

Анализ пространственно-временных данных для оценки влияния травяных пожаров на растительность зарастающих сельскохозяйственных земель

Ханина Л.Г.¹, Смирнов В.Э.^{1,2}, Быховец С.С.³, Романов М.С.¹, Бобровский М.В.³

¹*Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

²*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

³*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН*

khanina.larisa@gmail.com

Для Заокского участка Серпуховского района Московской области на ландшафтном уровне проанализировано влияние весенних травяных пожаров на растительность зарастающих сельскохозяйственных земель. С использованием ГИС-технологий на основе анализа снимков высокого разрешения, топографических карт и наземной рекогносцировки разработана карта современных угодий района исследования. На основе анализа космических снимков среднего разрешения Landsat составлена серия исторических карт весенних пожаров. Проведен анализ таблиц сопряженности типов угодий и частоты пожаров за весь период наблюдений и в отдельные годы наблюдений; проанализирована корреляция площади пожаров со значениями модифицированного индекса потенциальной горимости Нестерова и числом дней со средним и высоким классом пожароопасности. Показано, что наиболее часто и значимо больше ожидаемого с 1985 по 2015 гг. горели бывшие сельскохозяйственные поля с отсутствующими или единичными деревьями. Весенние травяные палы являются случайным событием, в основном зависящим от человека. Однако площадь травяных пожаров зависит от климатических факторов (наиболее яркие зависимости выявлены для апрельских показателей) и наличия горючего материала в виде сухой травы, которая наиболее обильна на полях, ранее уже подвергавшихся пожарам.

Ключевые слова: ГИС-технологии, травяные пожары, зарастающие сельскохозяйственные земли, Landsat архив, индекс горимости Нестерова.

Analysis of spatiotemporal data to assess the influence of grass fires on the vegetation in abandoned agricultural lands

Khanina L.G.¹, Smirnov V.E.^{1,2}, Bykhovets S.S.³, Romanov M.S.¹, Bobrovsky M.V.³

¹*Institute of Mathematical Problems of Biology of RAS – branch of the M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*

²*Center for Forest Ecology and Productivity of RAS*

³*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Sciences of RAS*

Effects of spring grass fires on vegetation in abandoned agricultural lands at the landscape scale were analyzed in the south of the Moscow Region. GIS-technology, high-resolution satellite images, topographic maps and field observations were used to develop a map of the current land-use types of the study area. A freely available archive of Landsat imagery was used to develop a series of historical maps of spring fire events. Analysis of contingency tables of land-types and frequency of fire events was performed for the entire observation period and for individual years of the observation. Correlations of the burnt area with values of the modified Nesterov's index of potential inflammability and with the number of days with the middle and high classes of fire hazard were analyzed. It was showed that from 1985 to 2015 former agricultural fields with missing or single trees were burnt most frequently and for this land type category observed fire frequency was significantly higher than the expected one. On the whole, grass ignition is accidental event and depends on man, but the area over which the fire spreads is determined by climatic factors and the presence of the combustible material for burning. The high temperatures and low sums of precipitation in spring increase the inflammability

of dry grasses which are abundant on the former fields. As a result, burnt areas are steadily expanding in abandoned lands where trees are scarce.

Key words: GIS-technology, grass fire, agriculture abandonment, Landsat archive, Nesterov's ignition index.

1. Введение

В настоящее время во всем мире происходит прекращение использования сельскохозяйственных земель. Только в России за XX век из сельскохозяйственного оборота было выведено около 70 млн. га угодий, их них около 2/3 приходится на время социально-экономического кризиса 1980–90-х гг. [1]. Как показано многочисленными работами [2–5 и др.], траектория зарастания, помимо общих климатических параметров, зависит от типа предшествующего сельскохозяйственного воздействия (распашка, выпас и их чередование), доступности источников зачатков и агентов их переноса, свойств почв, а также внешних воздействий на территории после выведения сельскохозяйственных земель из оборота. Мы считаем, что среди таких внешних воздействий весенние травяные палы являются наиболее распространенным, часто недоучтенным, но при этом одним из самых мощных факторов, оказывающих непосредственное влияние на растительность, почвы и другие компоненты экосистем. Цель работы – оценить на основе анализа пространственно-временных данных влияние пожаров на растительность зарастающих сельскохозяйственных земель на ландшафтном уровне.

2. Объект и методы

В качестве модельного объекта выбран Заокский участок Серпуховского района Московской области общей площадью 25650 га (координаты 54.71778 °–54.88310 °с.ш. и 37.26959 °–37.78316 ° в.д.), расположенный в северной части подзоны неморальных лесов [6]. В качестве исходных данных взяты: (1) снимки высокого разрешения, доступные на <http://yandex.ru/maps>, – данные о состоянии земель на 2015 г.; (2) находящийся в открытом доступе с 1985 г. архив снимков среднего разрешения Landsat, по которым можно идентифицировать историю весенних травяных пожаров; (3) ряды наблюдений с 1985 по 2015 гг. метеорологической станции Коломна – наиболее близкой к месту проведения исследования станции, для которой доступен полный ряд необходимых данных суточного и срочного разрешения [7]. Также использован набор картографических тематических слоев (реки, дороги, поселения) из открытого проекта OpenStreetMap® [8]. Геоинформационная система разработана в свободно распространяемой системе QGIS [9].

На основе анализа снимков высокого разрешения, картографических тематических слоев и наземной рекогносцировки разработана карта современных угодий района исследования, которая включала категории:

- 1) населенные пункты;
- 2) водоемы;
- 3) лес с покрытием кроны выше 30 %;
- 4) разреженный лес с покрытием кроны до 30 %;
- 5) пашни;
- 6) зарастающие пашни:
 - а) с равномерным зарастанием деревьями;
 - б) с густым подростом пятнами;
 - в) с подростом средней густоты;
 - г) без деревьев или с единичными деревьями;
- 7) луга и кустарники:
 - а) вне долин малых рек и ручьев;
 - б) по долинам малых рек и ручьев;
 - в) в пойме р. Ока;
- 8) другое (карьеры, отмели, другие обнажения, участки отчуждения у дорог и пр.) [10, 11].

На основе анализа снимков Landsat с незначительной облачностью (37 снимков за 15 различных лет) составлена серия карт весенних пожаров с 1985 по 2015 гг. [10]. Следует отметить, что с помощью данного метода невозможно получить полную серию исторических карт пожаров, т.к. не на все периоды снимки определенной территории доступны, и не всегда небо малооблачно, а участки травяных пожаров довольно быстро зарастают. Однако некоторая часть реальных пожаров этим методом достоверно выявляется, и можно утверждать, что пожаров было не меньше, чем обнаружено с помощью серии исторических космоснимков.

Дополнительный слой в ГИС получен путем нанесения контуров гарей на карту угодий с сохранением топологии слоя угодий. В результате для каждого полигона этого нового слоя («угодья–пожары») в атрибутивной таблице содержалась информация о современном типе угодий и о наличии / отсутствии пожара в анализируемый год: 9 лет с пожарами и 6 лет, для которых снимки были доступны, а пожаров не было.

Для проверки связи между частотой пожаров и типом угодий проведен анализ таблиц сопряженности, построенных по числу горевших полигонов за весь период наблюдений и в отдельные годы наблюдений. Статистическая гипотеза об отсутствии связи проверялась на основе критерия независимости хи-квадрат. Вклад в статистику критерия отдельных клеток таблиц

Таблица 1. Коэффициент $K(R)$ для расчета модифицированного индекса Нестерова

Осадки R	0.0	0.1–0.9	1.0–2.4	2.5–5.4	5.5–14.4	14.5–19.4	≥ 19.5
$K(R)$	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0

сопряженности оценивался с помощью девиат Фримена–Тьюки [12].

Для оценки влияния климатических переменных на площадь пожаров нами проанализированы корреляции площади пожаров со средней температурой и суммой осадков по годам с пожарами [11]. В настоящей работе анализировали корреляцию площади пожаров с индексом горимости В.Г. Нестерова [13, 14], согласно которому потенциальную горимость лесных экосистем можно оценить по ежедневным метеорологическим данным в теплый период года по следующей формуле:

$$G = \sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i,$$

где T_i – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в 12 часов дня; d_i – дефицит точки росы ($d_i = T_i - \tau_i$); τ_i – температура точки росы ($^{\circ}\text{C}$) в 12 часов; n – число дней после последнего дождя с количеством осадков не менее 2.5 мм/сутки (3 мм/сут. по [14]). Произведение околосредней температуры на дефицит точки росы рассматривается как косвенная характеристика испаряемости, а его накопленная величина за сухой период характеризует степень высушивания потенциального горючего материала. На основании значений индекса Нестерова пожароопасность метеорологических условий оценивается по пятибалльной шкале: до 300 – опасность отсутствует (класс опасности I), 301–1000 – малая пожароопасность (II), 1001–4000 – средняя (III), 4001–10000 – высокая (IV), и более 10000 – чрезвычайная (V). Несмотря на широкое использование индекса Нестерова, он не лишен недостатков, наиболее существенным из которых является обнуление накопленного значения индекса при условии выпадения достаточно слабого дождя (2.5–3.0 мм/сут.). Поэтому Жданко и Гриценко [15] предложили модификацию индекса горимости Нестерова [16]: обнулять накопленное значение индекса только при осадках 20 мм/сут. и более, а при меньших осадках лишь уменьшать значение индекса по формуле:

$$g_i = K(R_i) \cdot g_{i-1} + T_i \cdot d_i,$$

где g_{i-1} – значение индекса за предыдущий день; K – модифицирующий множитель, принимающий значения от 1 до 0 в зависимости от суточной суммы осадков R , и в нашей работе несколько измененный с учетом формата используемых данных (табл. 1).

Рассчитывали корреляцию площади пожаров со значениями модифицированного индекса горимости Нестерова и числом дней со средним и высоким классом пожароопасности.

Статистический анализ выполнен в среде статистического программирования R [17].

3. Результаты

3.1. Общий анализ территории

Существенная часть изучаемой территории (39 %) в 2015 г. была занята зарастающими сельскохозяйственными землями, выведенными из оборота. Только 1 % этих земель составляли бывшие пашни, в которых зарастающие деревья были расположены равномерно по площади и для которых не были отмечены пожары. Гари были обнаружены на снимках 9-ти лет; за это время пожарами было охвачено 58 % всей территории; максимальные площади травяных пожаров были в 2009 и 2010 годах. Близко расположенные полигоны, горевшие в соседние года, образовывали кластеры, все они граничили с поселениями и/или дорогами, включая железную дорогу и федеральную трассу [11]. Некоторые кластеры располагались на границе изучаемой территории, что хорошо объясняется наличием обширных зарастающих земель в соседней Тульской области, пожары на которых часто фиксировались на космоснимках.

3.2. Анализ таблиц сопряженности

Анализ таблиц сопряженности (рис. 1) показал, что в обоих видах анализа (для всех и отдельных лет наблюдений) наблюдается статистически значимая связь между типом угодий и частотой пожаров. При анализе всего периода наблюдений статистика критерия составила 618.4 при 21 степени свободы, $P < 0.001$. При анализе отдельных лет наблюдений статистика критерия составила 210.7 при 56 степенях свободы, $P < 0.001$. Значимые девиаты Фримена–Тьюки для разных частот пожаров для всего периода наблюдений отмечены синим и красным цветом на нижнем графике рисунка 1. На зарастающих пашнях без деревьев или с единичными деревьями (a14) пожары наблюдались чаще и в большем числе полигонов, чем во всех остальных угодьях; горели они существенно больше ожидаемого. Так же, больше ожидаемого (но не в такой степени как a14), за анализируемые 9 лет горели современные пашни (что может быть объяснено их сложной историей – они могли быть заброшенными полями в наблюдаемый год пожара). Значимо меньше ожидаемого за 9 лет горели леса. Соотношение числа полигонов с пожарами для разных угодий практически одинаково по отдельным годам; максимальное их число наблюдается у зарастающих полей без деревьев.

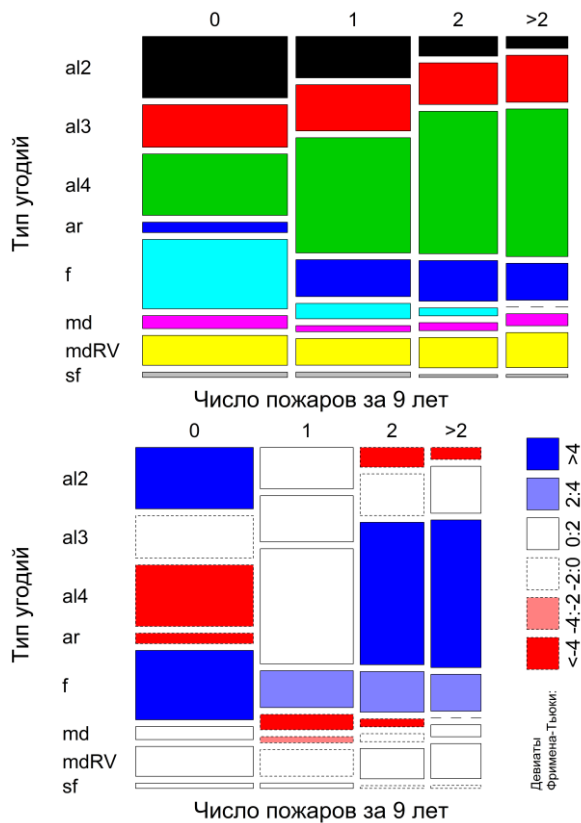


Рис. 1. Диаграмма таблицы сопряженности типов угодий с наблюдаемой частотой пожаров (0, 1, 2 и больше двух) за 9 лет наблюдений (1986, 2000, 2001, 2006, 2009–2012 и 2014 гг.). al2, al3, al4 – зарастающие пашни с густым подростом деревьев пятнами, с подростом средней густоты и без деревьев или с единичными деревьями; ar – пашни; f – лес; md, mdRV – луга и кустарники вне долин и по долинам малых рек и ручьев; sf – разреженный лес.

3.3. Анализ корреляций с климатическими переменными

Ранее для лет, в которых наблюдались пожары, нами была выявлена значимая высокая корреляция логарифмов площади пожаров и суммы апрельских осадков (коэффициент корреляции Пирсона -0.72); с температурой сколько-нибудь заметная корреляция найдена только для марта, но она невелика (0.19) и незначима [11]. В настоящей работе выявлена довольно высокая, хотя статистически не значимая корреляция логарифмов площади пожаров и значениями модифицированного индекса горимости Нестерова, посчитанными для апреля (коэффициент корреляции Пирсона 0.53), а также логарифмов площади пожаров и числа дней со средним и высоким классами пожароопасности, также посчитанными по модифицированному индексу Нестерова для апреля (коэффициент Пирсона 0.58) (рис. 2).

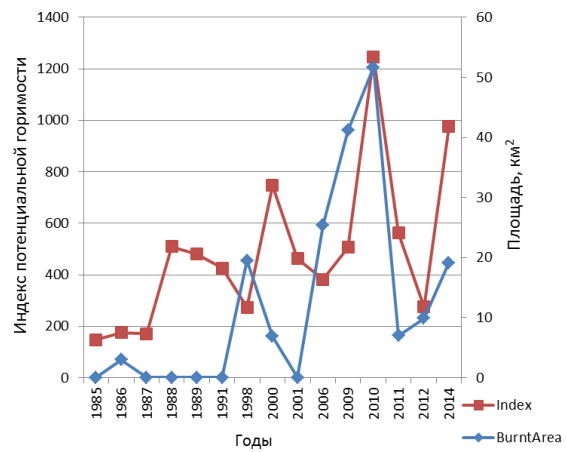


Рис. 2. Площадь пожаров и апрельские значения модифицированного индекса потенциальной горимости Нестерова.

4. Заключение

В 2015 году 39 % анализируемой территории составляли бывшие сельскохозяйственные угодья – в основном пашни, выведенные из оборота. Не менее, чем 72 % этих земель были подвержены травяным палам, которые в основном случались в период с 1998 по 2014 гг. Наиболее часто и значимо больше ожидаемого горели бывшие сельскохозяйственные поля с отсутствующими или единичными деревьями. Весенние травяные палы являются случайным событием, в основном зависящим от человека. Однако площадь травяных пожаров зависит от климатических факторов и наличия горючего материала. Низкая сумма осадков в апреле, в сочетании с высокой температурой в марте, вызывающей быстрое таяние снега, приводит к высушиванию травы, обильной на зарастающих землях, которые уже были подвержены пожарам; вероятность возгорания такой травы увеличивается. Травяные пожары в разной степени уничтожают подрост деревьев и способствуют заселению и поддержанию трав, прежде всего вейника наземного (*Calamagrostis epigejos*) и лугово-опушечных видов, относимых к бурьяну (*Tanacetum vulgare*, *Artemisia vulgaris*, *Cirsium arvense* и др.), дернина и ветошь которых препятствуют инвазии деревьев. Формируется мозаика древесных и луговых (бурьянистых) участков. При большой частоте и интенсивности пожаров спустя десятки лет после забрасывания пашен растительность на них представлена *Calamagrostis epigejos* и видами бурьяна; восстановление древесной растительности отсутствует.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Московской области (проект 17-44-500297) в рамках государственных заданий ИМПБ

6. Список литературы

1. Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Sieber A., Radeloff V.C. Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data. *Environ. Res. Lett.* 2013. V. 8. № 3. doi: [10.1088/1748-9326/8/3/035035](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035035).
2. Prévosto B., Kuiters L., Bernhardt-Römermann M., Dölle M., Schmidt W., Hoffmann M., Uytvanck J.V., Bohner A., Kreiner D., Stadler J., Klotz S., Brandl R. Impacts of land abandonment on vegetation: successional pathways in European habitats. *Folia Geobotanica*. 2011. V. 46. P. 303–325.
3. Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., Kasparinskis R., Brūmelis G. Patterns of afforestation on abandoned agriculture land in Latvia. *Agroforest Syst.* 2012. V. 85. P. 215–231.
4. Munroe D.K., van Berkel D.B., Verburg P.H., Olson J.L. Alternative trajectories of land abandonment: causes, consequences and research challenges. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2013. V. 5. P. 471–476.
5. Kelemen A., Tóthmérész B., Valkó O., Miglécz T., Deák B., Török P. New aspects of grassland recovery in old-fields revealed by trait-based analyses of perennial-crop-mediated succession. *Ecology and Evolution*. 2017. V. 7. P. 2432–2440. doi: [10.1002/ece3.2869](https://doi.org/10.1002/ece3.2869).
6. *European Russian forests. Their current state and features of their history*. Eds. Smirnova O.V., Bobrovsky M.V., Khanina L.G. Dordrecht: Springer, 2017. 564 p. doi: [10.1007/978-94-024-1172-0](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1172-0).
7. Бульгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. *Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549*. 2014. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 25.08.2018).
8. *OpenStreetMap® project*. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 25.08.2018).
9. *QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. 2018. URL: <http://qgis.org> (дата обращения: 25.08.2018).
10. Bobrovsky M.V., Khanina L.G. Effects of grass fires on the trajectory of vegetation dynamics in abandoned agricultural lands: a 30-year retrospective based on remote sensing data (a study of an area south of the Moscow region). In: *The Fourth International Scientific Conference Ecology and Geography of Plants and Plant Communities*. KnE Life Sciences, 2018. P. 1–7. doi: [10.18502/kls.v4i7.3222](https://doi.org/10.18502/kls.v4i7.3222).
11. Khanina L.G., Smirnov V.E., Romanov M.S., Bobrovsky M.V. Influence of spring grass fires on vegetation patterns and soil quality on abandoned agricultural lands at the local and landscape scales in the Central European Russia. *Ecological Processes* (в печати).
12. Sokal R.R., Rohlf F.J. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*: 4th edition. New York: W.H. Freeman and Co, 2012. 937 p.
13. Нестеров В.Г. *Горимость леса и методы ее определения*. М. – Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
14. Кац А.Л., Гусев В.А., Шабунина Т.А. *Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды*. М.: Гидрометеоиздат, 1975. 15 с.
15. Жданко В.А., Гриценко М.В. *Метод анализа лесопожарных сезонов: Практические рекомендации*. Л.: ЛНИИЛХ, 1980. 19 с.
16. Шерстюков Б.Г. Лесные пожары. В: *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. Под ред. Семенова С.М. М.: НИЦ «Планета», 2012. С. 266–300.
17. R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2018. URL: <http://www.R-project.org> (дата обращения: 05.08.2018).