

На правах рукописи



Хвостиков Сергей Антонович

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И
КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ
НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ
ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в ФГБУН Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель: **Барталев Сергей Александрович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией спутникового
мониторинга наземных экосистем ФГБУН
Институт космических исследований РАН,
г. Москва

Официальные оппоненты: **Бутусов Олег Борисович**
доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра «Прикладная математика» ФГБОУ ВО
«Московский политехнический университет»,
г. Москва

Егошкин Николай Анатольевич
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник ФГБОУ ВО «Рязанский
Государственный Радиотехнический
Университет» РГРТУ, г. Рязань

Ведущая организация: **ФГБУН Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова РАН**

Защита состоится «25» января 2017 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Перепелкин Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Наземные экосистемы являются важнейшей составляющей биосферы Земли и играют ключевую роль в фундаментальных процессах обмена веществом и энергией на планете. Растительный покров, как неотъемлемая компонента различных типов наземных экосистем планеты, покрывает около 80% земной поверхности и содержит почти 99% наземной биомассы. Растительность играет важную роль в глобальном цикле углерода, усваивая его из атмосферы в процессе фотосинтеза и выделяя в атмосферу в процессе дыхания и в почву в результате отмирания тканей.

В последние столетия деятельность человека значительно усилила свое влияние на наземные экосистемы. Массовые вырубки лесов и сельскохозяйственное использование земель приводят к трансформации наземных экосистем. К числу антропогенных последствий ряд ученых относит и увеличение содержания углерода в атмосфере, что предположительно играет значительную роль в наблюдаемых климатических изменениях. Состояние и ареал распространения растительного покрова Земли не остается неизменным в условиях меняющегося климата планеты. При этом наземные, и, в особенности, лесные, экосистемы являются одним из основных потребителей атмосферного углерода и потенциально способны скомпенсировать его антропогенные выбросы. Роль динамики растительного покрова в глобальных климатических и биосферных процессах приводит к необходимости мониторинга и прогноза его состояния.

Математическое моделирование является мощным инструментом изучения динамики наземных экосистем. Существует большое количество моделей динамики растительности, имеющих разную область применения и степень детальности, а также предназначенных для применения в различных условиях, как для оценки состояния наземных экосистем, так и для прогноза их динамики. Используемые на практике модели обычно основаны на упрощенных, описываемых эмпирическими уравнениями, представлениях о процессах, происходящих в наземных экосистемах. Поэтому для построения, настройки и верификации таких моделей важно наличие данных о процессах в наземных экосистемах.

До относительно недавнего времени практически единственным источником данных о состоянии наземных экосистем и процессах в них являлись полевые обследования. Такой подход не позволяет на практике обеспечить регулярность сбора данных на больших территориях глобального или континентального уровней. Появление методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса открыло принципиально новую возможность получения актуальной и регулярно обновляемой информации о состоянии наземных экосистем на различных уровнях территориального охвата. Современные системы ДЗЗ позволяют получать информацию о характеристиках отраженного и собственного излучения земного покрова в различных диапазонах длин волн. К настоящему времени разработано большое количество методов получения информации о растительном покрове по данным измерений его спектрально-отражательных характеристик.

Спутниковые данные предоставляют принципиально новую возможность регулярного получения актуальной информации о состоянии наземных экосистем на больших

территориях. Это, в свою очередь, оказало значительное стимулирующее влияние на развитие подходов по интеграции результатов дистанционных измерений характеристик наземных экосистем в модели их динамики. Данные спутникового мониторинга могут интегрироваться в качестве входной информации в модели, применяться для их параметризации или коррекции модельных оценок результатами измерений (ассимиляция данных).

В диссертационной работе разработаны и апробированы численные методы и программные комплексы оценки состояния наземных экосистем на основе интеграции данных спутникового мониторинга в описывающие их динамику модели. Рассмотрены две модели наземных экосистем контрастно различных уровней:

- глобальная модель динамики растительного покрова, воспроизводящая изменение пространственного распределения основных его типов на основе описания ключевых процессов роста растений с учетом влияния различных факторов, включая природные пожары;
- локальная эмпирическая модель распространения природного пожара на основе данных о метеорологических условиях, типах и состоянии горючих материалов, рельефе местности.

Получение данных о состоянии наземных экосистем, необходимых для настройки, верификации и использования моделей, потребовало создания нового программного комплекса локально-адаптивного глобального картографирования. Данный программный комплекс позволил решить проблему автоматизации картографирования и оценивания многолетней динамики земного покрова на больших территориях, и, таким образом, обеспечил регулярное поступление актуальных данных для моделирования наземных экосистем.

Регионально адаптированные к условиям России модели наземных экосистем позволяют проводить оценку их состояния и динамики с использованием ограниченного набора данных, оперативно доступных для всей территории страны. Важность решения задач мониторинга наземных экосистем и практической сложности его проведения другими методами служит обоснованием **актуальности** диссертационной работы.

Современное состояние исследований в данной области. Вопросам моделирования динамики наземных экосистем и возмущающих воздействий в них (пожаров), в том числе и с использованием спутниковых данных, посвятили свои труды многие отечественные и зарубежные ученые: С.В. Веневский, А.М. Гришин, Г.А. Доррер, А.С. Комаров, Н.М. Чебакова, С.И. Чумаченко, F.A. Albin, M.A. Finney, P. Cox, W. Cramer, J. Mandel, I.C. Prentice, M. Rochoux, R.C. Rothermel, S. Sitch, K. Thonicke. Но существующие модели наземных экосистем обычно проверяются на ограниченном количестве примеров или не адаптированы для использования на территории России, что затрудняет их применение для оценки и прогнозирования динамики наземных экосистем в масштабах страны.

Цель и задачи исследований. Целью проведенных исследований являлась разработка численных методов, имитационных моделей и комплексов программ для исследования и прогнозирования динамики наземных экосистем на основе интеграции данных спутникового мониторинга, которые позволят повысить эффективность решения

задач управления природными ресурсами и охраны окружающей среды. Достижение вышеуказанной цели диссертационной работы потребовало решения следующих задач исследований и разработок:

- анализ математических моделей динамики растительного покрова, обеспечивающих потенциальную возможность мониторинга и прогноза состояния наземных экосистем путем ассимиляции спутниковых данных ДЗЗ;
- анализ возможностей использования спутниковых данных ДЗЗ для картографирования и мониторинга растительного покрова;
- разработка многопоточного программного комплекса LAGMA-PLUS (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm PLUS) для решения задач глобального спутникового картографирования и оценивания характеристик наземных экосистем на основе спутниковых данных ДЗЗ;
- региональная адаптация моделей динамики растительного покрова на основе интеграции данных спутникового мониторинга, обеспечившая качественное повышение достоверности результатов моделирования на территории России;
- региональная параметризация имитационной модели распространения пожара на основе данных спутникового мониторинга динамики очагов горения;
- разработка алгоритма вероятностного прогнозирования развития природных пожаров на основе метода Монте-Карло с ассимиляцией данных спутникового мониторинга в модель распространения кромки горения;
- разработка алгоритма оперативного уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в имитационную модель динамики распространения огня;
- программная реализация системы оперативной оценки и прогнозирования динамики лесных пожаров на основе регионально параметризованной математической модели их развития и результатов спутникового детектирования очагов горения.

Методы исследований. В работе использованы численные методы, методы математического моделирования, методы дистанционного зондирования Земли, методы статистического анализа, методы классификации изображений, методы оптимизации и прикладного программирования.

Научная новизна работы.

1 Впервые на основе данных спутникового картографирования растительного покрова проведена региональная параметризация глобальной модели его динамики, позволившая существенно повысить достоверность результатов моделирования на территории России;

2 Разработана модификация глобальной модели динамики растительности, позволяющая учитывать процессы конкуренции за свет между растениями, влияние климатических факторов на формирование тундры, существенно повысившая достоверность результатов моделирования;

3 Разработана регионально адаптированная и параметризованная на основе данных спутникового мониторинга модель динамики природного пожара, обеспечивающая

возможность оперативного моделирования распространения огня на всей территории России с использованием информации спутниковых и метеорологических наблюдений;

4 Предложен новый алгоритм оперативного уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в имитационную модель динамики распространения огня.

Основные защищаемые результаты.

1 Регионально адаптированная на основе результатов спутникового картографирования и модифицированная (учет конкуренции за свет между деревьями и климатических факторов формирования тундры) глобальная модель динамики растительности, обеспечивающая повышение качества результатов моделирования;

2 Регионально адаптированная модель динамики природного пожара и комплекс программ, обеспечивающие возможность оперативного детерминистического и стохастического (методом Монте-Карло) прогнозирования распространения огня на территории России по данным спутниковых и метеорологических наблюдений;

3 Алгоритм оперативного уточнения оценки положения фронта пожара на основе ассимиляции результатов дистанционного детектирования очагов горения в модель динамики распространения огня;

4 Программный комплекс локально-адаптивной классификации и оценивания характеристик земного покрова на основе автоматизированной многопоточной обработки данных дистанционного зондирования, обеспечивающий возможность регулярного спутникового картографирования наземных экосистем на больших территориях.

Практическая значимость. Система оперативного прогнозирования развития очагов горения широко используется в составе Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации (ИСДМ-Рослесхоз).

Программное обеспечение LAGMA-PLUS нашло активное применение в решении задач спутникового картографирования наземных экосистем России, в том числе при создании многолетних рядов карт типов растительного покрова, карт используемых сельскохозяйственных земель, видового состава лесов и запасов стволовой древесины в лесах.

Параметризованная модель динамики растительного покрова позволяет осуществлять прогнозирование состояния наземных экосистем России с учетом различных сценариев климатических изменений.

Соответствие паспорту специальности. Содержание работы соответствует п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 7 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели» и п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования»

Апробация работы. По результатам данной работы было сделано 14 докладов на российских и международных конференциях в Москве, Санкт-Петербурге и Томске. Автор трижды (2011, 2012 и 2014 годы) становился призером конкурса Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» за лучший доклад молодого ученого.

Личный вклад. Автор лично разработал программное обеспечение модели распространения природных пожаров и метода ассимиляции в нее данных спутникового мониторинга, а также осуществил региональную адаптацию моделей динамики наземных экосистем. Автор лично выполнил работы по развитию алгоритма LAGMA и разработке программного комплекса LAGMA-PLUS для многопоточной обработки данных дистанционного зондирования с целью локально-адаптивной классификации и оценивания характеристик земного покрова.

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано более 20 печатных работ, в том числе 7 научных статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 153 наименования, и приложений. Объем диссертации составляет 151 страницу машинописного текста, 22 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена аналитическому рассмотрению существующих методов дистанционного зондирования и моделей динамики наземных экосистем.

Рассмотрены физические принципы и методы спутникового мониторинга процессов в наземных экосистемах. Представлен обзор методов классификации спутниковых изображений. Отмечена необходимость использования локально-адаптивных методов в задачах мониторинга растительного покрова на континентальном и глобальном уровнях.

Проанализированы физические принципы и методы спутникового мониторинга природных пожаров. Отмечена необходимость проведения максимально частых и регулярных наблюдений природных пожаров, обуславливающая широкое использование для этих целей в настоящее время спутниковых аппаратов низкого пространственного разрешения.

Приведена классификация и рассмотрены примеры моделей наземных экосистем и возмущающих воздействий на них различных факторов, к числу которых, в частности, относятся и природные пожары. Показано, что существующие модели в целом способны адекватно воспроизводить процессы в наземных экосистемах.

Выполнен анализ различных методов интеграции данных спутникового мониторинга в модели наземных экосистем. Отмечено отсутствие универсального, одинаково эффективного для всех оптимизационных задач, подхода.

Во **второй главе** описан метод и результаты региональной адаптации к условиям России глобальной модели динамики растительного покрова SEVER.

Модель SEVER (модификация модели LPJ) описывает процессы в десяти различных функциональных типах растительности на уровне клеток с пространственным разрешением $0,5^\circ$, воспроизводя динамику осредненного индивида каждого типа посредством имитации ключевых процессов, отвечающих за водный баланс, эвапотранспирацию, фотосинтез, дыхание, размножение, конкуренцию за свет, процессы смертности от старения, водного и температурного стресса, выхода за пределы допустимых климатических условий.

В диссертационной работе проведено сравнение модельного прогноза пространственного распределения типов растительности и полученной по данным дистанционного зондирования карты растительного покрова России. Для сравнения использовался критерий, основанный на коэффициентах корреляции между долями типов растительности в клетках модели, взвешенных на площадь клетки. Значение итогового критерия сходства основано на сумме квадратов корреляций для всех типов растительности. Анализ результатов моделирования, полученных для территории России с использованием исходной версии глобальной модели SEVER, показал наличие существенных ошибок моделирования в зоне тундры, горных регионах, а также в лесах при оценке соотношения хвойных и широколиственных пород.

Проведенная в рамках диссертационной работы модификация алгоритма описания процессов конкуренции растительности за свет позволила значительно повысить достоверность результатов моделирования в лесных экосистемах. Пропорциональное выживание растительности в результате конкуренции за свет было заменено на взвешенную

выживаемость с весами вида $\omega_i = A \frac{(h_i - \bar{h})}{\bar{h}}$, где A – эмпирическая константа, значение которой первоначально было принято равным 10 и в дальнейшем оптимизировано, h_i – высота среднего индивида для данного типа и \bar{h} – средняя высота для всех типов растений в клетке.

В модель была добавлена имитация тундровых экосистем. Влияние сильных ветров, низких температур и тонкого снежного покрова, суммарно приводящих к формированию тундры, было выражено в виде климатических ограничений:

$$min = \begin{cases} \text{тундра}, & TC(i, j) > 0,5 \\ \text{нетундра}, & TC(i, j) \leq 0,5 \end{cases}; \quad (1)$$

$$TC(i, j) = f(x_{\text{макс.ветер}}) * (1 - f(x_{\text{макс.температура}})) * (1 - f(x_{\text{макс.снежпокров}})); \quad (2)$$

$$f(x_i) = \begin{cases} 0, & x_k < X_k^{\min} \\ \frac{(x_k - X_k^{\min})}{(X_k^{\max} - X_k^{\min})}, & X_k^{\min} \leq x_k \leq X_k^{\max}; k \in \left\{ \begin{array}{l} \text{макс.ветер} \\ \text{макс.температура} \\ \text{макс.снеж.покров} \end{array} \right\} \\ 1, & X_k^{\max} < x_k \end{cases}, \quad (3)$$

где i, j – индексы клетки. Климатические лимиты X_k^{\min} , X_k^{\max} для каждого параметра x_k в этих уравнениях оптимизированы поиском по сетке с целью максимизации точности модельной оценки доминирующего типа растительности в зоне тундры.

Для учета особенностей произрастания растительности в горных условиях в климатические данные модели был введен отрицательный климатический градиент,

зависящий от перепада высот внутри клеток модели. Изначально значение этого коэффициента было выбрано равным 6°C на 1 км, а затем оптимизировано.

Для региональной оптимизации параметров модели использовался описанный ранее критерий сходства между результатами моделирования и картой растительного покрова. Параметризация модели динамики растительного покрова проводилась для параметров, наиболее существенно влияющих на пространственное распределение типов растительности, и была выполнена в два этапа.

Первый этап оптимизации использовал эвристический метод EGO (Efficient Global Optimisation) для поиска глобального оптимума значений параметров. Ввиду вычислительной трудности задачи поиска глобального оптимума на первом этапе использовалась выборочная оценка точности модели на 5% клеток регулярной сетки. На втором этапе для полной оценки точности и локального поиска оптимума модели использовался алгоритм BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno).

Первый этап оптимизации дал значительное (33%) увеличение формального критерия сходства при полуторакратном (в сравнении со вторым этапом) сокращении вычислительного времени. Второй этап оптимизации, при незначительном увеличении величины формального критерия сходства, гарантировал нахождение локального оптимума значений параметров модели.

Параметризация глобальной модели динамики растительного покрова и улучшенные подходы к описанию ряда процессов качественно повысили достоверность восстановления пространственного распределения типов растительного покрова в зоне тундры и всей лесной полосе России, приблизили соотношения между широколиственными, вечнозелеными и листопадными лесами к их реальным значениям (Таблица 1, Рисунок 1). Фактическое отсутствие спрогнозированных моделью широколиственных лесов на юго-западе России может объясняться их исчезновением в исторической ретроспективе в результате вырубок и последующего активного использования земель региона в сельскохозяйственных целях.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции в клетках модели между значениями доли площади типов растительного покрова по результатам моделирования и спутникового картографирования

	Хвойные вечнозеленые леса	Хвойные листопадные леса	Широколист- венные леса	Травянистая растительность	Значение критерия сходства
Исходная модель	0.48	0.39	0.0	0.34	0.50
Адаптированная модель	0.44	0.63	0.35	0.29	0.80
Оптимизация	0.55	0.60	0.42	0.50	1.09

В **третьей главе** описана система оперативной оценки и прогнозирования развития природных пожаров, основанная на интеграции данных дистанционного зондирования в модель распространения огня.

Прогнозирование динамики природных пожаров на основе моделирования их развития требует получения оперативных данных об условиях горения, что в масштабах

России может быть обеспечено только с помощью данных ДЗЗ, и что, в свою очередь, обуславливает важность развития методов их интегрирования в модели.

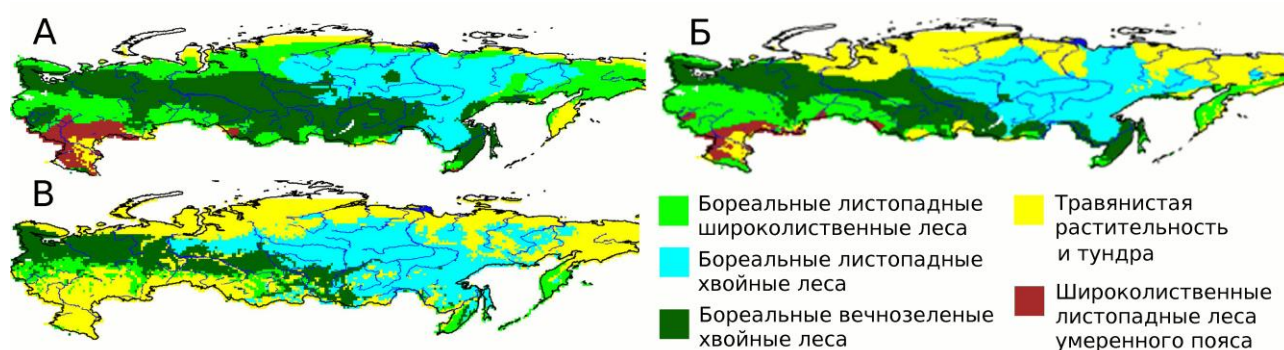


Рисунок 1 – Сравнение пространственного распределения доминирующих типов растительного покрова по данным А) исходной модели SEVER Б) адаптированной модели SEVER и В) спутниковой карты растительного покрова России

В работе создано программное обеспечение моделирования распространения пожара, основанное на уравнениях, используемых в Канадской системе прогноза поведения лесных пожаров CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System). Фронтальная скорость распространения пожара в модели зависит от рельефа, типа горючих материалов и метеорологических условий:

$$ISI = e^{0.05039 * W} * f(FFMC); \quad (4)$$

$$RSI = a_1(1 - e^{-b_1 * ISI})^{c_1}, \quad (5)$$

где RSI – скорость фронта (км/ч), W – скорость ветра, a_1, b_1, c_1 – константы, зависящие от типа горючих материалов, и функция их влажности $f(FFMC)$, определяемая по осадкам, температуре и влажности воздуха за предшествующий период.

Форма пожара в модели описывается эллипсом, соотношение осей которого зависит от силы ветра по формуле:

$$LB = 1.0 + a_2 * (1 - e^{-b_2 * W}), \quad (6)$$

где LB – соотношение осей эллипса, W – скорость ветра и a_2, b_2 – константы.

Система осуществляет моделирование пожара на регулярной сетке с размером клеток 30 метров. Каждая клетка сетки может принимать в некоторый фиксированный момент времени одно из состояний следующего ограниченного набора: территория активного горения, территория завершеного горения, территория возможного горения, территория невозможного горения (отсутствуют горючие материалы). Для каждой клетки в состоянии активного горения строится эллипс, и рассчитываются скорости фронтального и бокового распространения пожара, определяющие пройденную им область за заданный временной интервал. Клетки территории возможного горения, центры которых пройдены пожаром, переходят в состояние активного горения и учитываются при дальнейшем моделировании. Моделирование происходит итеративно, на каждой итерации время модели переводится на ближайший момент возгорания новой клетки, пройденное огнем расстояние и время возгорания других клеток обновляются с учетом появления нового источника горения.

Необходимая для моделирования информация об условиях горения получена по ряду информационных продуктов, основанных на данных ДЗЗ, включая: карты растительного покрова и запасов стволовой древесины в лесах, разработанные в Институте космических исследований РАН, цифровую модель рельефа ASTER и маску водных объектов. При моделировании использовалась фактическая и прогностическая метеоинформация (данные о скорости и направлении ветра, количестве осадков, температурах воздуха и точки росы) поставляемая Гидрометеоцентром России на регулярной сетке с пространственным разрешением 0,25 градуса и временным шагом 3 часа.

В качестве исходной (стартовой) области активного горения для проведения прогностического моделирования используются результаты детектирования действующих пожаров (hot-spot) по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км. Детектированные очаги относятся к текущей области активного горения, если момент их детектирования произошел не более чем за 24 часа до начала моделирования, а закончившие горение очаги относятся к пройденной огнем площади.

Оценка точности модельного прогноза пожара также выполнена на основе результатов детектирования действующих пожаров по данным спутникового мониторинга. Формальное значение ошибки моделирования основано на сравнении прироста площади пожара за период 1-2 суток по данным спутниковых наблюдений и по модельному прогнозу. Для обеспечения сопоставимости при проведении сравнения пространственное разрешение модели огрублялось до разрешения спутниковых данных. Общее качество модели было оценено по данным более чем 60000 спутниковых наблюдений динамики лесных пожаров площадью свыше 200 га, полученных в период с 2007 по 2012 годы.

С целью повышения точности моделирования в диссертационной работе проведена региональная параметризация модели с использованием результатов спутникового мониторинга очагов горения в лесах России. Оптимизация проводилась с помощью генетического алгоритма по данным спутниковых наблюдений 300 случайно выбранных пожаров.

Проведенная процедура оптимизации параметров модели позволила в 6-9 раз сократить ошибку прогноза динамики пожаров, действовавших в различные годы на территории России (Таблица 2).

Таблица 2

Средняя ошибка модельного прогноза прироста площади пожара по отношению к приросту, полученному по данным ДЗЗ об очагах горения

Среднее отклонение прогноза	Годы					
	2012	2011	2010	2009	2008	2007
До оптимизации	-	321%	920%	600%	483%	492%
После оптимизации	70%	72%	75%	66%	66%	70%
После оптимизации, пожары больше 500 га	60%	52%	64%	52%	51%	54%

Для стохастического прогнозирования развития пожаров использовался метод Монте-Карло, основанный на получении множества реализаций случайного процесса, в каждой из которых его вероятностные составляющие заменяются их реализациями. При моделировании развития пожара методом Монте-Карло на каждой реализации случайно выбираются значения стохастических элементов модели - погрешностей в скорости и направлении ветра, количестве осадков и линейной компоненте скорости распространения пожара. На основании этих погрешностей строится детерминистический прогноз, представляющий собой регулярную сетку, на которой указаны клетки, перешедшие в состояние активного горения за период моделирования. Совмещение множества прогнозов позволяет построить карту вероятностей достижения пожаром окрестных территорий. Для этого в каждой клетке сетки подсчитывается число реализаций, для которых детерминистический прогноз показал переход клетки в состояние горения, и делится на общее число всех реализаций (рисунок 2).

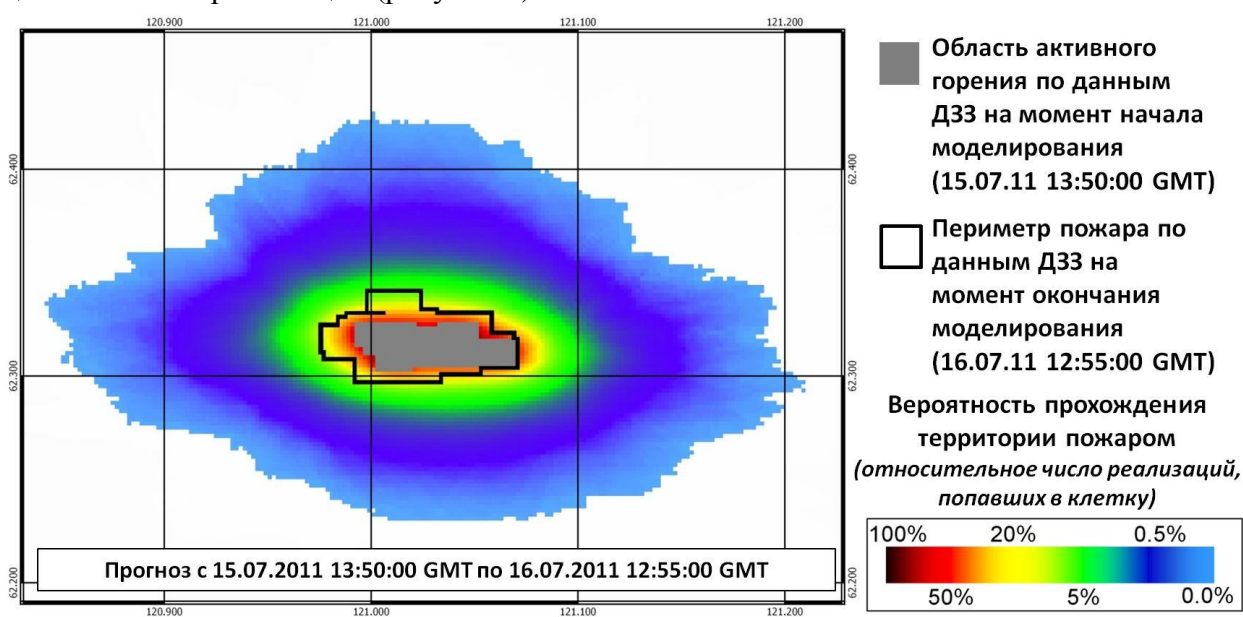


Рисунок 2 – Пример вероятностного прогноза развития пожара в сравнении с его фактическим периметром по данным спутниковых наблюдений

Для анализа точности модели проведен массовый вычислительный эксперимент, в ходе которого осуществлено моделирование динамики 660 пожаров в лиственных лесах Сибири и Дальнего Востока, имевших место в 2011-2013 годах. Для оценки точности клетки с одинаковой модельной оценкой вероятности были сгруппированы и пересекались с контуром фактически пройденной пожаром территории по данным ДЗЗ. В предположении идеально точной модели фактически пройденная пожарами территория должна быть строго пропорциональна значениям их вероятности. То есть половина клеток со значениями вероятности 50% должна быть пройдена реальными пожарами, также как и 1/10 часть числа клеток со значениями вероятности 10% и т.д. Результаты оценки приведены на рисунке 3, отражающем средние величины частот попадания фактических пожаров в клетки с соответствующими им значениями вероятности, заданными с фиксированным шагом. Из графика видно, что точки, соответствующие модельной оценке вероятности и фактической

частоте достаточно близки к линии $y=x$, что свидетельствует об адекватности результатов моделирования.

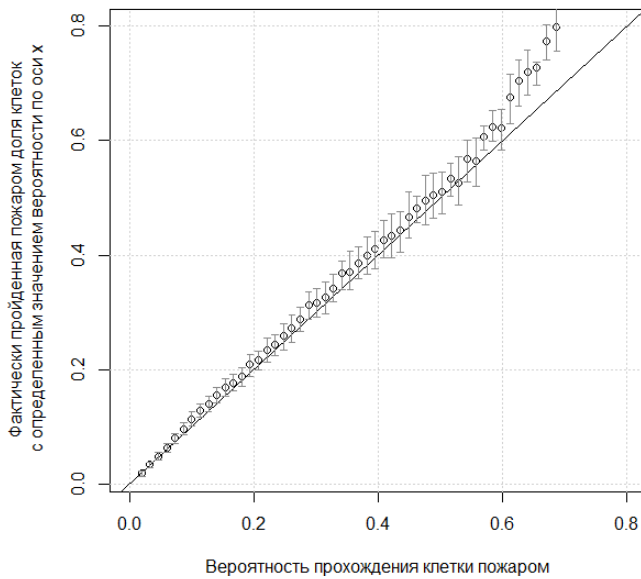


Рисунок 3 – Диаграмма соответствия модельной оценки вероятности и фактически пройденной пожаром доли клеток с данным значением вероятности. Точками отмечены средние значения доли площади, пройденной пожаром, вертикальными линиями – величина ее стандартного отклонения. Сплошной прямой обозначен график линии $y=x$.

Низкое пространственное и временное разрешение может привести к существенным погрешностям в оценке области активного горения по данным спутникового мониторинга. Оценка такого рода погрешностей и уточнение прогноза поведения пожара может быть достигнуто с помощью методов ассимиляции данных в модель. В работе предложен подход к ассимиляции данных детектирования очагов горения в модель динамики природных пожаров.

На первом этапе уточнения периметра пожара осуществляется моделирование динамики распространения огня, что позволяет связать модельные пиксели, из которых распространяется пожар, с точками активного горения по спутниковым данным, куда может перейти пожар в результате моделирования. Затем в каждом модельном пикселе вводится один из корректирующих коэффициентов - множитель скорости распространения пожара и дополнительный вектор ветра. Их значения настраиваются с целью минимизации ошибки моделирования пожара для одного пикселя. Эта ошибка с одной стороны учитывает максимальное расстояние, пройденное пожаром за пределами области, ограниченной точками активного горения по данным ДЗЗ, и с другой стороны учитывает минимальное расстояние от модельного пожара до фактических очагов горения.

Дополнительно модель осуществляет фильтрацию точек с экстремальными значениями корректирующих коэффициентов или ошибки. Фильтрация пикселя проводится только в том случае, если его очаги горения по данным ДЗЗ могут быть достижимы из других модельных пикселей. В целях повышения вычислительной эффективности моделирование осуществляется только в малой части всех точек периметра пожара, а для остальных значения корректирующих коэффициентов вычисляются интерполяцией.

Уточненный периметр пожара основан на модельном прогнозе динамики огня, использующем полученные значения корректирующих коэффициентов в каждом пикселе. Оперативное уточнение происходит в автоматическом режиме по мере поступления спутниковых данных. Пример уточненного периметра пожара приведен на рисунке 4.

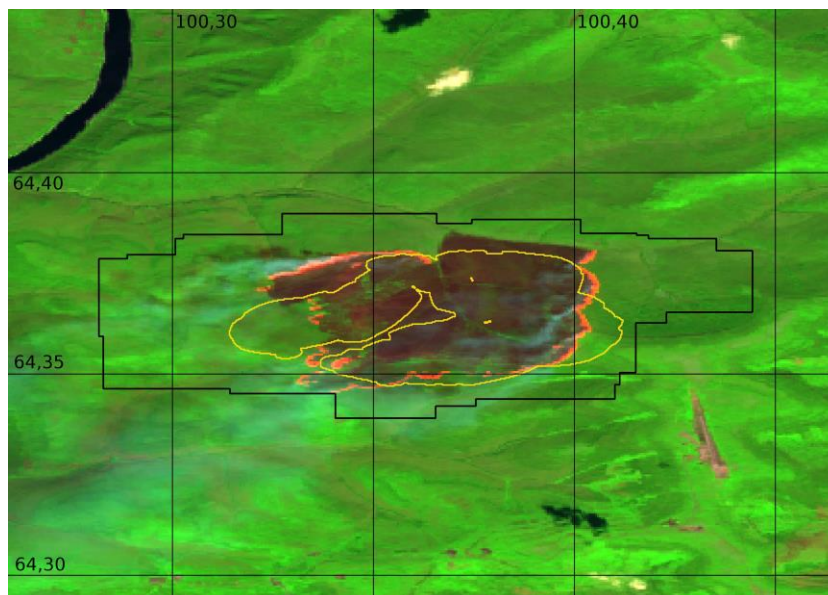


Рисунок 4 – Пример уточненного периметра пожара на 20.07.2014 6:05 GMT (желтая линия) в сравнении с его контуром по данным MODIS (черная линия) на фоне изображения термического фронта по данным OLI-TIRS (красный цвет)

Построенные методом ассимиляции данных уточненные контура очагов горения сопоставлены с изображениями гарей по данным спутников серии Landsat для более чем 200 пожаров 2013 года. Анализ производился с помощью Хаусдорфова расстояния между двумя контурами. В среднем уточненная оценка оказалась расположенной на 200 метров (30%) ближе к контуру гари, построенному по изображениям Landsat, чем контур, полученный по данным MODIS.

Разработанный в рамках диссертационной работы комплекс программ позволяет проводить автоматическую оперативную оценку и прогнозирование динамики развития природных пожаров. Они могут быть использованы для оценки угроз лесным массивам, инфраструктуре и населенным пунктам со стороны близлежащих пожаров и уточнения их последствий. Также модель может быть использована для расчета потенциальных потерь лесных ресурсов от пожаров, что может стать основанием для принятия управленческих решений с учетом экономической целесообразности.

Предложенная технология детерминированного и стохастического прогнозирования развития природных пожаров внедрена в систему ИСДМ-Рослесхоз. Результаты прогнозирования визуализируются в web-интерфейсе системы. Пользователь может изменять параметры модели и ее входные данные для рассмотрения сценариев развития пожаров в разных условиях.

Программное обеспечение модели было реализовано на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio и совместим с ОС Windows. Методы параметризации и часть численных методов вероятностного моделирования были реализованы в виде скриптов на языке R. Интеграция с ИСДМ-Рослесхоз обеспечивается с помощью веб-сервера Apache, передающего запросы из интерфейса пользователя и отправляющего результаты моделирования на сервера системы (<https://nffc.aviales.ru/>).

В четвертой главе приведено описание программного обеспечения (ПО) LAGMA-PLUS локально-адаптивной классификации данных ДЗЗ, обеспечивающего возможность ежегодного спутникового картографирования территории России. Данное ПО обеспечивает регулярное обновление информации о состоянии растительного покрова для настройки и эксплуатации разработанных моделей динамики наземных экосистем.

Лежащий в основе ПО одноименный метод LAGMA использует принцип локализации обучающей выборки, предполагающий, что для классификации в каждой точке используется находящаяся в ее локальной окрестности часть обучающей выборки. В работе предложена формализация метода, применимая для широкого круга алгоритмов классификации и других подходов оценивания характеристик наземных экосистем. В соответствии с ней в каждой точке \mathbf{x} для каждого класса c_i строится свой набор обучающих данных:

$$X_{T,L}(R_i(\mathbf{x}), \mathbf{x}, c_i) = \{\mathbf{x}' \in X_T : d(\mathbf{x}', \mathbf{x}) < R_i(\mathbf{x}), CLASS(\mathbf{x}') = c_i\};$$

$$R_i(\mathbf{x}) = \min_{R_{\min} \leq R < R_{\max} : |X_{T,L}(R, \mathbf{x}, c_i)| \geq N_{\min}}(R),$$

где X_T – обучающая выборка, R_{\max} , R_{\min} , N_{\min} – задаваемые пользователем параметры, $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ – расстояние между точками.

Общая обучающая выборка формируется из наборов для каждого класса:

$$X_{T,L}(\mathbf{R}(\mathbf{x}), \mathbf{x}) = \bigcup_{i=1, \dots, k} X_{T,L}(R_i(\mathbf{x}), \mathbf{x}, c_i),$$

где $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = (R_1(\mathbf{x}), R_2(\mathbf{x}), \dots, R_k(\mathbf{x}))$ – вектор радиусов агрегации выборки в данной точке.

По обучающей выборке строится классификатор, используемый для определения класса в точке: $\tilde{A}_L(\mathbf{x}) = \text{TRAIN}(X_{T,L}(\mathbf{x}))$. Программная реализации LAGMA предполагает использование клеток регулярной сетки вместо точек, а также определяет расстояние между клетками по формуле $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \max_{i=1,2} (|x_i - x'_i|)$.

Разработанный в данной диссертации программный комплекс LAGMA-PLUS является приложением для ОС Windows, реализован на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio, предоставляется в 32 и 64-х битной версии, поддерживает многопоточное выполнение и состоит из библиотек классификации и работы с изображениями. Комплекс реализует различные методы классификации, оценивания характеристик растительности и вывода вспомогательной информации по результатам анализа.

ПО LAGMA-PLUS было использовано для построения карт растительного покрова России, карт преобладающих пород лесов, карты пахотных земель и озимых, карты запасов стволовой древесины в лесах России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа содержит новые результаты исследований автора по разработке систем имитационного моделирования динамики наземных экосистем на основе

интеграции в математические модели результатов обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Автором предложены две регионально адаптированные имитационные модели наземных экосистем: глобальная модель динамики растительного покрова SEVER и имитационная эмпирическая модель распространения природных пожаров CFFBPS. Точность адаптированных моделей была проанализирована на основании данных ДЗЗ, что показало существенное повышение качества их работы на территории России после параметризации.

Выполненная автором разработка программного обеспечения LAGMA-PLUS позволила создать карты растительного покрова страны, необходимые для использования в качестве входных данных в моделях динамики наземных экосистем, реализованных в диссертационной работе. Автор разработал систему оперативного прогнозирования развития очагов горения, основанную на интеграции результатов их спутникового мониторинга в регионально адаптированную модель динамики природных пожаров. Кроме того, в диссертационной работе предложен и реализован алгоритм оценки динамики природных пожаров на основании имитационной модели их развития с ассимиляцией данных спутникового мониторинга очагов горения. Оба подхода апробированы на территории России и показали способность адекватно воспроизводить динамику природных пожаров, наблюдаемую по данным ДЗЗ.

Созданный в рамках диссертационной работы программный комплекс прогнозирования развития пожаров интегрирован в информационную систему ИСДМ-Рослесхоз, позволяющую прогнозировать развитие любого пожара на территории России с получением результатов через картографический web-интерфейс системы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполненных в диссертационной работе исследований получены следующие основные результаты:

1 Выполнена региональная адаптация глобальной модели динамики растительности, обеспечивающая повышение качества моделирования пространственного распределения растительного покрова;

2 Выполнена региональная адаптация модели динамики природного пожара и создан комплекс программ, обеспечивающие возможность оперативного автоматического моделирования распространения огня на всей территории России.

3 Разработан и реализован алгоритм оперативного уточнения динамики природных пожаров на основе моделирования их распространения с ассимиляцией результатов дистанционного детектирования очагов горения. Алгоритм обеспечивает повышение точности оценки положения фронта пожара в среднем на 30% по сравнению с данными оперативного спутникового мониторинга пожаров;

4 В составе информационной системы ИСДМ-Рослесхоз создан блок моделирования динамики природных пожаров, предоставляющий пользователям

возможность детерминистического и стохастического прогнозирования развития пожаров на всей территории России.

5 Проведена разработка программного комплекса локально-адаптивной классификации и оценивания характеристик земного покрова LAGMA-PLUS, основанного на автоматизированной многопоточной обработке данных дистанционного зондирования и обеспечивающего возможность регулярного спутникового картографирования наземных экосистем на больших территориях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. *Khvostikov S., Venevsky S., Bartalev S.* Regional adaptation of a dynamic global vegetation model using a remote sensing data derived land cover map of Russia // *Environmental Research Letters*. 2015. Т. 10. №. 12. С. 125.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т.12. № 5. – С. 203-221.
3. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В., Котельников Р.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Ковганко К.А., Колбудаев П.А., Крашенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценок Ф.В., Сычугов И.Г., Флитман Е.В., Хвостиков С.А., Шуляк П.П.* Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т.12. № 5. – С. 222-250.
4. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A.* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // *Remote Sensing Letters*. 2014. Т. 5 № 1. – С. 55-64.
5. *Хвостиков С.А., Вeneвский С.В., Барталев С.А.* Региональная параметризация глобальной модели растительности SEVER на основе ассимиляции спутниковой карты земного покрова России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т.10. № 3. – С.271-285.
6. *Хвостиков С.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А.* Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 3. – С.91-100.
7. *Чумаченко Е.Н., Кулагин В.П., Хвостиков С.А.* Об улучшении качества прогнозирования распространения растительности на территории России по данным космического зондирования (на примере модели SEVER) // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки* 2011 № 4 – С. 76-84

Тезисы докладов на конференциях и семинарах

8. *Хвостиков С.А., Барталев С.А.* Метод ассимиляции данных спутникового детектирования очагов горения в имитационную модель распространения огня с целью уточнения динамики фронта природного пожара // Тринадцатая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов – Москва: ИКИ РАН, 2015. – С. 434.
9. *Хвостиков С.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Технология оперативного прогнозирования и уточнения динамики природных пожаров на основе имитационного моделирования и данных спутникового мониторинга // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Круглый стол. 17 сентября 2015 г. Доклады и выступления. - Москва: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2015. – С. 336-341.
10. *Хвостиков С.А., Барталев С.А.* Вероятностное прогнозное моделирование динамики природных пожаров на основе метода Монте-Карло и данных спутникового мониторинга // Двенадцатая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов – Москва: ИКИ РАН, 2014., 2014. – С. 13.
11. *Khvostikov S.A., Efremov V. Yu., Loupian E.A., Balashov I.V., Bartalev S.A.* Predictive Fire Evolution Modeling Based on Satellite Remote Sensing Data Assimilation // 4th Fire Behavior and Fuels Conference “At the Crossroads: Looking Toward the Future in a Changing Environment”. Program Schedule – St. Petersburg: Russia, 2013. – С. 39.
12. *Хвостиков С.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Результаты опытной эксплуатации блока моделирования распространения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз: возможности и перспективы развития // Одиннадцатая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник тезисов конференции – Москва: ИКИ РАН, 2013. – С. 117.
13. *Хвостиков С.А., Барталев С.А., Уваров И.А.* Развитие алгоритмического и программного обеспечения метода локально-адаптивной классификации LAGMA для решения задач спутникового картографирования земного покрова // Десятая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник тезисов конференции – Москва: ИКИ РАН, 2012. – С. 424.
14. *Хвостиков С.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ершов Д.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А.* Адаптация и калибровка имитационной модели пожара с помощью спутникового мониторинга // Материалы Всероссийской конференции «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 88

Хвостиков Сергей Антонович

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЛЕКСОВ ПРОГРАММ ДЛЯ
ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ
СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.11.2016 г. Печать трафаретная. Усл.п.л. - 1,0
Заказ № 11672. Тираж: 100 экз.
Типография «11-й ФОРМАТ» ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(499) 788-78-56, www.autoreferat.ru, www.avtoreferat.ru