и пользовательскими характеристиками.

Структура процедур, состав используемой информации и модель расчета с выходными данными представлены на рис. 4. На схеме отображена последовательность действий, включающая:

- подготовку исходной информации (картографической, метеорологической);
- идентификацию (параметризацию) в параметрах и кодах топливных моделей;
- корректировку метеорологических параметров и влажности топлива в соответствии с особенностями местных условий (рельеф, угол склона, аспект и т. д.);
- расчеты по модели развития распространения пожаров с выходными данными о скорости распространения, площади пожара и расстоянии распространения и т. д.

Для топливных моделей, включающих вид топлива (травяная, лесная или смешанная раститель-

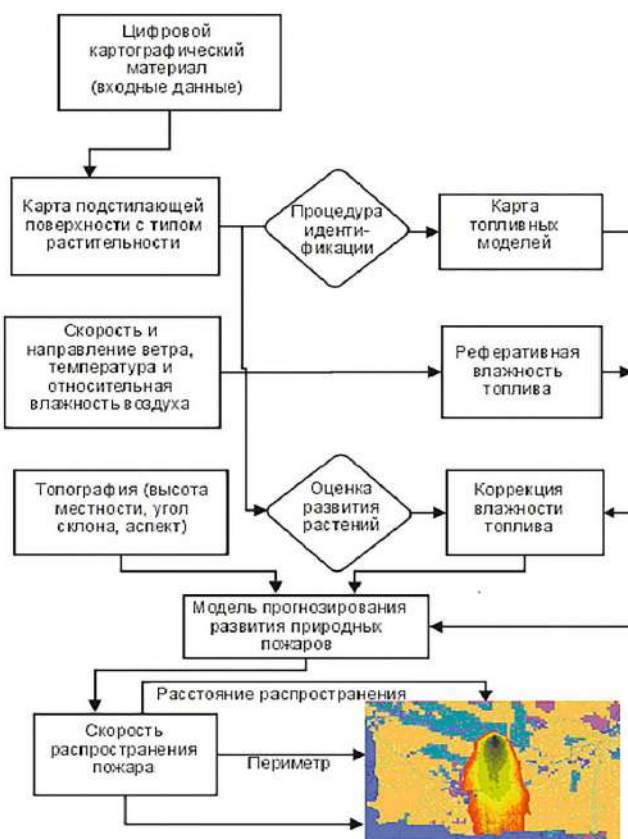


Рис. 4. Информационно-функциональная схема реализации модели распространения природных пожаров

ность) и состояние влагосодержания топлива, готовится картографическая информация (растровые данные) с атрибутивными данными для расчета основных параметров, необходимых для расчетов по стандартной топливной модели Ротермела [9, 21, 22]. Создание специализированного геоинформационного обеспечения состоит из подготовки двух видов информации [23, 24]:

- картографической (тип подстилающей поверхности с видами растительного покрова в кодах топливных моделей, вида и состояния влажности топлива, высот местности, барьеров, загрязнения почвы, углов склонов местности, аспектов и др.) в растровом виде;
- метеорологической (скорости и направления ветра на высотах горения, температуры и влажности воздуха и т. д.) в виде растровых карт.

Характеристика топливных моделей

Для удобства моделирования и формализации характеристик растительных горючих материалов (топливных слоев) принято использовать топливные

**Таблица 1. Классификация топливных моделей
с распределением характеристик РГМ (Albini, 1976)**

Номер топливной модели	Тип топлива	Параметры топлива					
		Запас топлива т/га				Высота подстилки, м	Влажность прекращения горения мертвого топлива, %
		1 ч	10 ч	100 ч	Живое топливо		
Преобладающие травы							
1	Короткая трава (30 см)	1,83	0,00	0,00	0,00	0,305	12
2	Лесоматериал (трава и подвой)	4,94	2,47	1,24	1,24	0,305	15
3	Высокая трава (76 см)	7,41	0,00	0,00	0,00	0,762	25
Чапарель² и кустарник							
4	Чапарель (18 см)	12,37	9,90	4,94	12,37	1,829	20
5	Кусты (61 см)	2,47	1,24	0,00	4,94	0,61	20
6	Низкий кустарник, вырубка твердой древесины	3,71	6,18	4,94	0,00	0,762	25
7	Вечнозеленые кустарники пальмето ³ и подлесок	2,79	4,62	3,71	0,91	0,762	40
Лесной опад							
8	Опад хвои густых древостоев	3,71	2,47	6,18	0,00	0,061	30
9	Опад лиственных пород	7,21	101,27	0,37	0,00	0,061	25
10	Подстилка и подлесок	7,41	4,94	12,37	4,94	0,305	25
Порубочные остатки							
11	Легкие	3,71	11,14	13,61	0,00	0,305	15
12	Средние	9,90	34,65	40,83	0,00	0,701	20
13	Тяжелые	17,31	56,91	69,28	0,00	0,914	25

модели. Модель топлива — это набор параметров, характеризующих топливный слой и необходимых для конкретной модели поведения пожара или модели оценки последствия пожара. Albini [7] и Anderson [8] описали 13 классов топлива (табл. 1), которые отличаются нагрузкой топлива и распределением по классам размеров частиц топлива. Топливо было классифи-

цировано на четыре пирологические группы: травы, кусты, лесной опад и порубочные остатки. Различия в поведении пожаров среди этих групп в основном связаны с нагрузкой топлива и его распределением по классам размеров частиц топлива.

В качестве «полного набора данных для математической модели распространения огня» для

² Чапарель — заросли кустарникового дуба (тип жестколистной кустарниковой растительности).

³ Пальмето — пальма пила, ползучая пальма, встречается в кустарниковых зарослях, как подлесок в сосновых лесах.

Таблица 2. Характеристика классов топлива в классификации РГМ

Классы по реакции на изменение погодных условий	Временной лаг (timelag)	Описание топлива
Сухие РГМ (dead fuel)		
1 класс (1-hour time lag fuel)	1 ч (0...2 ч)	Сухие травянистые растения, хвоя и сухие тонкие ветви диаметром до 6* мм
2 класс (10-hour time lag fuel)	10 ч (2...20 ч)	Обычно это опавшие ветки диаметром от 6 до 25 мм
3 класс (100-hour time lag fuel)	100 ч (20...200 ч)	Ветви или порубочные остатки диаметром от 26 до 75 мм
4 класс (1 000-hour time lag fuel)	1 000 ч (200...2000 ч)	Ветви диаметром от 76 до 200 мм
Живые РГМ (live fuel)		
1 класс «тонкое топливо» (fine fuel)	1 ч (0...2 ч)	Сухие травянистые растения и вегетирующие травы до 6 мм. Этот класс является основным проводником горения в американских топливных моделях
2 класс — хвоя, листья и ветви	10 ч (2...20 ч)	Слой подстилки глубиной от 6 до 25 мм
3 класс	100 ч (20...200 ч)	Слой подстилки глубиной от 25 до 100 мм
4 класс**	1 000 ч (200...2 000 ч)	Слои подстилки, торфа, перегноя глубиной от 100 до 300 мм

* Согласно данным обследования пожарищ топливный материал диаметром 6 мм — это верхняя граница диаметра живых древесных материалов, которые полностью сгорают при лесном пожаре.

** 4 класс не используется моделями распространения поверхностных пожаров.

13 моделей топлива определен набор числовых значений. Он описывает тип топлива, определяемого размером диаметра частиц топлива, соотношением поверхности и объема для каждого класса размеров, глубиной слоя топлива, теплоемкостью топлива, влажностью прекращения горения. Скорость изменения содержания влаги топлива зависит от диаметра древесной топливной частицы и степени изменения условий окружающей среды. Исторически диаметры древесных топливных частиц классифицируются в соответствии с задержкой во времени потерь влажности в результате изменения условий окружающей среды — временным лагом. Под временным лагом понимают период времени, в течение которого происходит потеря двух третей (63 %) количества воды, необходимого для перехода к новому равновесному содержанию влаги при изменении условий окружающей среды. Топливо большего диаметра обычно имеет больший временной лаг, что означает, что оно медленнее реагирует на изменения среды. Категории

временного запаздывания, традиционно используемые для оценки поведения пожаров и пожарной опасности, определены в табл. 2. В NFDRS все РГМ делятся на две категории [11]: отмершие-сухие (dead fuel) и живые (live fuel). Живые растения обычно способны поддерживать свой высокий уровень влагосодержания, в то время как содержание влаги «сухих» РГМ зависит от процессов их увлажнения и высыхания под воздействием погодных условий.

Информационное обеспечение готовилось в тестовом варианте для 13 стандартных топливных моделей, представленных в табл. 1. Была выбрана небольшая тестовая территория площадью около 500 км², расположенная на юге ЧЗО (рис. 5). Для этой территории в соответствии с характеристиками растительного покрова были выбраны 4 модели (№ 1–3, 10) из табл. 1.

Ниже приведено описание создания тематических картографических слоев тестовой территории для параметризации топливных моделей.

Геоинформационное обеспечение идентификации топливных моделей для тестовой территории

В соответствии с требованиями ПО GRASS GIS подготавливались отдельные растровые картографические слои, включающие следующую информацию:

типы подстилающей поверхности (травянистой, лесной растительности и разрушенных деревянных зданий), идентифицированные в кодах топливных моделей;

рельеф и его морфометрические характеристики — угол склона, аспект (направление уклонов);

барьеры и точки локализации пожаров;

загрязнение почвы ^{137}Cs ;

влажность живого топлива;

скорость и направление ветра.

Карта подстилающей поверхности готовилась с использованием данных космических снимков (Landsat 7) [25] и включала 22 типа подстилающей поверхности, объединенные в 8 групп, представленных на рис. 5.

Оригинальное картографическое покрытие (с полигональной топологией) было пересечено с сеткой 250×250 м (тестовый участок) и данные идентифицированы соответственно 13 классам стандартной модели Ротермела:

Класс 1 — Shortgrass (1 фут — 0,305 м) — низкая трава.

Класс 2 — Timber (grass and understory) — трава и кустарники, не достигающие уровня кроны основных древесных пород леса.

Класс 3 — Tallgrass (2,5 фут — 0,76 м) — высокая трава.

Класс 10 — Timber (litter and understory) — лесная растительность.

Карта барьеров в виде дорог, рек и отдельных лесных просек (см. рис. 6, а) была создана с использованием растровой привязанной топографической карты М 1 : 100 000 и карты лесоустройства по состоянию на 2017 г. [16].

Карты высот местности, места локализации пожаров с барьерами для тестового участка, загрязнения почвы ^{137}Cs , влажности живого топлива в соответствии с классом топливной модели представлены на рис. 6.

Полученные карты «regular grids»⁴ с шагом 250 м в форматах MapInfo были переведены в растровый формат и переданы в GRASS GIS для дальнейшего препроцессирования. Реализация модулей «r.ros» и «r.spread» в системе GRASS требует высокоточных карт высот местности. Поэтому специальными инструментами GRASS GIS с использованием глобального набора цифровой модели местности ALOSWorld3D (AW3D) Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) с шагом сетки 30 м [26] подготовлена цифровая информация для выделенной тестовой территории. Данные были

⁴ Регулярная сеть с равномерным шагом сетки по горизонтали.

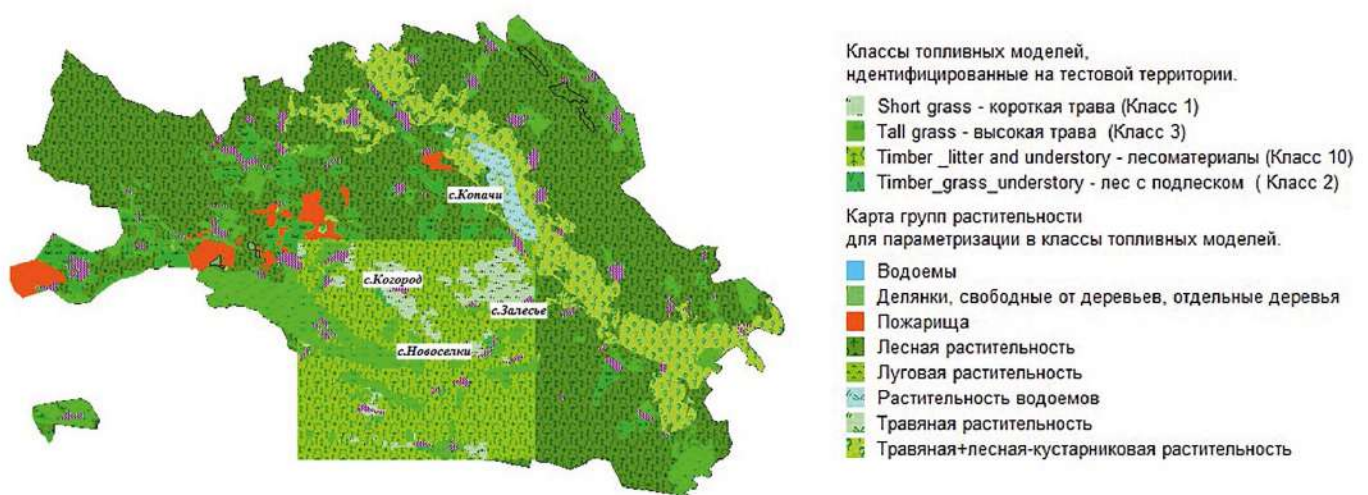


Рис. 5. Типы подстилающей поверхности, полученные с использованием данных ДДЗ для ЧЗО, и классы топливных моделей для тестовой территории

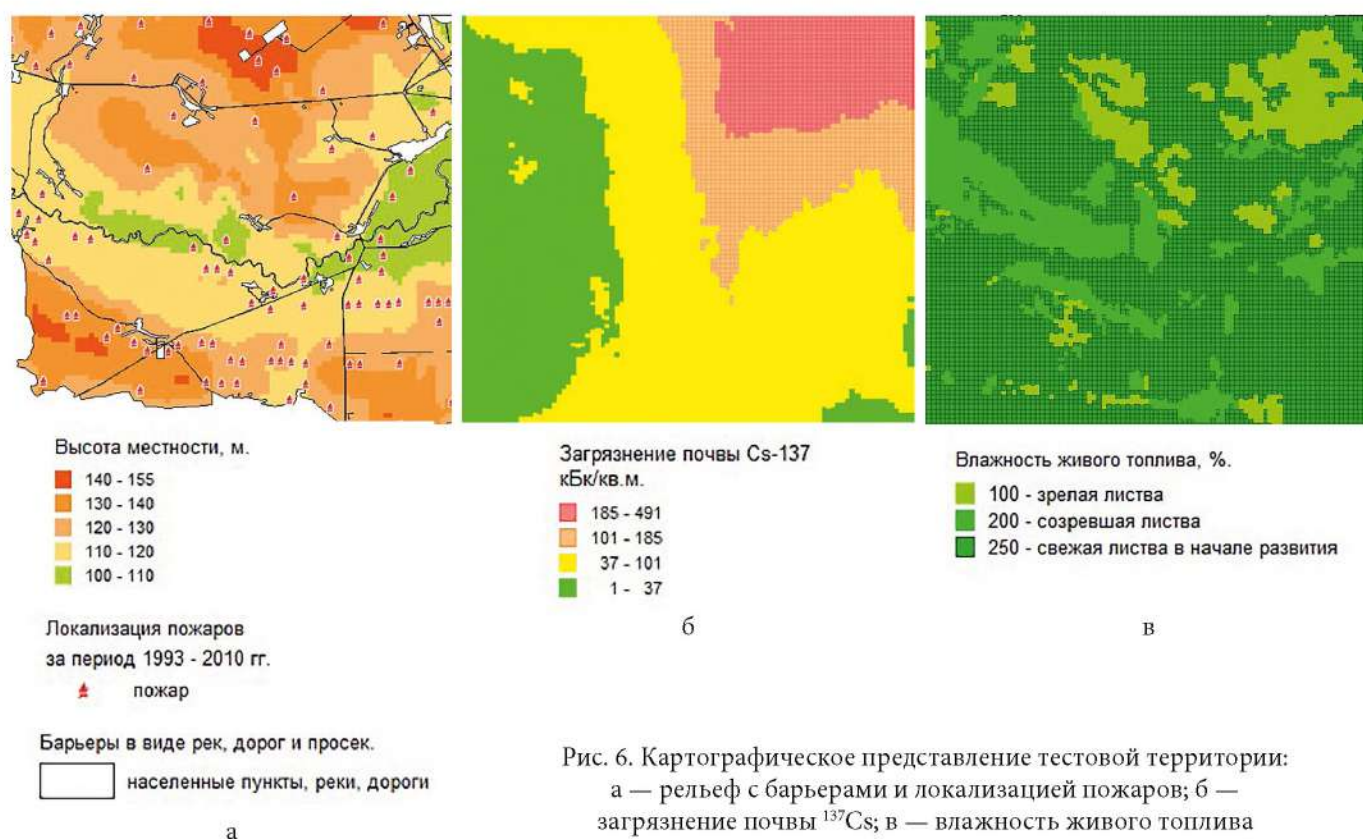


Рис. 6. Картографическое представление тестовой территории: а — рельеф с барьерами и локализацией пожаров; б — загрязнение почвы ^{137}Cs ; в — влажность живого топлива

проинтерполированы в регулярную сеть с шагом 30 м и приведены к единой метрической системе координат UTM⁵. Соблюдения таких стандартов требуют расчетные модули системы. Инструментами GRASS GIS получены растровые карты цифровой модели местности, которые содержат топографические уклоны и аспекты в градусах. При этом топографические аспекты были рассчитаны против часовой стрелки от востока, как принято в системе GRASS [12].

Карта загрязнения почвы тестовой территории была создана путем выборки информации о загрязнении почвы радионуклидами территории ЧЗО, представленной на рис. 3 и пересеченной с сеткой 250 × 250 м. Полученные данные в сетке-грид (regular grids) были обработаны, классифицированы (см. рис. 6, б) и переведены в форматы ГИС ArcGIS для дальнейшей обработки.

Данные о топливных моделях представляются в виде номеров с названием модели. Данные из формата MapInfo переводятся в растровый формат («tab» — «shp») и передаются для использования в системе GRASS GIS.

Подготовка параметров для моделей расчета распространения пожара

Основными параметрами для моделей распространения пожаров являются параметры окружающей среды. Уклон местности, скорость и направление ветра определяют скорость распространения и направление огня. Более крутые склоны вызывают более быстрое распространение пожара в направлении подъема. Эта закономерность была изучена и количественно определена в нескольких лабораторных экспериментах [9]. Ветер является наиболее переменным фактором, необходимым для прогнозирования поведения огня. Он меняется не только со временем, но и в горизонтальном и вертикальном направлениях. В отличие от уклона местности ветер трудно охарактеризовать через его изменчивость в пространстве и времени, поэтому в моделях используются усредненные по пространству и времени значения. Искры и горящие угли могут переноситься сильными ветрами на большие расстояния; этот процесс, известный как споттинг (spotting), вызывает распространение огня за пределы очагов горения [7].

⁵ Universal Transverse Mercator — Система координат универсальной поперечной проекции Меркатора.

В тестовом варианте рассматривается конкретная дата 05.06.2018, время 12:00, и для этой даты выбраны метеорологические параметры, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Оперативные метеорологические данные за 05.06.2018 г.

День	Время	Ветер, град	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С	Давление на станции, гПа	Влажность воздуха, %
5	12:00	360	4,0	23,5	988,7	50

На основе инструкции Ротермела [1, 9] и метеорологической информации (см. табл. 3) подготавливались и заносились в таблицу такие параметры (в тестовом варианте для травяных моделей рассматривались параметры только на основе 1-часового класса влажности топлива):

Время суток — D (день).

Температура — 23,5 °С переводится в шкалу Фаренгейта — $(23,5 \cdot 1,8 + 32) = 74,3 \cdot F$.

Относительная влажность RelH — 50%.

Скорость ветра переводится в (фут/мин) — 787,402 фут/мин.

Реферативная влажность топлива — Reference fuel moisture, % — 7% (табл. А [9]) (нескорректированная на аспект и уклон местности).

Месяц — Month — June (06).

Открытый/затененный — E (exposed) / S (shaded) — S — затененный.

Время — Time — 12.00h.

Изменение высоты — Elevation change — L — в радиусе тестового участка.

Аспект — Aspect.

Угол склона — Slope.

Коррекция влажности для топлива — Fuel moisture correction — (табл. В, С, D [9]).

Расчет влажности топлива проводится в соответствии со следующими рекомендациями:

если содержание влаги в живой травянистой растительности составляет 120 % или выше, травянистое топливо зеленое, а вся травяная растительность остается в живой категории при заданной влажности;

если содержание влаги в живой травянистой растительности составляет 30 % или ниже, травяные виды топлива считаются полностью сухими, а вся травяная растительность принимается за сухую растительность;

если содержание влаги в живой травянистой растительности составляет от 30 до 120 %, тогда часть травяной растительности относится к сухой. Например, если содержание влаги в живой траве составляет 75 %, то половина травянистой растительности относится к сухой, а та, что остается, будет относиться к живому классу травянистой растительности.

Расчет влажности живого топлива проводится по таблице II-2 публикации [9] в соответствии со стадиями вегетативного развития растений (см. рис. 6, в):

свежая листва в течение вегетации — 250 %;

созревшая листва с полным тургором — 200 %;

зрелая листва и рост завершен — 100 %.

Таким образом, согласно приведенным выше алгоритмам, были сформированы цифровые покрытия (shp-формат) для тестовой территории с преобладанием травяных моделей.

ModGrass — номер модели;

Moisture — 1-часовая влажность топлива ($\% \cdot 100$);

Moisture_live — влажность живого топлива (%);

Velocity — скорость ветра, перечисленная с учетом шероховатости (фут/мин);

Direction — направление ветра (в градусах от севера);

ElevatTest — высота местности (данные проекта ALOSWorld3D, м);

LocalFires — локализация точек пожара (1 — пожар, 0 — нет пожара);

Barrier — барьеры (дороги, реки, лесные полосы).

Моделирование пожаров по заданному сценарию

В процессе моделирования нами было использовано несколько сценариев, где в качестве источников возгорания были использованы координаты 20 реальных пожаров, произошедших в ЧЗО, находящихся в пределах исследуемого участка при различных сценариях влажности живого топлива в период пожара. Запуск процесса моделирования осуществлялся последовательно: 1 шаг — вызов модуля «r.gos» (один раз), 2 шаг — вызов модуля «r.spread» с параметром временной задержки (time lag) и указанием длины временного периода моделирования.

Результатом работы модуля «r.gos» являются следующие карты:

растровая карта, содержащая базовые (перпендикулярные направлению максимального распространения) скорости распространения пожара;

карта с максимальными скоростями в направлении распространения огня (см/мин);

карта направлений максимальных скоростей распространения огня (градусы, по часовой стрелке с севера);

растровая карта, содержащая максимальные расстояния переноса горячих частиц вследствие споттинга, м.

Выходные растровые карты, полученные в процессе моделирования, представляют относительное время возгорания в минутах от начала расчета. На рис. 7 представлены результаты расчета, проведенного по сценарию засушливых условий (одночасовая влажность мертвого топлива 7–8%, и средняя влажность живого топлива 20%) для различных промежутков времени на фоне карты распределения РГМ по номерам топливных моделей согласно табл. 1. Крутизна градиента цвета показывает относительную скорость распространения. Чем круче градиент цвета, тем медленнее распространение.

Чтобы увидеть промежуточные состояния, мы можем запустить модуль «r.spread» несколько раз, используя полученные на выходе предварительного расчета карты распространения в качестве входных данных для последующих запусков. В данном сценарии (см. рис. 7) с осредненными метеорологическими параметрами, заданными в соответствии с табл. 3, пожар был направлен с севера на юг. Огонь пересек дороги и даже небольшие водотоки и быстро распространился в сторону большой водной преграды, которую уже не смог преодолеть. На рис. 7 (г, д) соответственно представлены результаты финальной стадии модели-

рования пожара длительностью 600 мин с учетом эффекта споттинга и без. Из сравнения можно увидеть, что площадь пожара, образованного горением с учетом споттинга, почти в два раза превышает площадь пожара, образовавшегося за то же время. Соответственно и скорость распространения огня на рис. 7, д гораздо меньше. Из этого можно сделать вывод, что даже при относительно небольших скоростях ветра эффект споттинга может увеличивать скорость распространения огня в разы.

Средние скорости распространения смоделированного пожара в направлении максимального распространения составляют примерно 20 м/мин, во время как базовые (перпендикулярные) изменяются от 1,14 м/мин в среднем до 7,6 м/мин в максимуме.

Для данного сценария, имея контуры распространения пожара и карту загрязнения территории ^{137}Cs , мы сделали расчет запасов радионуклидов в очаге пожара и их изменения во времени по мере увеличения площади распространения пожара. Для этого мы взяли имеющуюся карту загрязнения, проинтерполировали данные в сетку с шагом 25 м для приведения к единому масштабу с картой распространения пожара и пересекли с картой распространения пожара, получив карту загрязнения в пределах контура пожара. Затем путем суммирования запасов ^{137}Cs в каждой ячейке в пределах контура смоделированного пожара мы получили интегральные запасы ^{137}Cs на 180, 300, 480 и 600 минутах от начала пожара (рис. 8).

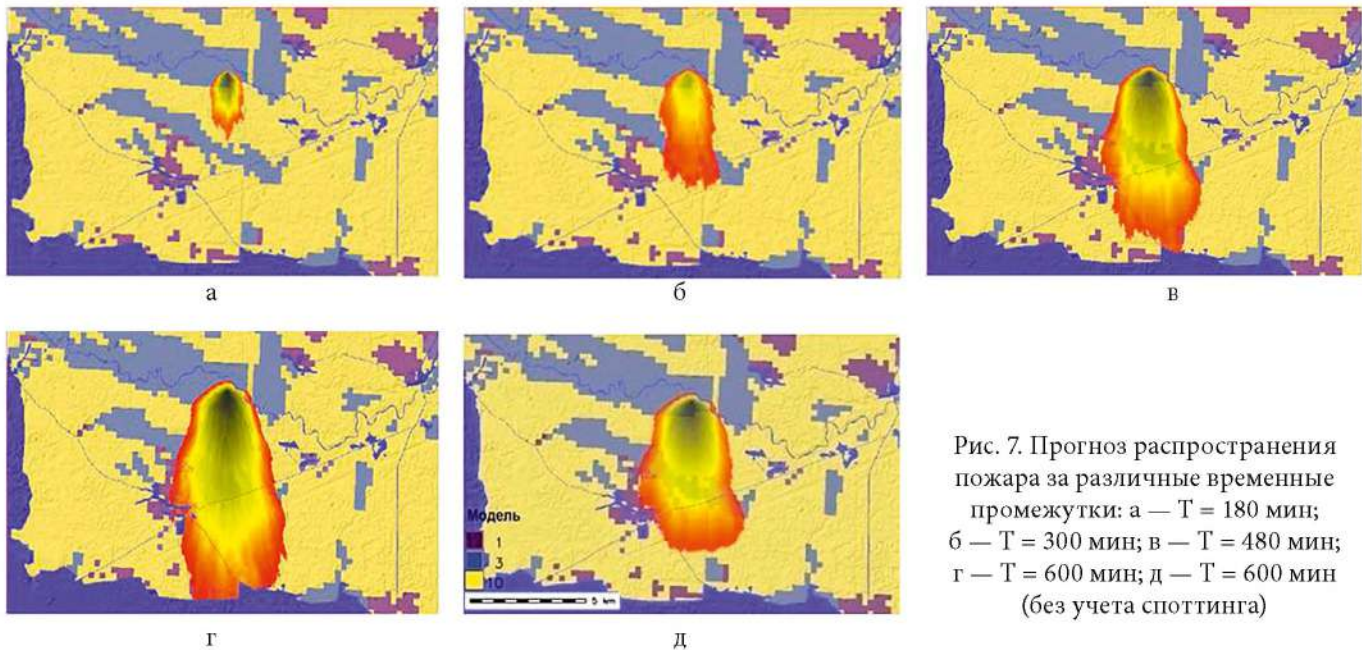


Рис. 7. Прогноз распространения пожара за различные временные промежутки: а — $T = 180$ мин; б — $T = 300$ мин; в — $T = 480$ мин; г — $T = 600$ мин; д — $T = 600$ мин (без учета споттинга)

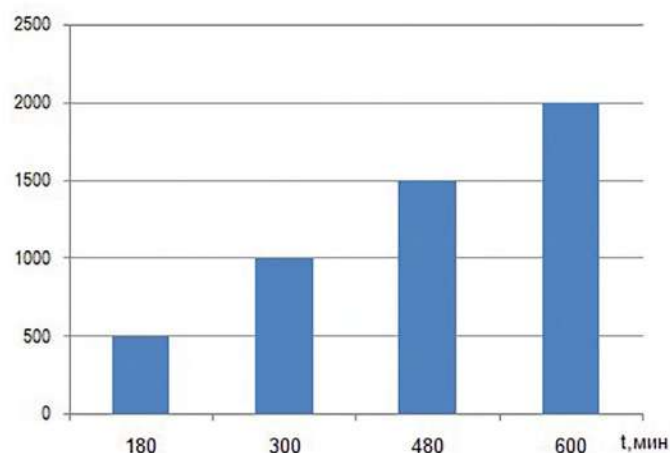


Рис. 8. Изменение запасов ¹³⁷Cs в почве во времени на площади, охваченной пожаром, ГБк

Нами также были проведены расчеты для различных вариантов влажности живого топлива при фиксированном среднем значении одночасовой влажности мертвого топлива 7 %. Результаты расчетов, приведенные в табл. 4, показывают, что изменение влажности живого топлива существенно влияет на скорость распространения пожара и его площадь. Так, на рис. 9 отчетливо видно, что при падении влажности живого топлива с 250 до 120 % скорость перемещения фронта пожара в направлении максимального распространения возрастает примерно в 2 раза, в то время как при падении влажности до 75 % скорость перемещения фронта пожара выросла более чем в 3 раза — с 4 до 13 м/мин.

С целью сравнения, насколько сильно могут повлиять различия в местоположении источника возгорания при одинаковых условиях влажности сухого и мертвого топлива, направлении и силы ветра, мы произвели расчет распространения пожара в течение 5 ч по 20 источникам возгорания, случайно отобранным по всей исследуемой территории, при значении одночасовой влажности мертвого топлива 7 % и влажности живого топлива 160 %. Результат, представленный на рис. 10, показывает, что в зависимости от местоположения источника возгорания различия в скоростях распространения площади выгорания могут отличаться до 3 раз. Наибольшие площади выгорания при этом приходятся на участки с преобладанием травянистых топливных моделей 1 и 3. Контуры пожаров также могут существенно отличаться в зависимости от особенностей местности, наличия барьеров и конфигурации топливных моделей в конкретном местоположении.

Таблица 4. Расчетные характеристики распространения пожара в зависимости от условий влажности

Влажность 1h мертвого топлива, %	Влажность живого топлива, %	Скорость распространения фронта пожара, м/мин	Площадь распространения, га
7	250	4,1	52,7
7	160	8,5	120,4
7	120	9,9	166,5
7	75	13,4	266,3

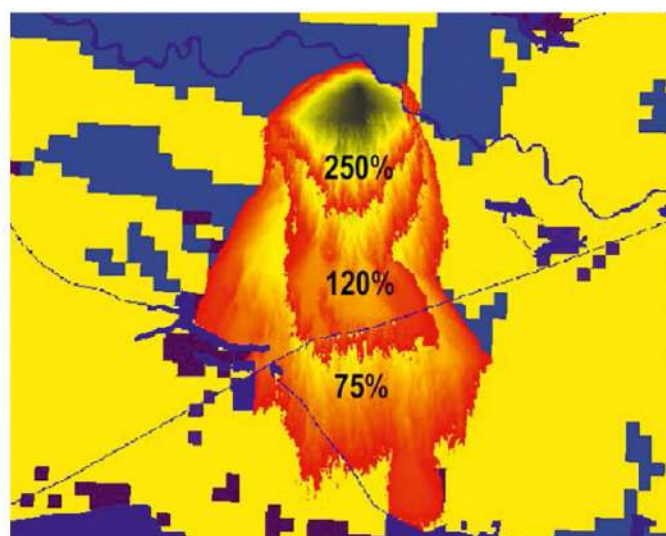


Рис. 9. Контуры пожара при влажности живого топлива 250, 120 и 75%

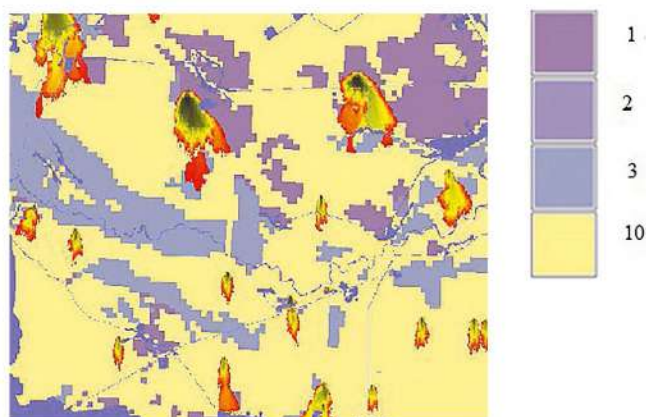


Рис. 10. Смоделированные пожары при одинаковых метеорологических условиях для 4 топливных моделей

Выводы

Для исследуемого участка ЧЗО был получен набор цифровых карт, который позволил обеспечить исходной информацией модель расчета распространения поверхностных пожаров на основе модели Ротермела. На основе карты типов подстилающей поверхности (травяной и лесной растительности) была создана цифровая карта топливных моделей территории ЧЗО в соответствии с классификацией [8], являющаяся важнейшим элементом исходных данных для моделирования распространения пожаров.

Применение модели Ротермела, реализованной в среде открытого программного обеспечения GRASS GIS и адаптированной к условиям ЧЗО для моделирования пожаров на тестовом участке, позволило определить параметры распространения пожара при засушливых условиях. В частности, при средних скоростях ветра на уровне «средины пламени», равных 4 м/с, максимальная скорость распространения фронта пожара в направлении скорейшего распространения составила 17 м/мин, (1,02 км/ч).

Характеристики влажности живого топлива в возможном диапазоне изменения влажностей при прочих равных условиях могут оказывать значительное влияние на скорость распространения пожара, а следовательно, и площадь очага пожара.

На основе полученных в результате тестовых расчетов карты распространения пожара и карты загрязнения территории ¹³⁷Cs показана возможность определения суммарных запасов ¹³⁷Cs в периметре пожара с целью дальнейшего моделирования выбросов в атмосферу радиоактивного цезия во время пожара.

Список использованной литературы

1. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels / R. C. Rothermel. — Ogden, UT : USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. — 40 p. — (Research Paper INT-115).
2. Andrews P. L. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system. BURN subsystem. Part 1. / P. L. Andrews. — Ogden, Utah : USDA Forest Service, Intermountain Research Station, 1986. — 130 p. — (General Technical Report INT-194).
3. Scott E. Standard Fire Behavior Fuel Models: Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model / E. Scott, H. Joe, R. Burgan. — Fort Collins, CO : USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005. — 80 p. — (General Technical Report RMRS-GTR-153).
4. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models / A. L. Sullivan // International Journal of Wildland Fire. — 2009a. — Vol. 18. — No. 4. — P. 349–368.
5. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models / A. L. Sullivan // International Journal of Wildland Fire. — 2009b. — Vol. 18. — No. 4. — P. 369–386.
6. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models / A. L. Sullivan // International Journal of Wildland Fire. — 2009c. — 18 (4). — P. 387–403.
7. Albini F. A. Estimating wildfire behavior and effects / F. A. Albini. — Ogden, UT : USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1976. — 92 p. — (General Technical Report INT-30).
8. Anderson H. E. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior — USDA / E. Anderson Hal. — Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982. — 28 p. — (General Technical Report INT-122).
9. Rothermel R. C. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires / R. C. Rothermel. — Ogden, UT : USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983. — 168 p. — (General Technical Report INT-143).
10. Ascoli D. Building Rothermel fire behaviour fuel models by Genetic Algorithm optimization / D. Ascoli, G. Vacchiano, R. Motta, G. Bovio // International Journal of Wildland Fire. — 2014. — Vol. 24. — No. 3. — P. 317–328. — Doi: 10.1071/WF14097.
11. Deeming J. E. The National Fire-Danger Rating System / J. E. Deeming, J. W. Lancaster, M. Fosberg, W. Furman, M. J. Schroeder. — N.-Y.; London; Toronto : USDA Forest Service, 1972. — 165 p. — (Research Paper RM-84).
12. Баровик Д. В. Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров / Д. В. Баровик, В. Б. Таранчук // Технологии техносферной безопасности. — 2011. — Вып. № 6 (40). — Режим доступа: http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/92121/1/TVB_ipb.pdf.
13. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення / МНС України, ТОВ «Інтелектуальні Системи ГЕО». — Київ : ТОВ «Компанія ВАІТЕ». — 2011. — 52 с.
14. Kashparov V. Spatial data sets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion

- Zone / V. Kashparov, S. Levchuk, M. Zhurba // *Earth Syst. Sci. Data*. — 2018. — Vol. 10. — P. 339–353.
15. Проект організації лісового господарства Державного спеціалізованого комплексного підприємства «Чорнобильська Пуща». — Київ : Ліспроєкт, 2006.
 16. Таксаційний опис земельних ділянок лісового фонду станом на 01.01.2017 р. / ДСКП «Північна Пуща». — 2017.
 17. Evangelidou N. Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wild fires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: Anipact assessment / N. Evangelidou, S. Zibtsev, V. Myroniuk [et al.] // *Scientific Reports*. — Vol. 6. — Art. 26062. — Doi: 10.1038/srep26062.
 18. Дозиметрическая паспортизация населенных пунктов Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению после Чернобыльской аварии. Сборник № 5. — Киев, 1995. — 311 с.
 19. Xu J. Simulating the spread of wildfires using a geographic information system and remote sensing / Xu J. // Phd dissertation. — New Brunswick : Rutgers University, 1994.
 20. Anderson D. H. Modelling the spread of grass fires / D. H. Anderson, E. A. Catchpole, N. J. De Mestre, T. Parkes // *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*. — 1982. — Vol. 23. — P. 451–466.
 21. Nelson R. M., Jr. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content / R. M. Nelson, Jr. // *Can. For. Res.* — 2000. — Vol. 30. — P. 1071–1087.
 22. Fosberg M. A. Moisture Content Calculations for 1000-Hour Timelag Fuels / M. A. Fosberg, R. C. Rothermel, P. L. Andrews // *Forest Sci.* — 1981. — Vol. 27. — No. 1. — P. 19–26.
 23. Волокитина А. В. Картографирование растительных горючих материалов / А. В. Волокитина, Т. М. Софронова // *Сибирский лесной журнал*. — 2014. — № 6. — С. 8–28.
 24. Geospatial Modeling and Analysis. North Carolina State University. — Available at: <https://www.koofers.com/north-carolina-state-university-ncsu/gis/582-geospatial-modeling-and-analysis/>.
 25. Данные космической съемки поверхности Земли спутника Landsat. — Available at: http://goto.arcgisonline.com/map/World_Imagery/.
 26. ALOS Global Digital Surface Model «ALOS World 3D — 30m (AW3D30)». — Available at: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
 27. Bradstock R. Flammable Australia: Fire Regimes, Biodiversity and Ecosystems in a Changing World / R. Bradstock, A. Gill, A. Malcolm, R. J. Williams (eds.). Collingwood, Vic: CSIRO Publishing. — 2012. — 330 p. — Available at: <https://www.publish.csiro.au/book/6836>

**Ю. І. Кузьменко, Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко,
В. М. Піскун, Л. В. Гавловська**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,
вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

ГІС-підхід до вирішення завдання прогнозування розвитку природних пожеж у Чорнобильській зоні відчуження на основі моделі Ротермела

Представлено результати використання програмного забезпечення (ПЗ) на базі геоінформаційної системи з відкритим кодом GRASS GIS 7.6 і алгоритму розрахунку швидкості поширення пожежі на основі коду Ендрюса [2], реалізованого в системі ВЕНАВЕ PLUS [3]. Для реалізації ПЗ на тестовій території Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) було створено спеціалізоване геоінформаційне забезпечення, що включає актуальні карти рослинного покриву ЧЗВ, ідентифікованого в типах паливних моделей (fuel models), карти радіоактивного забруднення ґрунту ЧЗВ, морфометричних характеристик місцевості і метеорологічних умов. На основі тестових розрахунків отримано вихідні карти поширення пожежі за різні часові проміжки і карти сумарних запасів ^{137}Cs в периметрі пожежі є вхідною інформацією для подальшого моделювання викидів в атмосферу та перенесення радіоактивного аерозолі під час пожежі.

Ключові слова: паливні моделі, геоінформаційне забезпечення, поширення пожежі, моделювання.

**Yu. I. Kuzmenko, T. D. Lev, O. G. Tishchenko,
V. N. Piskun, L. V. Gavlovska**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

GIS Approach to the Solution of the Project for Forecasting the Development of Natural Fires in the Chernobyl Exclusion Zone Based on the Rothermel Model

The problem of forest fires in the Chernobyl exclusion zone (ChEZ) is urgent, since vegetation in radioactively contaminated areas is annually destroyed

and damaged, causing a rise and transfer of radioactive aerosol to significant distances. This affects the ecological state of the environment, including human settlements. Foreign and domestic experience shows the successful use of specialized software (software) for predicting and propagating lower forest fires constructed using the semi-empirical model of Rothermel based on the spatial distribution of complexes of plant combustible materials and local natural and geographical conditions. The results of using software based on the open-source geographic information system GRASS GIS 7.6 and an algorithm for calculating the fire propagation rate based on the Andrews code implemented in the BEHAVE PLUS system are presented in the article. To implement the software in the test area of the ChEZ, specialized geoinformation support was created, including up-to-date maps of the ChEZ vegetation cover identified in the types of Fuel Models, maps of the soil radioactive contamination, morphometric characteristics of the terrain and meteorological conditions. High-precision terrain elevation maps were used. They were obtained using the global set of digital terrain models of the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) with a grid spacing of 30 m. All input data were interpolated into a regular network with a grid spacing of 30 m and reduced to a single metric coordinate system. The application of the Rothermel model, implemented in the open-source software GRASS GIS and adapted to the ChEZ conditions for modeling fires at the test site, allows one to determine fire propagation parameters under dry conditions. It is shown that, depending on the location of the source of ignition, differences in the propagation velocity of the burn-up area can vary up to 3 times. The largest burn-up areas in this case occur in areas with a predominance of grassy fuel models. The contours of fires can also vary significantly depending on the terrain, the presence of barriers and the configuration of fuel models at a particular location. The contours of the fire spread and the contamination map of the ^{137}Cs territory make it possible to calculate the reserve of radionuclides in the fire source and their changes in time with increasing fire spread. Based on test calculations, output fire distribution maps for various time intervals and maps of total ^{137}Cs reserves along the fire perimeter were obtained, which are the initial information for further modeling of atmospheric emissions and transport of radioactive aerosol during a fire.

Keywords: fuel models, geographic information support, fire spread, modeling.

References

1. Rothermel R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Research Paper INT-115. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 40 p.
2. Andrews P. L. (1986). *BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system. BURN subsystem, Part 1*. General Technical Report INT-194. Ogden, Utah: USDA Forest Service, Intermountain Research Station, 130 p.
3. Scott J. H., Burgan R. E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 80 p.
4. Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modeling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 4, pp. 349–368.
5. Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 4, pp. 369–386.
6. Sullivan A. L. (2009). Wildland surface fire spread modeling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 4, pp. 387–403.
7. Albini F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. General Technical Report INT-30. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 92 p.
8. Anderson H. E. (1982). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. General Technical Report INT-122. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 28 p.
9. Rothermel R. C. (1983). *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. General Technical Report INT-143. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 168 p.
10. Ascoli D., Vacchiano G., Motta R., Bovio G. (2014). Building Rothermel fire behaviour fuel models by genetic algorithm optimization. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 24, no. 3, pp. 317–328. doi: 10.1071/WF14097.
11. Deeming J. E., Lancaster J. W., Fosberg M., Furman W., Schroeder M. J. (1972). *The national fire-danger rating system*. Research Paper RM-84. N.-Y.; London; Toronto: USDA Forest Service 165 p.
12. Barovik D. V., Taranchuk V. B. (2011). [Rothermel model adaptation for implementation in forest fires forecast software]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere Security Technologies], vol. 40, no. 6, 8 p. Available at: http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/9212/1/TVB_ipb.pdf. (in Russ.)

13. Ministry of Emergency Situations of Ukraine, Intelligence Systems GEO (2011). *Atlas. Ukraine. Radioactive contamination*. Kyiv: VAITE, 2011, 52 p. (in Ukr.)
14. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak V., Khomutinin Y., Nicholas A., Beresford J., Chaplow S. (2018). Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, pp. 339–353.
15. *Forestry organization project of the Chornobyl Pushcha State Specialized Complex Enterprise*. Kyiv: Lisproekt, 2006. (in Ukr.)
16. *Taxation description of forest land plots as of 01.01.2017*. SSE “Pivnichna Puscha”, 2017. (in Ukr.)
17. Evangelidou N., Zibtsev S., Myroniuk V., Zhurba M., Hamburger T., Stohl A., Balkanski Y., Paugam R., Mousseau T. A., Møller A. P., Kireev S. I. (2016). Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment. *Scientific Reports*, vol. 6, art. 26062. doi: 10.1038/srep26062.
18. *Dosimetric certification of settlements of Ukraine exposed to radioactive contamination after the Chornobyl accident*. Volume 5. Kyiv: 1995, 311 p. (in Russ.)
19. Xu J. (1994). *Simulating the spread of wildfires using a geographic information system and remote sensing* (Phd dissertation). New Brunswick, NJ: Rutgers University.
20. Anderson D. H., Catchpole E. A., De Mestre N. J., Parkes T. (1982). Modelling the spread of grass fires. *The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics*, vol. 23, pp. 451–466.
21. Nelson R. M., Jr. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Can. J. For. Res.*, vol. 30, pp. 1071–1087.
22. Fosberg M. A., Rothermel R. C., Andrews P. L. (1981). Moisture content calculations for 1000-hour time lag fuels. *Forest Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 19–26.
23. Volokitina A. V., Sofronova T. M. (2014). Kartografirovaniye rastitelnykh goryuchih materialov [Mapping of plant fuels]. *Sibirskii lesnoj zhurnal* [Siberian Forest Journal], no. 6, pp. 8–28. (in Russ.)
24. *Geospatial Modeling and Analysis. GIS582*. North Carolina State University. Available at: <https://www.koofers.com/north-carolina-state-university-ncsu/gis/582-geospatial-modeling-and-analysis/>.
25. *Data from satellite imagery of the Earth's surface of the Landsat satellite*. Available at: http://goto.arcgisonline.com/map/World_Imagery.
26. *ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D — 30m (AW3D30)"*. Available at: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.
27. Bradstock R. A., Gill A. M., Williams R. J. (eds) (2012). *Flammable Australia: fire regimes, biodiversity and ecosystems in a changing world*. Collingwood, Vic: CSIRO Publishing, 330 p. Available at: <https://www.publish.csiro.au/book/6836>.

Надійшла 11.02.2020

Received 11.02.2020