

Методы моделирования динамики распространение природных пожаров и подходы по их интеграции с данными спутникового мониторинга

Хвостиков С.А.

khvostikov@d902.iki.rssi.ru



Природные пожары

Ежегодно природные пожары затрагивают около 4% всей земной растительности. Они могут возникать в различных наземных экосистемах, от Сибирской тундры до тропических джунглей.

Природные пожары многообразны, от медленных, горящих месяцами торфяных, низовых лесных, распространяющихся по подстилке и опаду со скоростями 10 - 100 м/час, и до травяных, скорости которых могут достигать десятков километров в час.



План лекции

1. Физические и химические основы распространения пожара и модели на их основе
2. Факторы, влияющие на развитие пожара. Эмпирические модели
3. Вероятностное моделирование пожаров
4. Данные дистанционного зондирования в моделировании пожаров
5. Методы ассимиляции данных (ДЗЗ) в модели динамики пожаров
6. Глобальные модели пожаров

Химические и физические основы развития пожаров

В основе природных пожаров лежат химические процессы термической деградации горючих материалов (целлюлоза, лигнин):

- Пиролиз
- Горение продуктов пиролиза

Выделяемая энергия идет на нагрев, сушку и пиролиз новых горючих материалов (самоподдерживающийся процесс)

С физической точки зрения развитие пожара определяется процессами теплопереноса:

- Излучение
- Конвекция
- Физический перенос горящих материалов

Нагрев воздуха в результате горения влияет на воздушные потоки в близлежащих областях, что также влияет на процесс теплопереноса.

Физико-химические модели природных пожаров

На основе физических и химических моделей могут быть сформулированы модели:

1. Модели А.М. Гришина – распространение пожара в неоднородной реакционно способной среде, с учетом законов сохранения и переноса массы, энергии, момента в многофазной среде.

Гришин А. М. и др. Математические модели лесных пожаров. – 1981.

2. Модель Г.А. Доррера – пожар как процесс распространения бегущей волны, состоящей из локальных очагов, основанные на балансе тепловой энергии и вещества.

Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. – 2008.

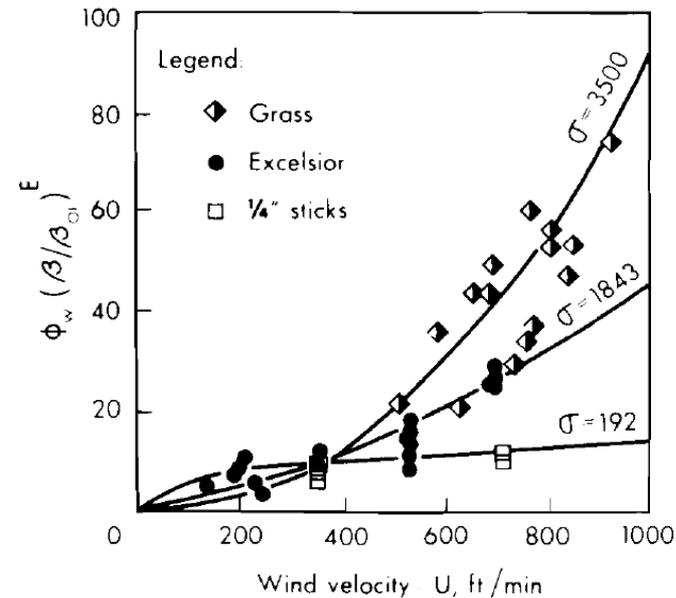
3. WFDS – 3D модель травяных пожаров, учитывающая взаимодействие с атмосферой, включает моделирование турбулентности. Для моделирования 100 с развития пожара потребовалось 44 вычислительных часа.

Mell W. et al. A physics-based approach to modelling grassland fires //International Journal of Wildland Fire. – 2007. – Т. 16. – №. 1. – С. 1-22.

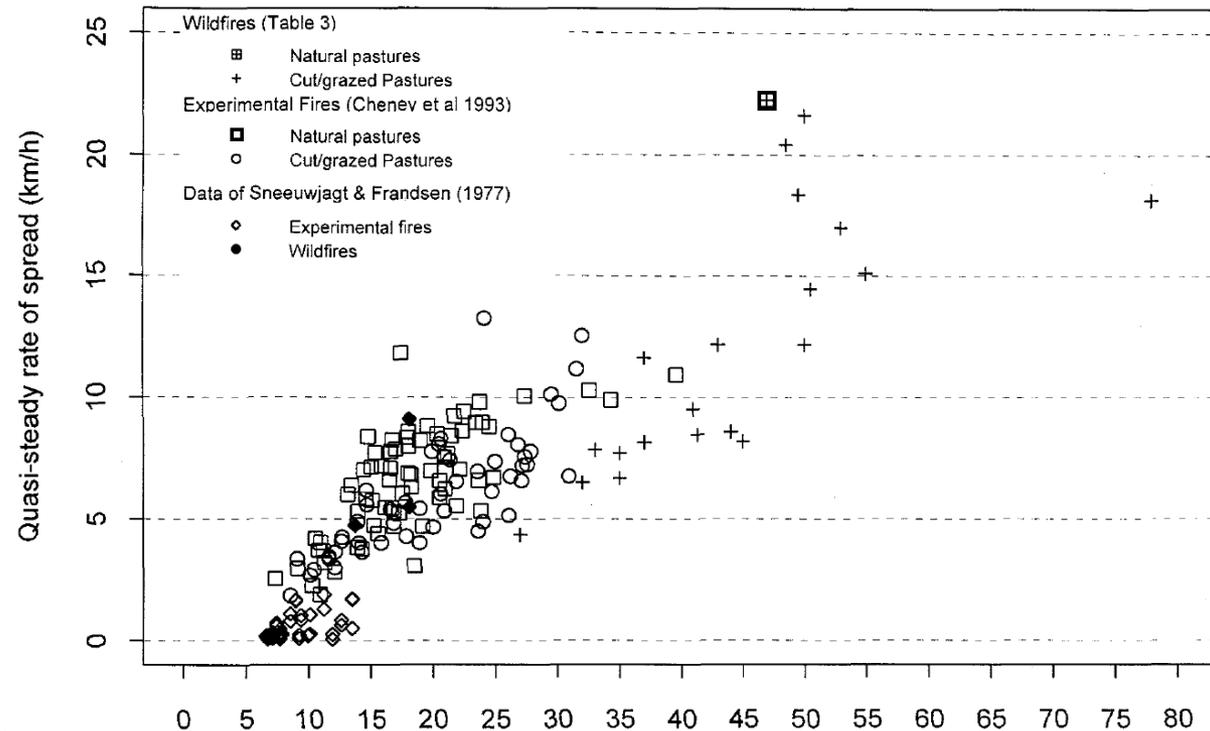
Длительное время расчета физико-химических моделей затрудняет их применение в практических задачах, для решения которых применяют различные упрощенные модели.

Основные процессы в развитии пожаров

На «макроуровне» развитие пожаров зависит от многих факторов. Выполнение множества измерений и экспериментов позволяет установить взаимосвязь между характеристиками пожара и условиями горения. В число таких факторов входит ветер:



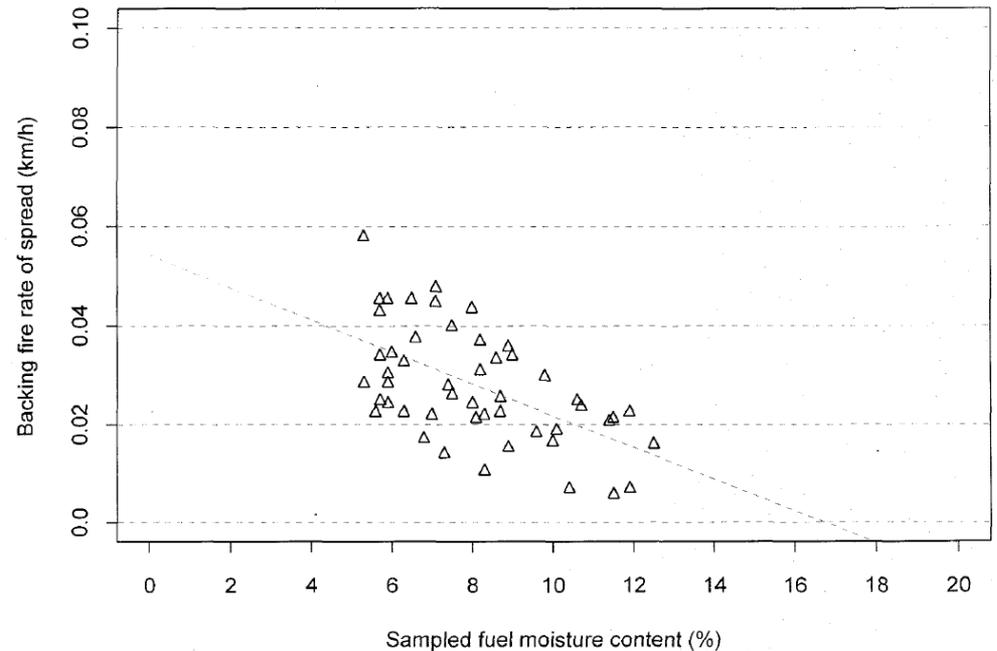
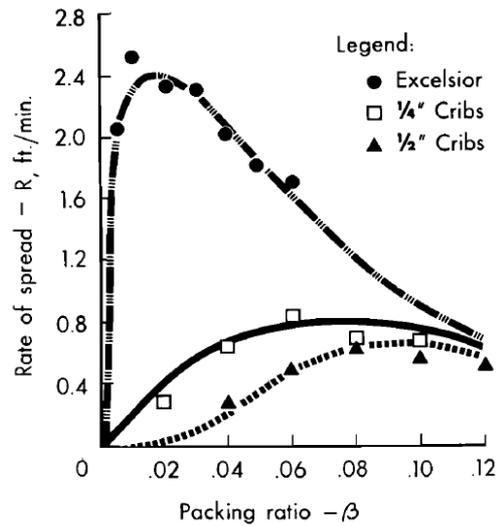
Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels //Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p. – 1972. – T. 115.



Chenev N. P., Gould J. S., Catchpole W. R. Prediction of fire spread in grasslands //International Journal of Wildland Fire. – 1998. – T. 8. – №. 1. – С. 1-13.

Основные процессы в развитии пожаров

Скорость фронтового распространения пожара зависит от состояния топлива и его влажности.

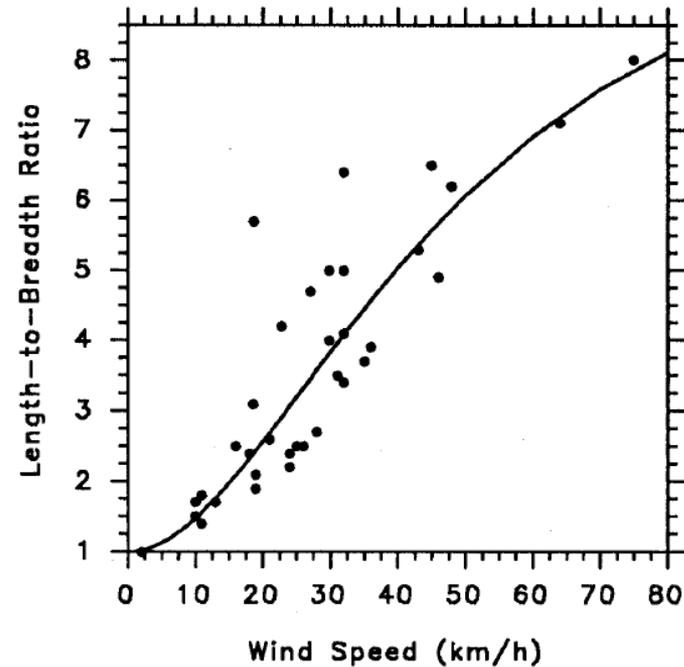
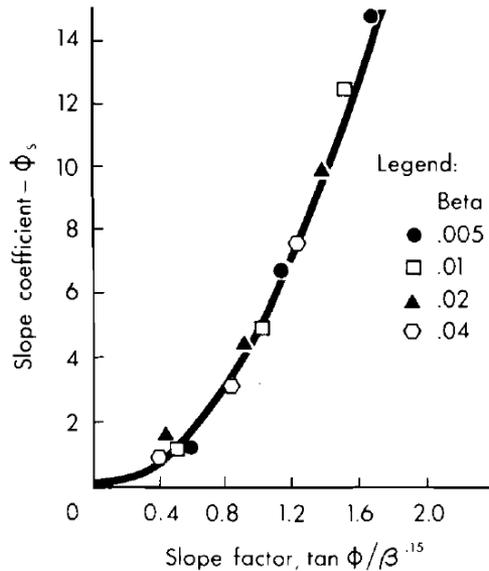


Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels //Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p. – 1972. – T. 115.

Cheney N. P., Gould J. S., Catchpole W. R. Prediction of fire spread in grasslands //International Journal of Wildland Fire. – 1998. – T. 8. – №. 1. – C. 1-13.

Основные процессы в развитии пожаров

На скорость распространения пожара влияет рельеф. Распространение пожара в направлении, несовпадающим с направлением ветра, зависит от силы ветра.



Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels //Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p. – 1972. – T. 115.

Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system //For. Can., Ottawa, Ont. Info. Rep. ST-X-3. – 1992.

Эмпирические модели природных пожаров

На основе полученных зависимостей могут быть построены эмпирические (имитационные) модели пожаров, например:

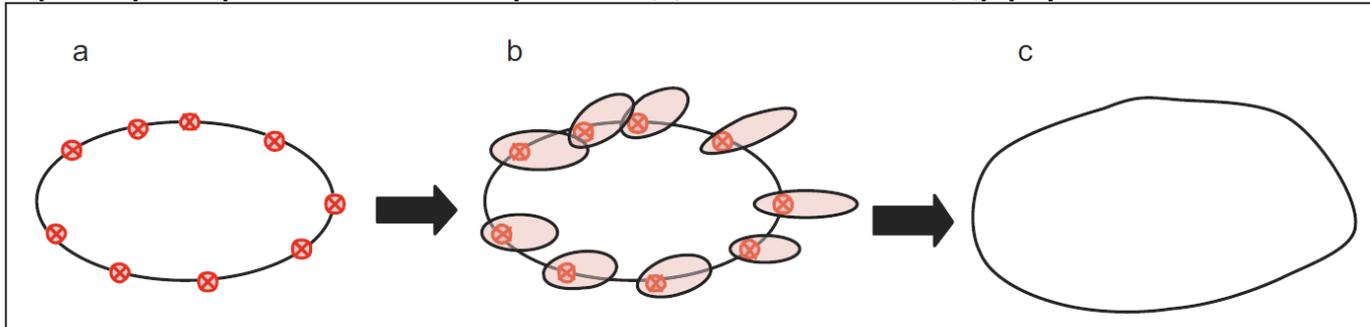
1. Модель (Rothermel 1972), и ее программные реализации: Farsite, Behave. Построена на основе физической аппроксимации влияния характеристик горючего материала на динамику пожара, с эмпирическими коррекциями для учета влияния ветра и рельефа.
2. Модель (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, 1992) и ее реализация Prometheus (Тумстра 2010). Основана на наборе эмпирических уравнений, описывающих зависимость динамики пожара от компонент канадского пожарного индекса.
3. Группа австралийский моделей (Cruz M.G. и др. Assessing improvements in models used to operationally predict wildland fire rate of spread // Environmental Modelling & Software. 2018. Т. 105. С. 54–63). Набор эмпирических моделей, описывающих распространение пожаров в различных экосистемах Австралии.

Моделирование распространения пожара

Две основные схемы моделирования развития: растровая и векторная.

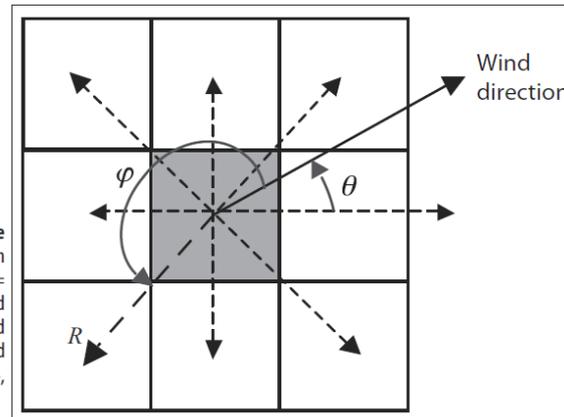
Векторный подход обычно требует установки набора маркеров по периметру пожара, их динамика определяет динамику всего периметра.

Растровая схема описывает распространение на сетке, модель задает правила распространения пожара из одной клетки в другую.



Рисунки взяты из работы Tymstra C., Northern Forestry Centre (Canada). Development and structure of Prometheus the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Edmonton: Northern Forestry Centre, 2010.

Figure 10. Application of Huygens' principle to simulate fire growth. a. Points of origin (vertices) for wave propagation are identified around the fire perimeter (red crossed circles) at time t . b. Elliptical firelet growth over elapsed time Δt (red shaded ellipses) is projected using spread functions. c. The new fire perimeter at time $t + \Delta t$ is drawn as the tangential envelope of the firelets in Fig. 10b.



1.5:1



8 points

Figure 7.

An eight-point cellular automata method to calculate directional rate of spread. φ = angle from the wind direction vector to the vector from the burning cell to an adjacent cell, R = rate of spread in the southwest direction, θ = angle of the wind direction vector. The dashed arrows represent the eight spread directions. The difference between the modeled and actual spread direction can be up to 22.5°, 11.25°, or 5.6° for models with 8-, 16-, and 32-point symmetric adjacency templates, respectively.

Пример эмпирической модели природного пожара



Модель основана на системе Canadian Forest Fire Behavior Prediction System.

Расчет скорости производится по формулам:

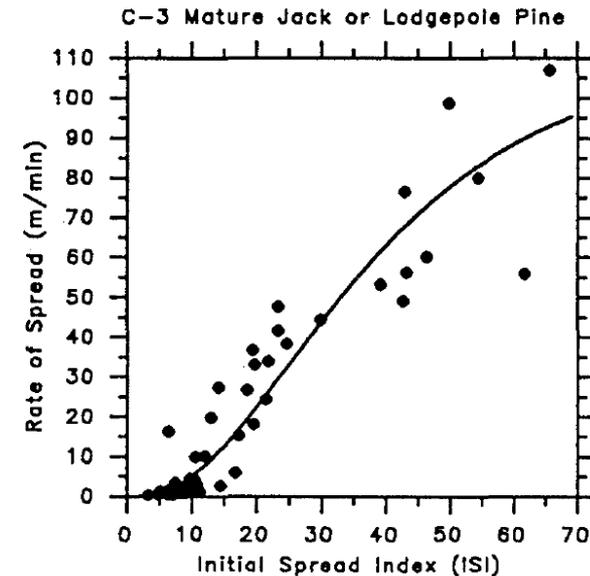
$$\text{коэф_влажности} = a_0 * e^{(-b_0 * \text{влажность})} * (1 + \text{влажность}^{c_0} / d_0)$$

$$\text{индекс_скорости} = e^{0.05039 * \text{ветер}} * \text{коэф_влажности}$$

$$\text{фронтальная_скорость_пожара} = a_1 (1 - e^{-b_1 * \text{индекс_скорости}})^{c_1}$$

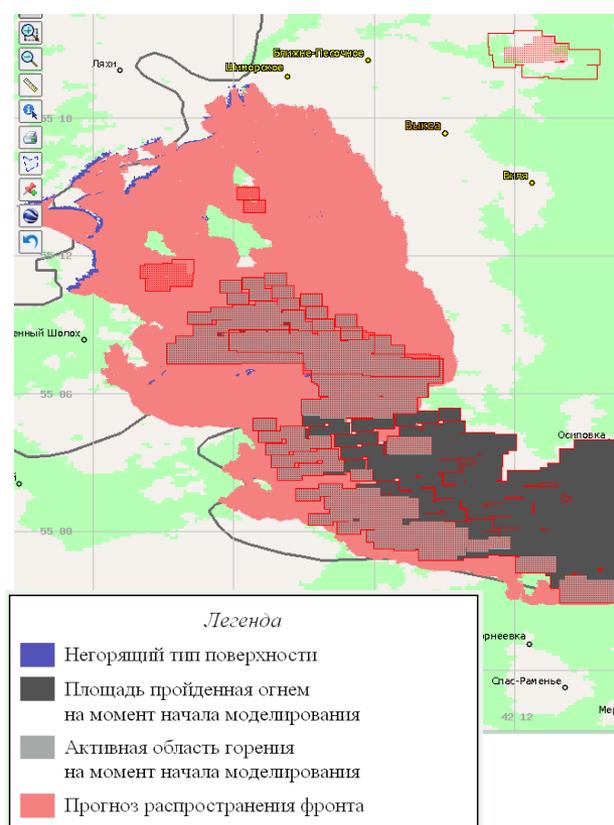
Точечный пожар представлен как эллипс, соотношение его осей рассчитывается как:

$$\text{длина_к_ширине} = 1.0 + a_2 * (1 - e^{-b_2 * \text{ветер}})^{c_2}$$



Примеры результатов моделирования

Результатом моделирования могут быть прирост пожара, изолинии положения фронта пожара в разные моменты времени, интенсивность горения и многие другие характеристики.



ИСДМ-Рослесхоз

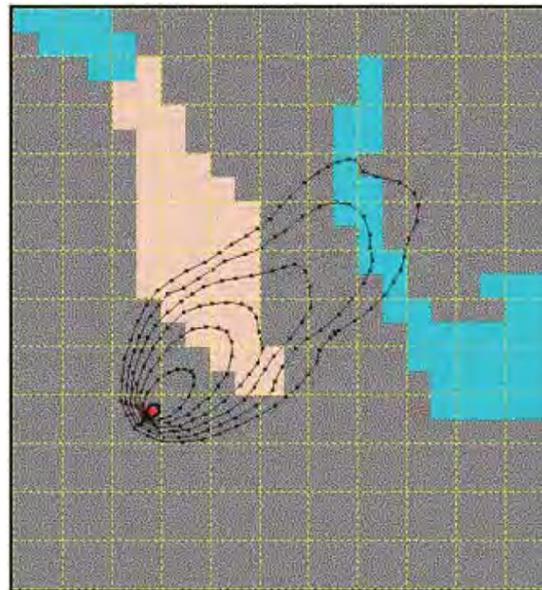
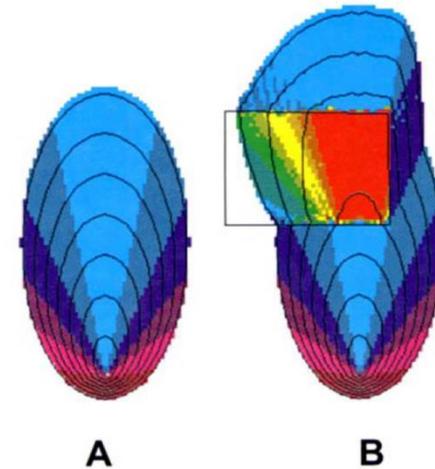
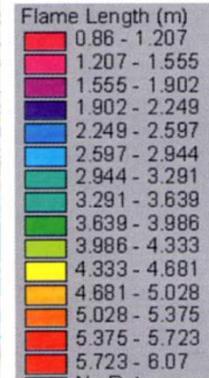


Figure 26. Thirty five-minute simulation output in the Prometheus Map View using a distance resolution of one grid cell (25 m) and a display interval of 5 min. The colors represent different fuel types (gray is C-2, beige is O-1a, and blue is C-1). The red circle represents the ignition point, and the black dots represent the individual vertices along the fire perimeters.

Tymstra C., Northern Forestry Centre (Canada). Development and structure of Prometheus the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Edmonton: Northern Forestry Centre, 2010.



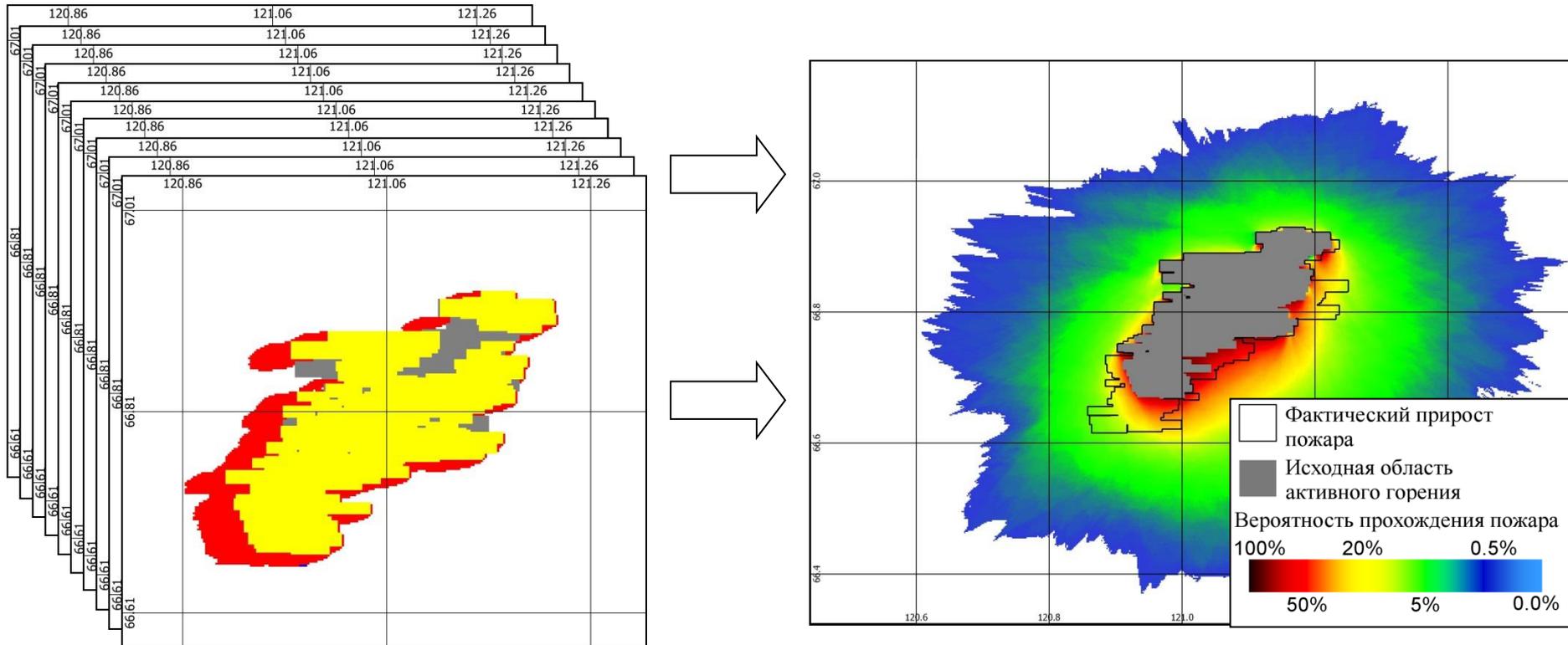
Color plate 6—Surface fire shapes and intensity patterns change when the fire encounters fuel type changes on flat topography and 7 m s⁻¹ open windspeed. (A) No fuel change. (B) Block of faster fuel.

Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Ft. Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998.

Вероятностное моделирование развития пожара

Значительная степень неопределенностей и погрешностей в уравнениях моделей и их входных данных делает возможным применение подходов вероятностного моделирования пожаров.

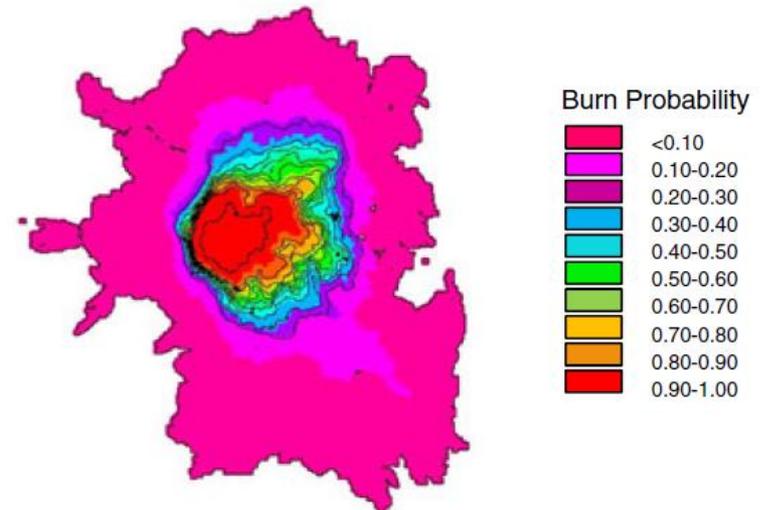
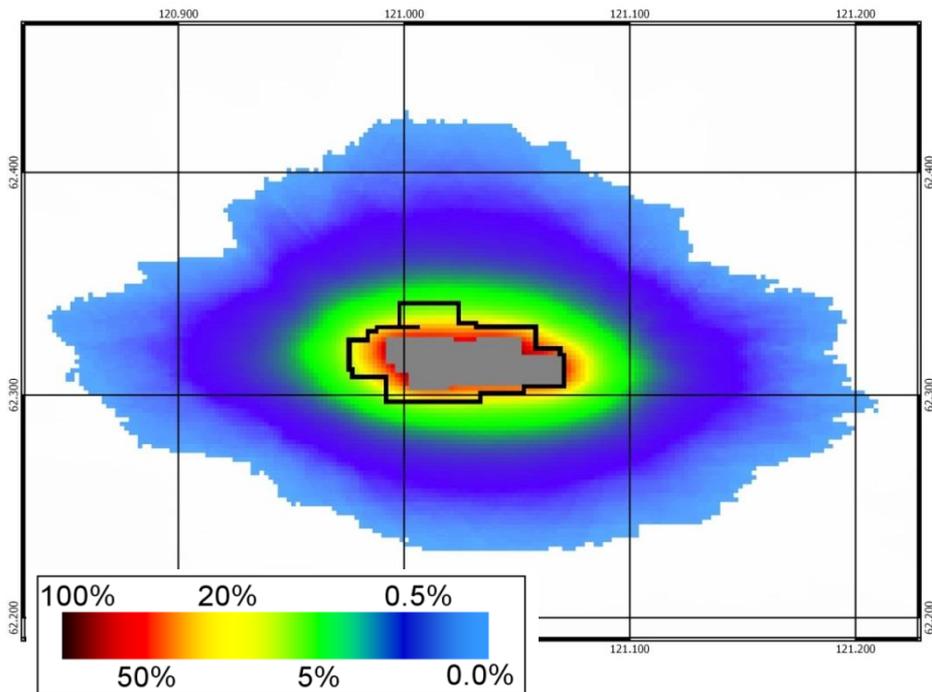
Варьирование входных данных и параметров моделей по методу Монте-Карло позволяет получать вероятностные прогнозы развития пожаров:



Вероятностное моделирование развития пожара

Данный подход моделирования позволяют оценить вероятность достижения пожаром близлежащих объектов.

Вероятностное моделирование может использоваться для оценки угроз со стороны пожаров в условиях больших неопределенностей, или для долгосрочного прогнозирования потенциальных последствий пожаров.



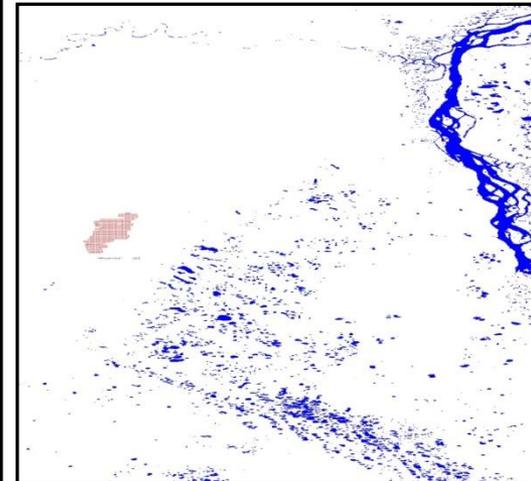
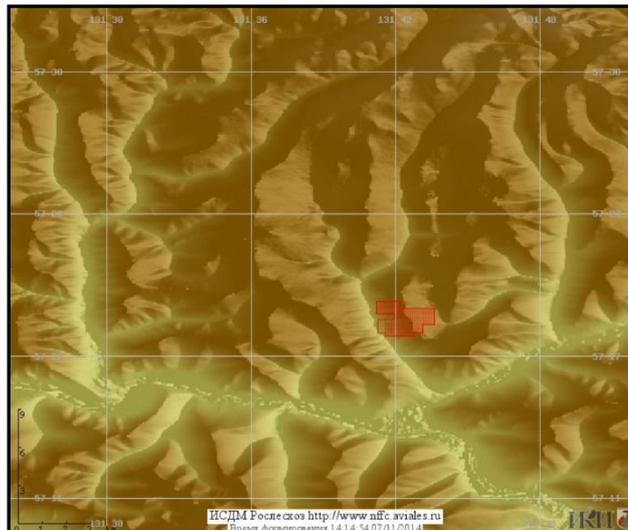
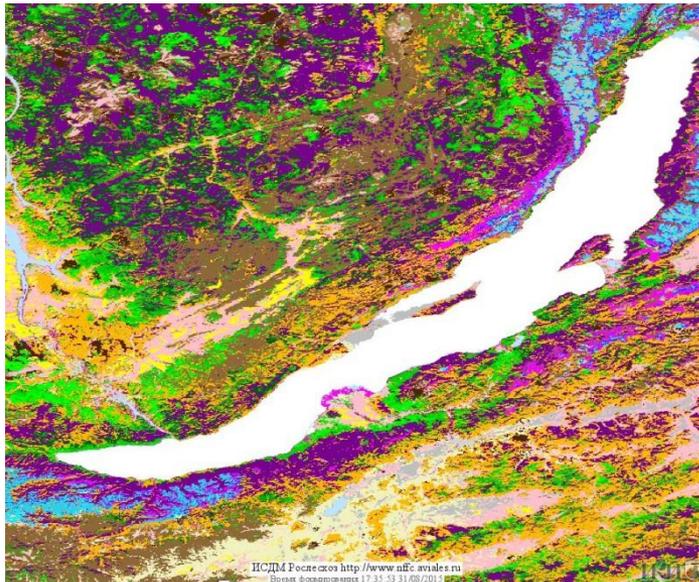
Хвостиков С.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте-Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутникового детектирования очагов горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С.145-156.

Finney M.A. и др. A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation // Environmental Modeling & Assessment. 2011. Т. 16. № 2. С. 153–167.

Спутниковый мониторинг и моделирование пожаров

Данные дистанционного зондирования могут предоставлять необходимую для моделирования информацию об условиях горения:

1. Рельеф (SRTM, ASTER)
2. Маски водных объектов (MODIS)
3. Карты горючих материалов (задача картографирования земного покрова)



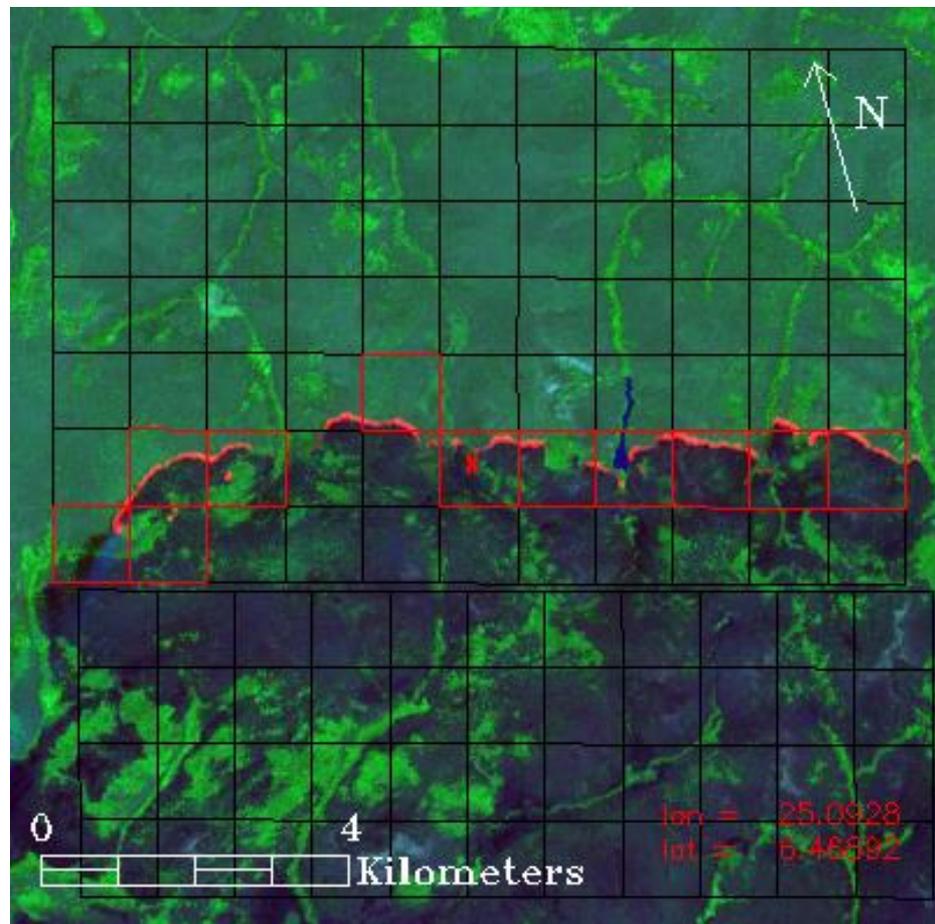
Спутниковый мониторинг природных пожаров

Спутниковый мониторинг природных пожаров предоставляет большой объем данных об их динамике.

В основном данные ДЗЗ представлены:

1. Снимками высокого пространственного и низкого временного разрешения (Landsat, Sentinel 2)
2. Данными низкого пространственного и высокого временного разрешения (MODIS, NPP-VIIRS)

Возможность регулярного получения информации о динамике пожаров по всей территории Земли открывает новые возможности по использованию моделей, их настройке и оценке точности.

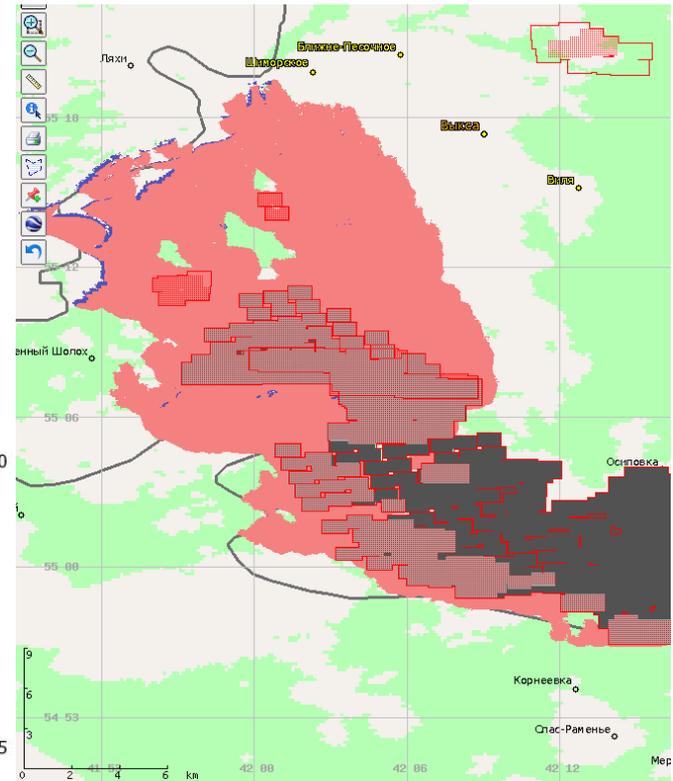
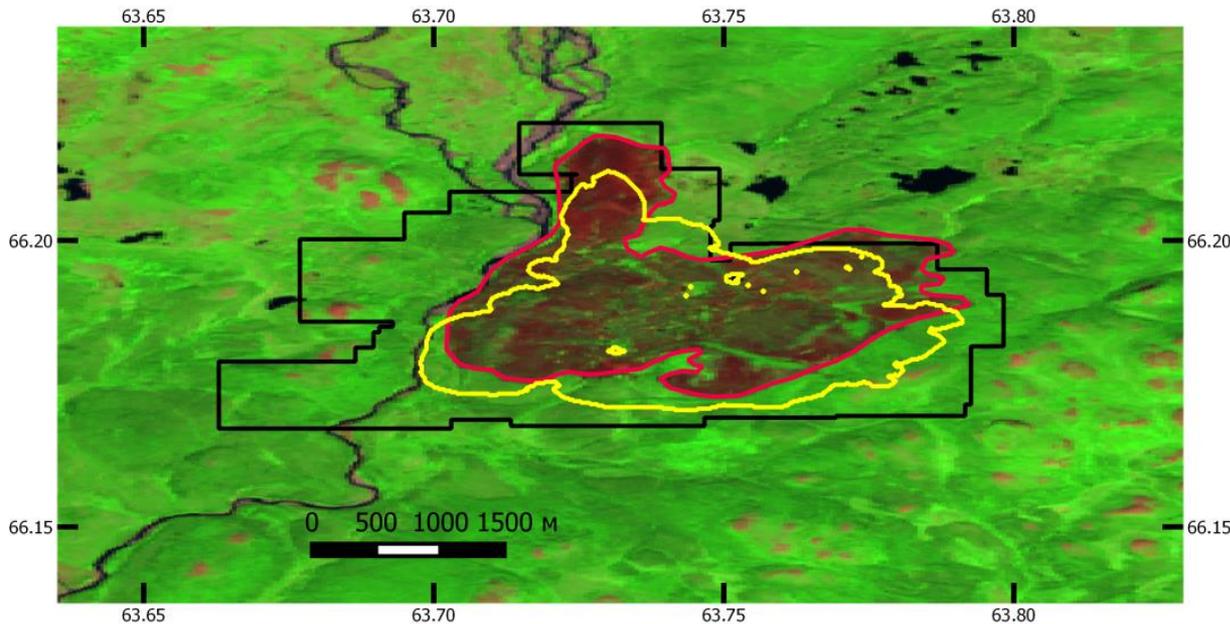


Csiszar I, Schroeder W, Giglio L, Ellicott E, Justice C
VALIDATION OF THE NPP VIIRS ACTIVE FIRE PRODUCT

Спутниковый мониторинг природных пожаров и модели

Данные спутникового наблюдения природных пожаров могут использоваться применительно к моделям распространения огня для:

1. Инициализации начальных условий
2. Сравнения модельных оценок и прогнозов с фактическими данными



Спутниковый мониторинг природных пожаров и модели

Низкое пространственное разрешение оперативных спутниковых данных приводит к необходимости использования специальных метрик:

1. Сравнение со скорректированной площадью (на длительных временных интервалах).
2. Оценка достижения пожаром конкретного пиксела (хотспота)
3. Сравнение расстояния между хотспотами и модельным фронтом
4. Модели переноса излучения

Настройка моделей по данным ДЗЗ

Возможность сравнения модельных прогнозов с архивами спутниковых наблюдений динамики пожаров открывает возможность настройки параметров моделей:

1. Настройки параметров моделей по репрезентативной выборке

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.

2. Настройка параметров моделей для конкретных пожаров

Artès T. и др. Forest Fire Propagation Prediction Based on Overlapping DDDAS Forecasts // Procedia Computer Science. 2015. Т. 51. С. 1623–1632.

Lautenberger C. Wildland fire modeling with an Eulerian level set method and automated calibration // Fire Safety Journal. 2013. Т. 62. С. 289–298.

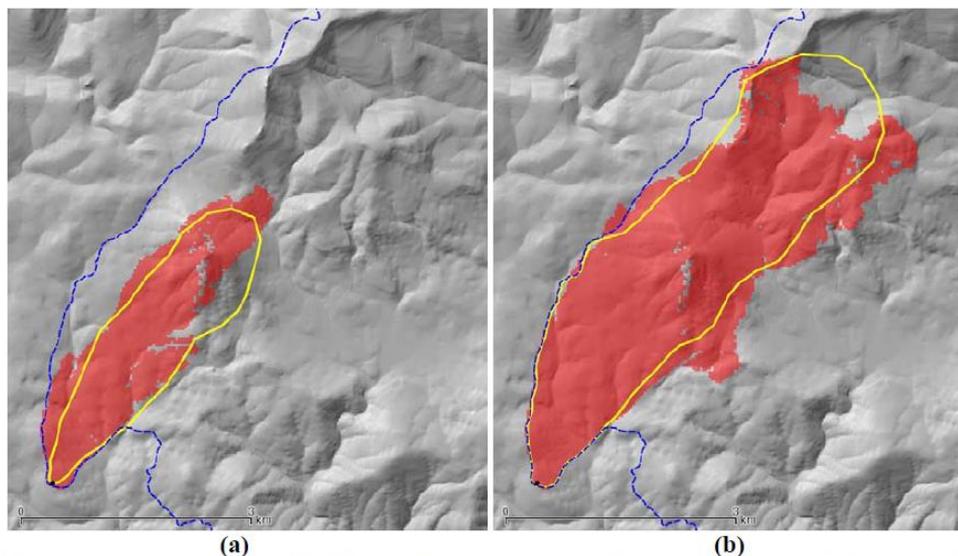


Figure 9. Comparison of simulated and calibration target perimeters. (a) ~7 hours after simulation ignition. (b) ~22 hours after simulation ignition. Yellow line indicates target perimeter and red shaded area indicates simulated burned area. Simulation ignition location indicated by black circle. Dashed blue line is Moonlight Fire final perimeter.

Ассимиляция спутниковых данных в модели

Методы ассимиляции данных позволяют найти наиболее вероятное состояние процесса (развития природного пожара) при наличии модельных и фактических (спутниковых) его оценок, обладающих значительными погрешностями.

Обычно методы ассимиляции предполагает использование критериев вида:

$$E(x) = (x - \mu_{model})\Sigma_{model}^{-1}(x - \mu_{model})^T + (x - \mu_{fact})\Sigma_{fact}^{-1}(x - \mu_{fact})^T$$

При предположении нормального распределения ошибки для модельных и фактических оценок $N(\mu, \Sigma)$

Минимизация критерия по состоянию пожара x дает его оптимальное состояние с учетом модельных и фактических оценок и их погрешностей.

Такая минимизация может выполняться:

- Методами оптимизации
- Методами на основе фильтра Калмана (ансамблевый фильтр Калмана EnKF), основанный на вероятностном моделировании пожара

Схема ассимиляция спутниковых данных в модели

Состояние пожара (x) также может оцениваться на основе векторных и растровых подходов:

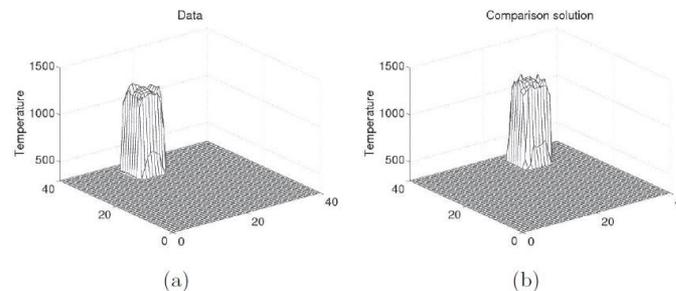
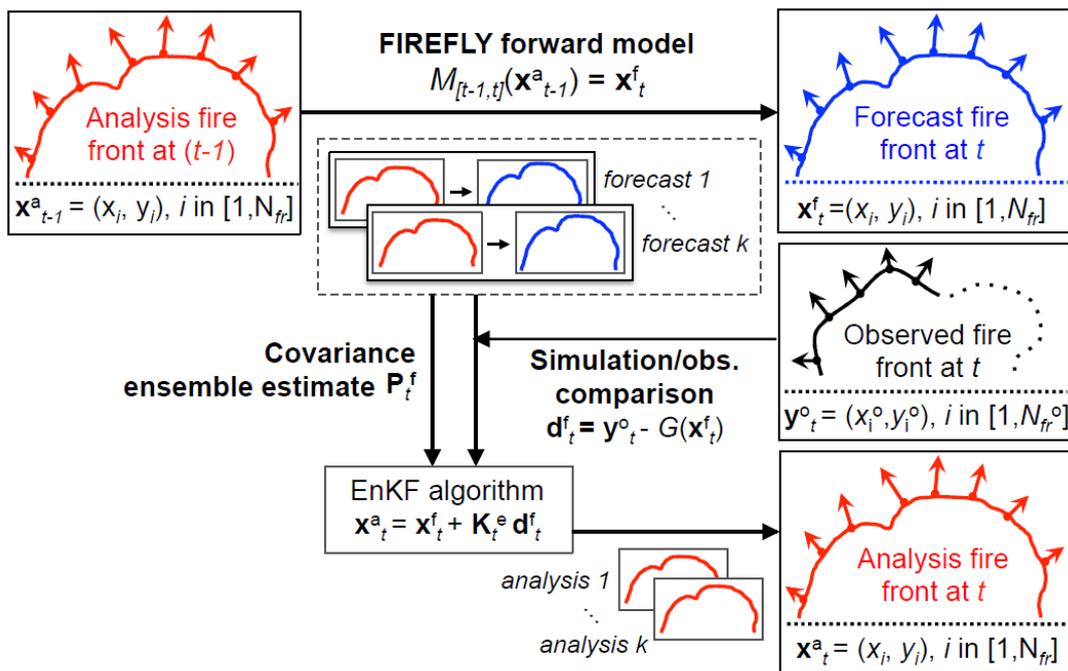


Fig. 8. Temperature profiles representing (a) the data (reference solution, taken as the truth) and (b) an unperturbed ensemble member comparison solution 100s after initialization.

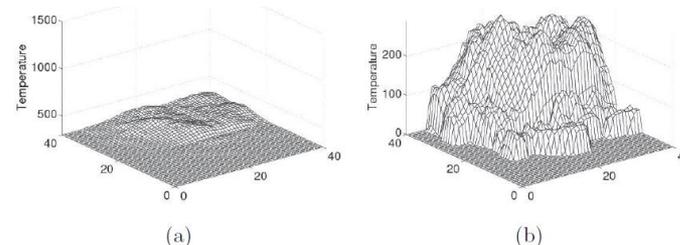


Fig. 9. After advancing the solution in time by 100s before any data assimilations: Pointwise prior ensemble (a) mean and (b) variance.

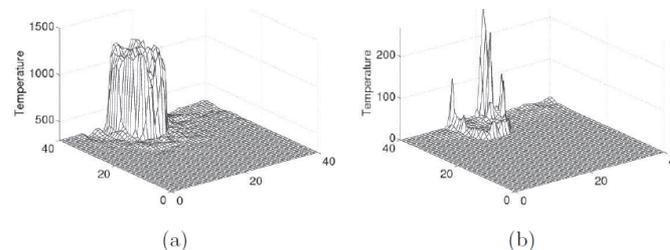


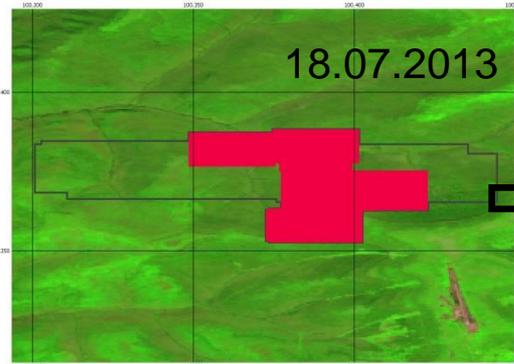
Fig. 10. After advancing the solution in time by 100s and performing a single data assimilation: Pointwise posterior ensemble (a) mean and (b) variance.

Rochoux M.C. и др. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread – Part 2: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. 2014. T. 2. № 5. С. 3769–3820.

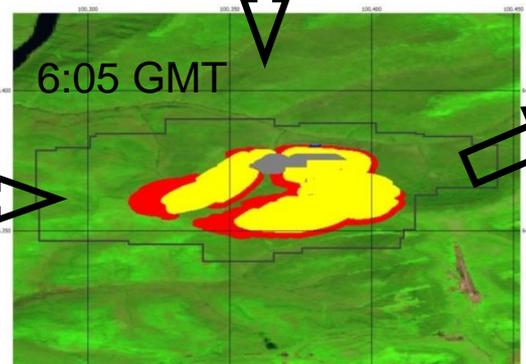
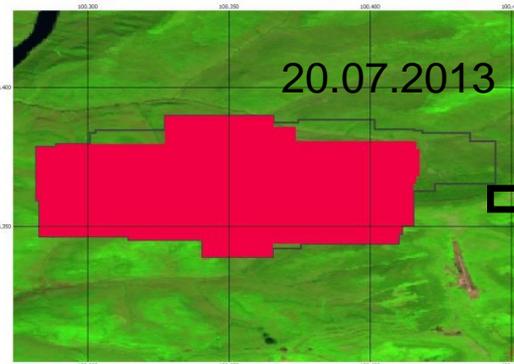
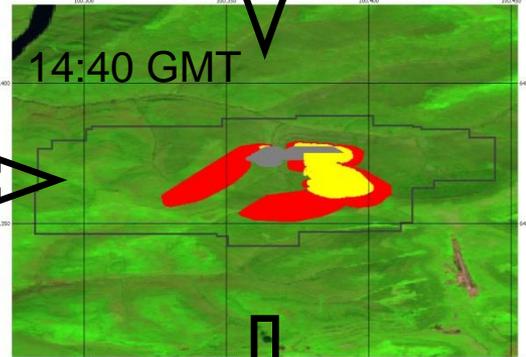
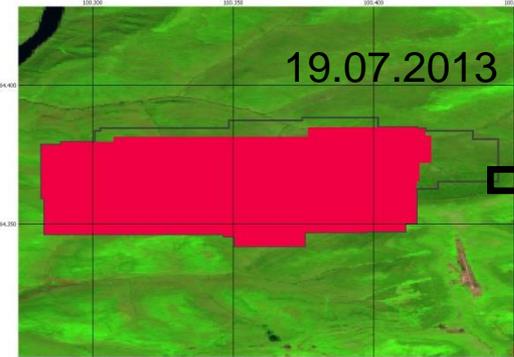
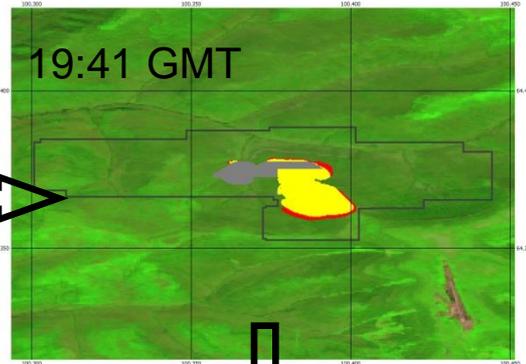
Mandel J. и др. A wildland fire model with data assimilation // Mathematics and Computers in Simulation. 2008. T. 79. № 3. С. 584–606.

Схема ассимиляция спутниковых данных в модели

Очаги горения по ДЗЗ

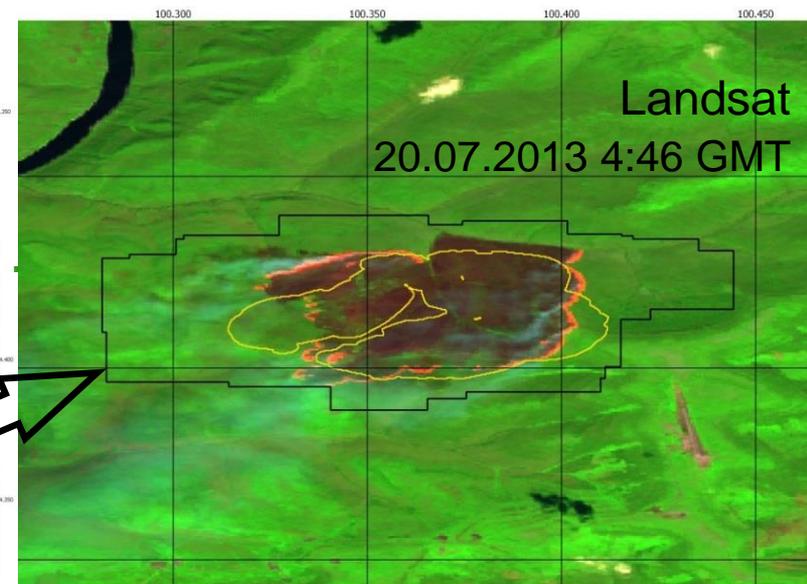


Модельная оценка

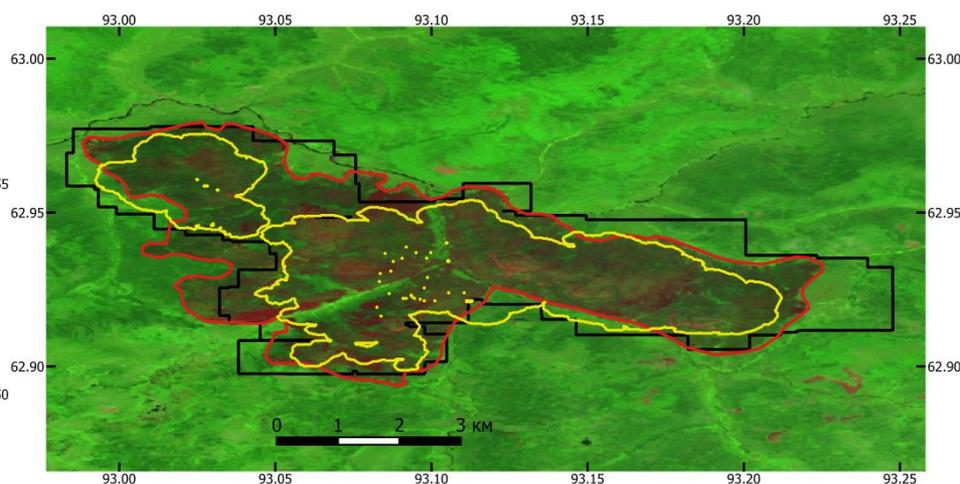
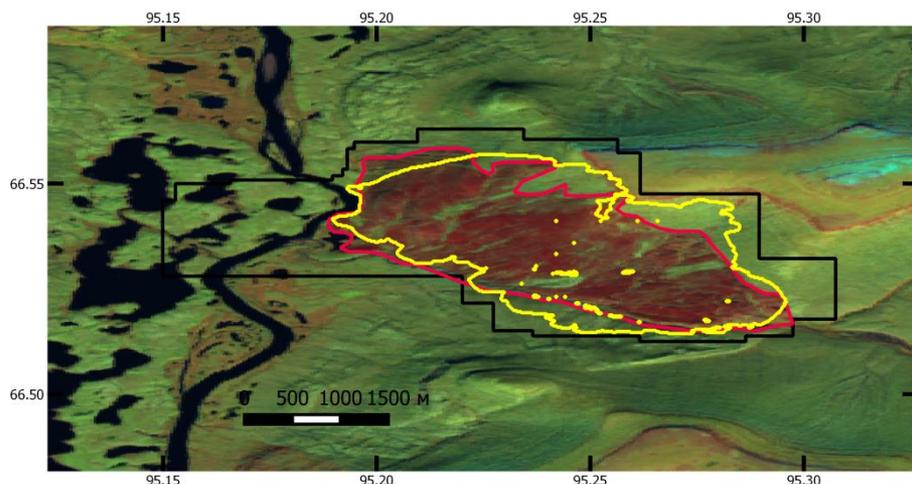
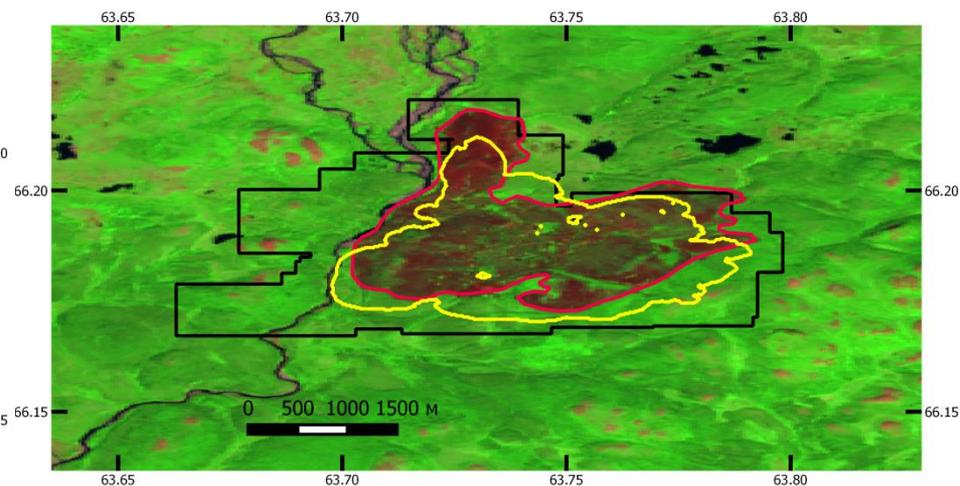
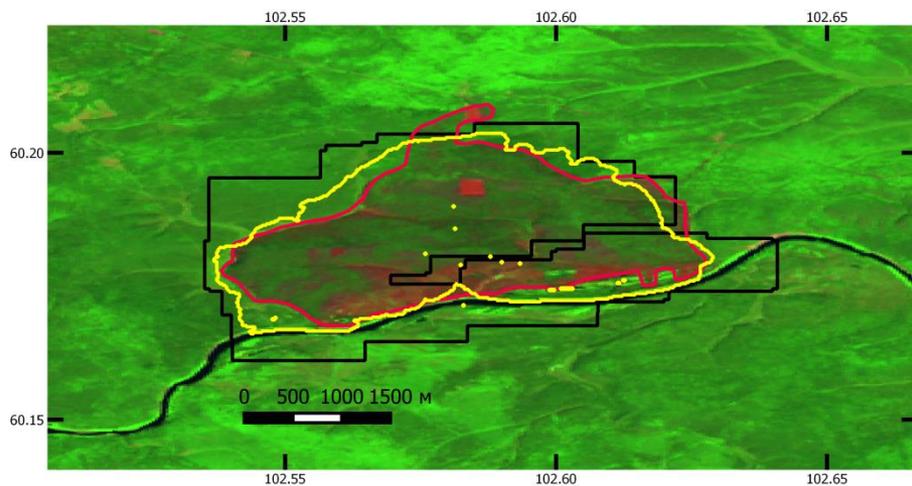


Результаты спутникового детектирования очагов горения позволяют корректировать модель итеративно по мере появления новых данных.

Уточненный модельный прогноз дает более качественную оценку положения фронта пожара:



Результаты ассимиляция спутниковых данных в модели



Область активного горения
по данным MODIS

Периметр гари по данным Landsat

Модельная оценка периметра пожара

Глобальные модели природных пожаров

Для прогнозирования изменений в системе Земли могут использоваться модели природных пожаров, которые позволяют оценить их влияние на растительность и содержание парниковых газов в атмосфере.

Такого рода модели могут учитывать:

1. Накопление горючих материалов, их характеристики
2. Вероятность возникновения пожаров (в связи с природными и антропогенными воздействиями)
3. Распространение пожаров (на основе упрощенных эмпирических моделей)
4. Тушение пожаров
5. Повреждения от пожаров
6. Восстановление растительности после пожаров

На выходе данные модели оценивают число пожаров, их площадь, повреждения естественной растительности, эмиссии углерода и других парниковых газов

Глобальные модели природных пожаров

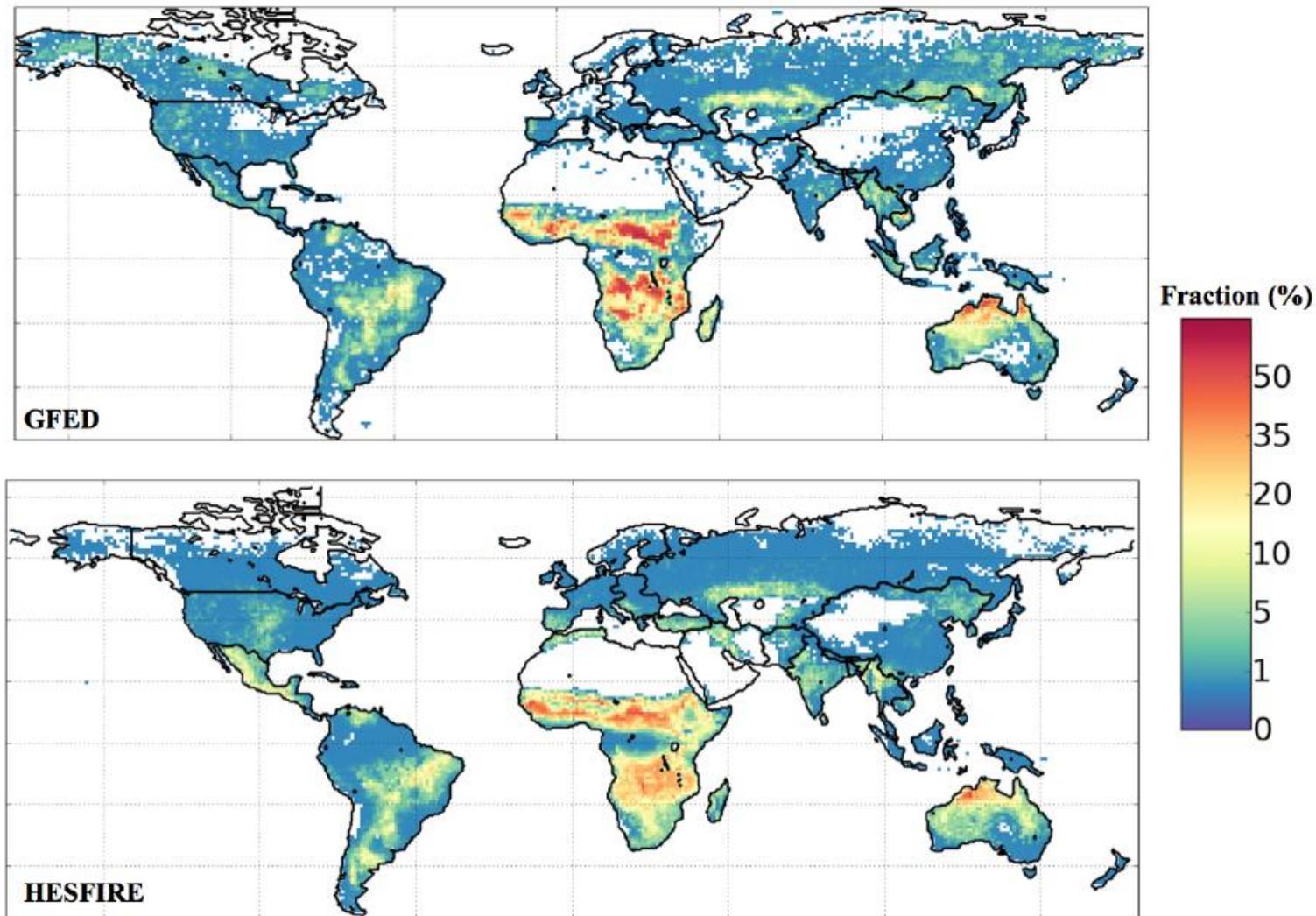
Существует множество глобальных моделей природных пожаров - Glob-FIRM, Reg-FIRM, SPITFIRE и др. Для дальнейшего изучения данной темы можно обратиться к статье: *Hantson S. и др. The status and challenge of global fire modelling // Biogeosciences Discussions. 2016. С. 1–30.*

Результаты моделирования часто сравниваются с данными спутникового мониторинга, например со следующими архивами:

1. GFED (*Giglio L., Randerson J. T., van der Werf G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2013. – Т. 118. – №. 1. – С. 317-328.*)
2. MODIS MCD45A1 (*Roy D.P. и др. The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product // Remote Sensing of Environment. 2008. Т. 112. № 9. С. 3690–3707*)
3. (*Alonso-Canas I., Chuvieco E. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Т. 163. – С. 140-152*)

Глобальные модели природных пожаров

Пример результатов глобального моделирования в сравнении с данными ДЗЗ.



Le Page Y. et al.
HESFIRE: a global
fire model to
explore the role of
anthropogenic and
weather drivers
//Biogeosciences.
– 2015.

План лекции

1. Физические и химические основы распространения пожара и модели на их основе
2. Факторы, влияющие на развитие пожара. Эмпирические модели
3. Вероятностное моделирование пожаров
4. Данные дистанционного зондирования в моделировании пожаров
5. Методы ассимиляции данных (ДЗЗ) в модели динамики пожаров
6. Глобальные модели пожаров