

)¹ —
^ —(),
—
^ — — ,
)¹ /
) (—
—

УДК 004.94,519.63

Д.В. БАРОВИК, В.Б. ТАРАНЧУК

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Results of the last research in the field of development and application of computer models of forest fires are generalized.

Леса являются одним из важнейших национальных богатств Беларуси, ими покрыто более 38 % территории страны. Из множества природных и антропогенных факторов негативного влияния на состояние и динамику лесных экосистем доминирующими считаются пожары, которые наносят значительный материальный и экологический ущерб. Для научно обоснованных, успешных действий, на-

правленных на предупреждение, прогноз развития и ликвидацию лесных пожаров, требуется разработка соответствующих компьютерных моделей и программных средств.

В зависимости от того, какие ярусы леса, участки территории вовлечены в процесс распространения огня, лесные пожары подразделяются на *подземные* или почвенные, *низовые* и *верховые*.

При *почвенных* или *подземных пожарах* (*ground fires, smouldering fires*) горит самый нижний ярус леса (подстилочные пожары) или торф (пожары на торфяниках). Такие пожары распространяются очень медленно, однако могут иногда достигать нескольких метров в глубину и оставаться необнаруженными долгое время. Эффективные методы тушения таких пожаров отсутствуют [1].

При *низовых* лесных пожарах (*surface fires*) сгорают опад, напочвенный покров, травы и кустарники. Низовые пожары – самые распространенные в природе. Большинство лесных пожаров начинаются как низовые, которые могут потом перейти в подземные или верховые в зависимости от типа лесных горючих материалов (ЛГМ) и климатических условий. Характерная скорость распространения фронта низового лесного пожара 1 см/с.

Пожар называется *верховым* (*crown fire*), если при его распространении повреждаются кроны деревьев. Верховые пожары классифицируются в зависимости от типа взаимодействия с низовыми пожарами. Если кроны деревьев сгорают в результате воспламенения от огня только низового пожара, пламя не перекидывается напрямую на соседние кроны, то такие верховые пожары называются *пассивными верховыми пожарами* (*passive crown fires*). Скорость распространения верхового пожара такого типа совпадает со скоростью распространения низового пожара. Если пожар распространяется как сплошная стена огня и ЛГМ повреждаются во всех ярусах леса одновременно, то говорят о *пассивном верховом* лесном пожаре (*active crown fire* или *dependent crown fire*).

Верховой пожар называется *вершинным верховым* (*independent crown fire* или *running crown fire*), если огонь быстро распространяется по кронам деревьев в направлении ветра независимо от низового пожара. Относительно густое расположение деревьев и сильный ветер – необходимые условия распространения лесного пожара таким способом. Характерная скорость распространения фронта вершинного верхового лесного пожара 1 м/с, т. е. на два порядка выше, чем низового пожара.

Если горение ЛГМ носит многоочаговый характер, обусловленный разлетом (переносом) горящих частиц из зоны основного (материнского) лесного пожара, то говорят о *пятнистом* (*spotting*) лесном пожаре.

О современном состоянии проблемы, применяемых моделях пожаров. Компьютерные модели лесных пожаров являются обязательной компонентой систем поддержки принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций в лесах. В ряде научных публикаций принята следующая классификация моделей лесных пожаров [1, 2]: теоретические (математические), эмпирические (статистические), полуэмпирические.

Теоретические модели базируются на законах газовой динамики, горения, тепломассопереноса и других фундаментальных законах физики и химии. Записываются, как правило, в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Верификация таких моделей весьма затруднительна, однако только они описывают развитие лесного пожара с учетом общих и территориальных факторов и позволяют отвечать на весьма широкий круг вопросов.

В **эмпирических (статистических) моделях** систематизируется ряд данных по скорости распространения лесного пожара при изменении выбранного количества параметров, определяются коэффициенты корреляции для каждой независимой переменной. При таком подходе не изучается механизм явления, полученные соотношения, строго говоря, не могут быть распространены за пределы применимости использованных статистических данных, а в рамках их делается прогноз с определенной вероятностью.

В **полуэмпирических моделях** для определения скорости распространения привлекаются общие законы (сохранения энергии, массы и количества движения), которые записываются в виде упрощенных зависимостей, а соответствующие коэффициенты подбираются путем обобщения экспериментальной информации. Полуэмпирические модели адекватны в ситуациях, похожих на те, при которых были собраны опытные данные. Такие модели значительно проще в верификации по сравнению с теоретическими, при этом они более адекватны по сравнению с эмпирическими (статистическими) моделями.

Много внимания по всему миру в течение второй половины XX в. было уделено проблемам моделирования **низовых лесных пожаров**. Построен ряд моделей, состоящих из систем уравнений, свя-

зывающих параметры окружающей среды с динамикой лесных пожаров, скорость распространения пожара, интенсивность тепловыделения фронта и выгоревшая площадь вычисляются на основании физических особенностей ЛГМ, рельефа местности и климатических условий. Анализ и особенности существующих моделей, ссылки на литературу приведены в работах [1, 2]. Отметим основные.

Теоретические модели: W. Fons (1946, США), H. Emmons (1964, США), H. Hottel и др. (1965, США), C. Van Wagner (1967, Канада), P. Thomas (1967, Великобритания), H. Anderson (1969, США), J. Pagni and G. Peterson (1973, США), F. Steward (1974, США), Г.П. Телицин, Н.П. Курбатский (1976, Россия), Э.В. Конев, А.И. Сухинин (1977, Россия), H. Sekirge (1978, США), N. Fujii и др. (1980, Япония), А.М. Гришин (1981, Россия), C. Huang and Y. Xie (1984, США), F. Albin (1985, США), N. De Mestre и др. (1989, Австралия), R. Weber (1989, Австралия), D. Croba и др. (1994, Греция), R. Linn (1997, США), P. Santoni and J. Balbi (1998, Франция), M. Larini и др. (1998, Франция), J. Dupuy (1999, Франция), J. Margerit and O. Guillaume (2002, Франция).

Эмпирические модели: A. McArthur (1966, Австралия), Г.П. Коровин (1969, Россия), Forestry Canada Fire Danger Group (1992, Канада), D. Viegas и др. (1998, Португалия), N. Cheney и др. (1998, Австралия), W. Hargrove и др. (2000, США).

Полуэмпирические модели: W. Frandsen (1972, США), R. Rothermel (1972, США), Г.А. Дорпер (1979, Россия), G. Griffin and G. Allan (1984, Австралия), R. Sneeuwjagt and G. Peet (1985, Австралия), В.Г. Гусев (1986, Россия), J. Marsden-Smedley, W. Catchpole и др. (1995, Австралия), J. Vega (1998, Испания), W. McCaw (1998, Австралия), N. Burgows и др. (1999, Австралия), P. Fernandes (2001, Португалия).

Несмотря на то, что разработано около 50 моделей низовых лесных пожаров, только 4 из них применяются в различных специализированных программных комплексах. Это эмпирические модели A. McArthur (Австралия) [3], Forestry Canada Fire Danger Group [4], W. Hargrove (США) и полуэмпирическая модель R. Rothermel (США) [5]; теоретических моделей среди них нет.

Верховые лесные пожары очень опасны и наиболее трудны в тушении. Построение теоретических и эмпирических моделей верховых пожаров, их верификация являются фундаментальной научной проблемой, которую обязательно необходимо решить с целью понимания динамики крупных пожаров и в итоге повысить эффективность методов их ликвидации. Из-за сложности математического описания в настоящее время опубликовано только несколько работ, посвященных решению проблем верховых пожаров (таблица). Наиболее цитируемой является монография А.М. Гришина [1], которая отличается теоретической фундаментальностью. Можно выделить модель Ф. Альбини, которая была откалибрована и протестирована в рамках всемирной исследовательской программы The International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME), и эмпирические модели Forestry Canada Fire Danger Group и M. Finney.

Классификация моделей верховых лесных пожаров

Модель	Проблема	Тип	Страна
В.П. Молчанов (1957)	Модель возгорания	Полуэмпирическая	Россия
B. Kilgore, R. Sando (1975)	Модель возгорания	Эмпирическая	США
G. Xanthopoulos (1990)	Модель возгорания	Полуэмпирическая	США
В.А. Перминов (1990)	Модель возгорания	Теоретическая	Россия
F. Albin, B. Stocks (1996)	Модель распространения	Теоретическая	США, Канада
M. Alexander (1998)	Модель возгорания	Полуэмпирическая	Австралия
R. Rothermel (1991)	Модель распространения	Эмпирическая	США
Forestry Canada Fire Danger Group (1992)	Модель возгорания и распространения	Эмпирическая	Канада
А.М. Гришин (1992)	Модель возгорания и распространения	Теоретическая	Россия
C. Van Wagner (1993)	Модель возгорания и распространения	Полуэмпирическая	Канада
M. Finney (1993)	Модель возгорания и распространения	Полуэмпирическая	США
J. Scott, E. Reinhardt (2001)	Модель возгорания и распространения	Полуэмпирическая	США
M. Gomes da Cruz (2004)	Модель возгорания и распространения	Эмпирическая	Канада

Интерес к математическим моделям лесных пожаров, которые разрабатываются с 1940-х гг. до настоящего времени, обусловлен большим числом вопросов научного и практического характера. Есть определенные успехи, но при этом во многих научных публикациях отмечается, что остается ряд проблем: неполнота аналитического изучения соответствующих краевых задач и только ограниченное число полученных для предельно упрощенных условий эталонных решений; отсутствие общепринятого обоснования принимаемых в моделях математических описаний кинетики физико-химиче-

ских реакций и превращений, а также адекватных моделей турбулентности в газовой фазе; необходимость разработки новых численных методов решения возникающих краевых задач и повышения быстродействия алгоритмов расчета по теоретическим моделям.

В Беларуси проблеме моделирования лесных пожаров уделяется большое внимание. В частности, в БГУ адаптированы теоретические и полуэмпирические модели верховых и низовых лесных пожаров, разработаны программные комплексы расчетов прогнозных характеристик для условий преобладающих на территории страны лесных массивов.

Программный комплекс моделирования верховых лесных пожаров (теоретическая модель).

В среде системы компьютерной алгебры *Wolfram Mathematica* в БГУ и Институте математики НАН Беларуси создан программный комплекс (ПК) для вычислительных экспериментов по изучению динамики верховых лесных пожаров. ПК состоит из нескольких модулей, в которых реализованы математическая модель верховых лесных пожаров и численный метод ее решения [6–10], также запрограммированы модули работы с базами данных результатов моделирования, модули автоматизации вычислительных экспериментов [11, 12], система гео визуализации получаемых из расчетов данных [13–15].

Реализуемая компьютерная модель базируется на математическом описании, когда охваченная пожаром среда рассматривается как многофазная, состоящая из сухого органического вещества; воды в жидкокапельном состоянии, связанной с сухим веществом; конденсированных продуктов пиролиза – коксика (древесного угля), золы (минеральной части ЛГМ); газовой фазы (отдельно выделяется массовая концентрация кислорода и горючих газов). Все числовые характеристики названных компонент, а также температура рассчитываются в пространстве, сохраняются в базе данных, визуализируются в динамике. Соответствующий программный комплекс обеспечивает решение целого ряда задач, например, прогноз развития и последствий лесных пожаров; обоснование противопожарных мероприятий; рекомендаций по месту размещения, направлению и характеристикам создаваемых лесопожарных разрывов и заслонов. Средствами комплекса могут наполняться и сопровождаться базы знаний; осуществляться хранение и обработка статистической информации о лесных пожарах.

В качестве примера решения ряд задач, имеющих практическое значение, приведем результаты расчетов в площадном двумерном приближении прогноза развития пожара в верхнем ярусе леса. Моделируется случай, когда в лесном массиве есть участок (включение) из негоримых пород (это может быть и отсутствие растительности) прямоугольной формы (ширина 10 м, длина 30 м). Ширина выбрана достаточной для того, чтобы фронт верхового пожара в принятых условиях не смог преодолеть неоднородность. Расчеты распределений характеристик и эволюции процесса, анализ результатов показывают, что фронт пожара «разрывается», получаем два распространяющихся по направлению ветра независимых участка горения. Многовариантными расчетами показано, что возможны несколько режимов распространения фронта пожара после прохождения через включение [16]. При некоторых условиях оба фланга смыкаются в единую полосу, фронт возвращается в односвязную структуру (этот вариант показан на рис. 1 картами плотностей распределения температуры и изотермами). Значения всех используемых констант и переменных приведены в [7]. При других условиях два образовавшихся участка огня не сливаются в общий фронт, а движутся независимо друг от друга, постепенно затухая по краям. Согласно расчетам, существует «скачкообразное переключение» между этими двумя режимами при плавном изменении основных параметров задачи, в частности влагосодержания ЛГМ. Отметим, что влагосодержание полога леса может быть искусственно увеличено тушением водой.

Основное назначение названного программного комплекса – исследование и теоретическое предсказание развития лесных пожаров. При этом время расчетов каждого отдельного варианта не является приоритетом. Для практических целей, когда скорость прогноза критически важна, разработан второй программный комплекс.

Программный комплекс оперативного моделирования распространения лесных пожаров (полуэмпирическая модель). ПК «Расчет и визуализация динамики лесного пожара», запрограммированный в среде *Borland Delphi*, позволяет в реальном времени рассчитывать примерное положение и конфигурацию контуров лесных пожаров, их периметр, площадь выгоревшего леса, визуализировать результаты на электронной карте и экспортировать в географические информационные системы (ГИС). Используя этот ПК, можно прогнозировать положение фронтов лесных пожаров (в том числе низовых) на основании созданной и наполненной базы данных сценариев распространения фронта пожара для различных типов лесной растительности и климатических условий [10, 17]. В основе используется полуэмпирический подход, первоначально предложенный Р. Ротермелом [5], наборы исходных данных и параметров модели адаптированы для конкретных условий лесов Беларуси.

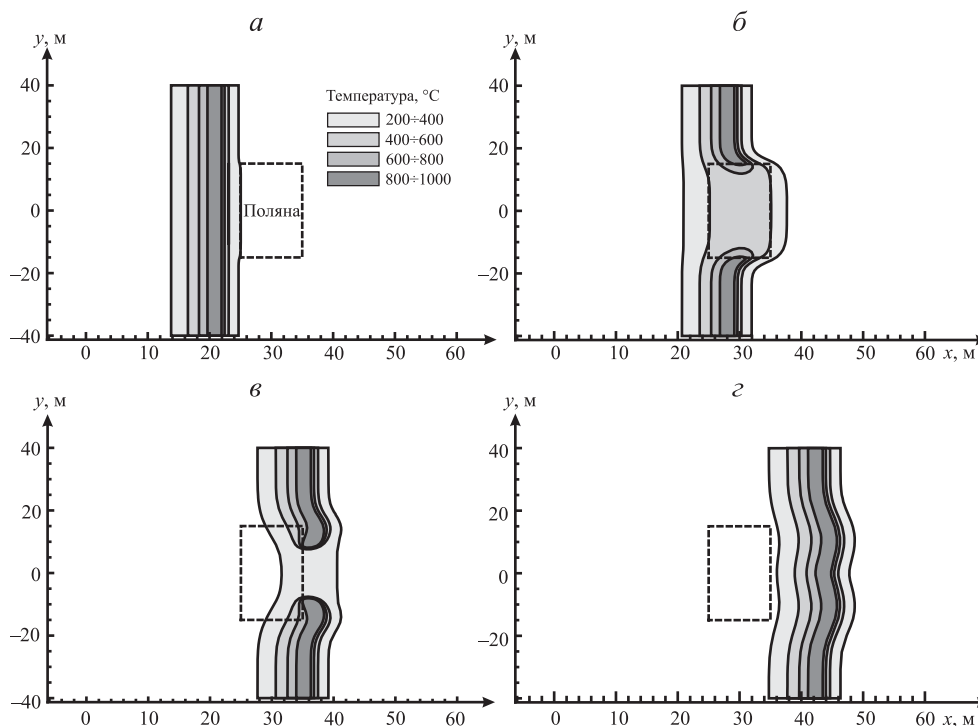


Рис. 1. Эволюции формы фронта горения вблизи лесопожарного разрыва в случае влагосодержания 55 %.
Изолинии распределения температуры в моменты времени (с): 5 (а), 7 (б), 9 (в) и 11 (г)

Отметим некоторые особенности реализованного алгоритма [17]. При моделировании территория лесного массива покрывается равномерной сеткой, ячейкам которой присваивается статус «сгорела», «горит», «не горит». Среди всех ячеек со значением «горит» в каждый момент времени выделяются так называемые граничные ячейки, отделяющие ячейки «сгорела» от ячеек «не горит». Фронт пожара формируется совокупностью «горящих» граничных ячеек. Каждая из них за выбранный интервал времени порождает площадь выгоревшего леса, определяемую согласно сохраненному в базе данных шаблону, и в итоге формируется новая конфигурация фронта пожара. Базовым предположением, основанным на натуральных наблюдениях, является приближение, что низовой пожар в однородной среде распространяется эллипсом. Формулы, используемые в ПК при наполнении базы данных шаблонов распространения пожара, приведены в [17].

Включенная в комплект ПК база данных шаблонов была предварительно рассчитана в СКА *Wolfram Mathematica*. Каждый шаблон характеризуется следующими атрибутами: тип растительности; направление ветра (один из восьми вариантов); скорость ветра (варианты: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 20, 25, 30 м/с); класс пожарной опасности по методике В.Г. Нестерова (I, II, III, IV, V); шаг моделирования по времени (15, 30, 60, 120, 240 мин) и шаг сетки (1, 5, 10, 20, 50, 100 м). Примеры типов растительности, включенных в базу данных: лишайники, сосновый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные; зеленые мхи, еловый лес густой, деревья спелые и перестойные; кустарники, лиственный лес густой, деревья спелые и перестойные; опад хвои, еловый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные; минерализованная полоса, поляна без растительности; водная преграда (река, озеро и т. п.). Название (описание) растительности включает преобладающие тип горючих материалов нижнего яруса леса (мхи, кустарники, опад и др.) и породу деревьев, их возраст и степень сомкнутости крон. Данный перечень параметров был разработан в сотрудничестве с экспертами лесного хозяйства, МЧС Республики Беларусь, Беллесавиа. С одной стороны, разработчикам хотелось бы включить в модель все необходимые параметры, с другой – пользователи программного комплекса не могут оперировать специфическими параметрами, такими как, например, критическое влагосодержание, удельная поверхность слоя горючих материалов и др. В их распоряжении есть карты лесного участка и возможность визуального наблюдения на местности. В качестве необходимых параметров для различных типов растительности были использованы справочные данные, включающие характерные значения [1, 18, 19].

ПК дает возможность работы в двух режимах: использование базы данных рассчитанных шаблонов, типов растительности, а также экспертная оценка реальных наблюдений, отрисовка шаблонов

динамики фронта. Программный комплекс поддерживает загрузку отсканированных и откалиброванных карт реальных лесных участков в качестве фона. Реализовано большинство общепринятых растровых форматов (.BMP, .PNG, .TIFF, .GIF и др.). В комплект исходных данных ПК включены 213 электронных карт в масштабе 1:100 000 (в 1 сантиметре 1 километр) и 68 карт в масштабе 1:200 000 (в 1 сантиметре 2 километра). Задание пользователем конфигураций подобластей с различными типами лесной растительности или их отсутствием (реки, озера, дороги, поляны и др.) сводится к «обрисовке» их границ мышкой на электронной карте, указанию первоначальных очагов возгорания лесного пожара.

ПК позволяет работать с несколькими графическими слоями с регулируемым коэффициентом прозрачности: фоновое изображение, области и подобласти типов растительности, лесопожарных разрывов и заслонов, первоначальные очаги возгорания, контуры пожара в последующие моменты времени. Итоговое и промежуточные изображения можно экспортировать в стандартные растровые и векторные форматы для последующего импорта в ГИС-системы и средства отображения оперативной обстановки [20].

Эффективность разработанного программного комплекса «Расчет и визуализация динамики лесного пожара» проверялась воспроизведением нескольких зафиксированных Беллесавия пожаров. Контуры фронта пожара в четыре последовательных момента времени иллюстрирует рис. 2, первый и последний зафиксированы в документах. Это был один из крупных лесных пожаров, произошедший в 2009 г. в Беларуси. При расчетах использованы следующие параметры модели: ветер южный, 7 м/с, IV класс пожарной опасности по климатическим условиям, шаг дискретизации ячеек 50 м, интервал вывода по времени 15 мин.

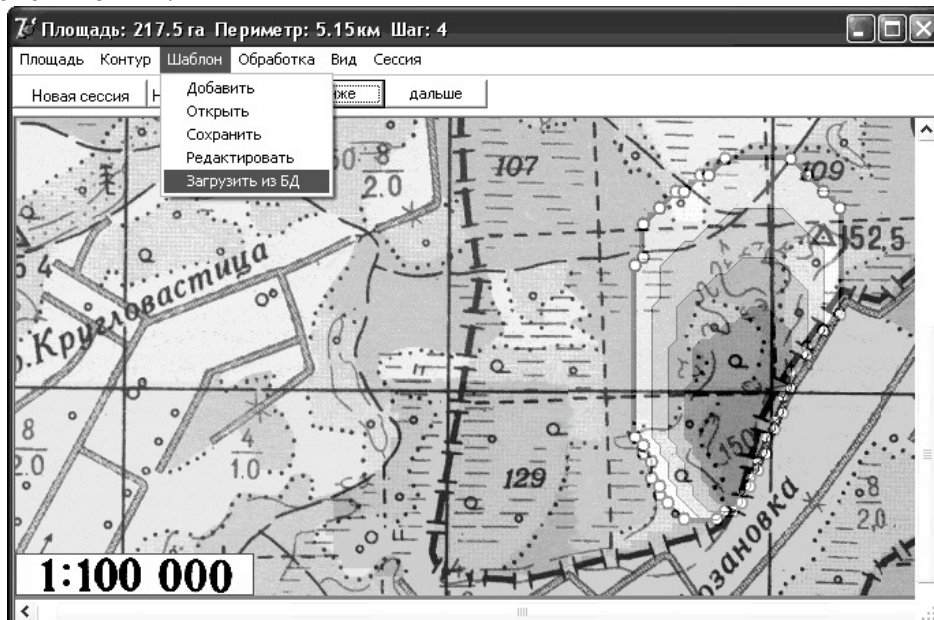


Рис. 2. Скриншот с результатами моделирования пожара в ПК «Расчет и визуализация динамики лесного пожара»

Названные исследования и разработки выполнены в рамках: ГПФИ «Математические модели», задание № 12.2 «Развитие методов и инструментария математического моделирования, решение начально-краевых задач геоэкологии»; ГПОФИ «Природопользование», задание № 20 «Разработка математических методов моделирования экологического риска с использованием компьютерных технологий, оценка рисков, обусловленных экстремальными климатическими явлениями по территории Беларуси»; ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций», задание № 43 «Разработать методику и программный комплекс для расчета и визуализации динамики лесного пожара».

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск, 1992.
2. Pastor E., Zárate L., Planas E., Arnaldos J. et al. // Progress in Energy and Combustion Science. 2003. Vol. 29. P. 139.
3. McArthur A. G. Fire behaviour in eucalypt forests. Australia, 1967.
4. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Ottawa, 1992.

5. Rothermel R. C. A Mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Ogden, 1972.
6. Баровик Д. В., Таранчук В. Б. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2010. № 1. С. 138.
7. Баровик Д. В., Таранчук В. Б. // Весці БДПУ. Сер. 3. 2010. № 2. С. 40.
8. Barovik D. V., Taranchuk V. B. // Math. Model. Anal. 2010. Vol. 15. № 2. P. 161.
9. Barovik D. V., Taranchuk V. B. // Computer Algebra Systems in Teaching and Research (CASTR). Vol. Mathematical Modeling in Physics, Civil Engineering, Economics and Finance. Siedlce, 2011. P. 5, 16.
10. Баровик Д. В., Корзюк В. И., Таранчук В. Б. // Сетевые компьютерные технологии: Сб. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 17–19 окт. 2007. Мн., 2007. С. 170, 176.
11. Баровик Д. В. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2010. № 2. С. 170.
12. Barovik D. V., Taranchuk V. B. // The Fifth International Workshop CASTR. Vol. Mathematical Modeling and Mathematical Physics. Siedlce, 2009. P. 7.
13. Баровик Д. В., Таранчук В. Б. // Информатизация образования. 2007. № 2. С. 24.
14. Таранчук В. Б. Графический сервис вычислительного эксперимента. Мн., 2009.
15. Баровик Д. В., Таранчук В. Б. // Европейское Полесье – хозяйственная значимость и экологические риски: Материалы Междунар. семинара, Пинск, 19–21 июня 2007 г. Мн., 2007. С. 93.
16. Barovik D. V., Taranchuk V. B. // Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems: Proc. Of the Ninth Intern. Conf. Minsk, 2010. Vol. 2. P. 92.
17. Баровик Д. В., Горбацевич Д. А., Таранчук В. Б. // Информатизация образования-2010: педагогические аспекты создания информационно-образовательной среды: Междунар. науч. конф., Минск, 27–30 окт. 2010 г. Мн., 2010. С. 54.
18. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары и борьба с ними. М., 1979.
19. Scott J. H., Burgan R. E. Standard fire behaviour fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. USDA Forest Service, 2005.
20. Войтешенко И. С., Кулагин А. П., Таранчук В. Б. // Вестн. БГУ. Сер. 2. 2002. № 2. С. 43.

Поступила в редакцию 16.06.11.

Дмитрий Валентинович Баровик – кандидат физико-математических наук, начальник сектора проектирования информационных систем Центра банковских технологий, ассистент кафедры компьютерных технологий и систем. Область научных интересов – разработка инструментария численного моделирования процессов геоэкологии; проектирование и разработка информационных систем. Автор 30 научных работ.

Валерий Борисович Таранчук – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем. Область научных интересов – развитие основ и разработка инструментария численного моделирования процессов подземной гидродинамики, геоэкологии; информатизация образования. Автор 175 научных работ и свидетельств, в том числе 2 монографий и 4 учебных пособий.