

# Влияние травяных пожаров на заращение бывших сельскохозяйственных земель на ландшафтном уровне

Л.Г. Ханина, М.В. Бобровский,  
В.Э. Смирнов, М.С. Романов, С.С. Быховец

- Институт математических проблем биологии РАН – филиал  
Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
- Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
- Институт физико-химических и биологических проблем  
почвоведения РАН

Москва, 2018



# Гипотеза

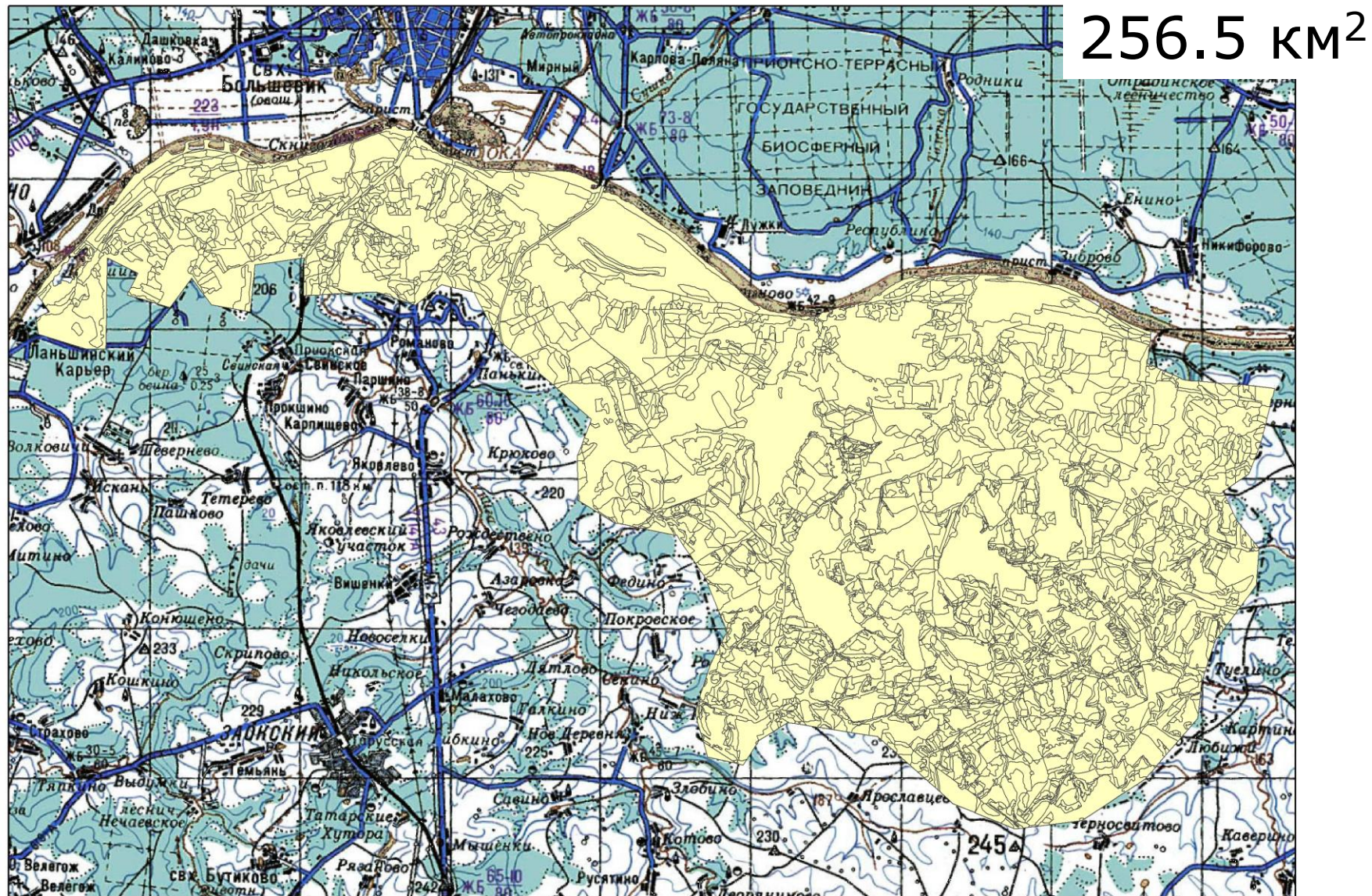
---

В зоне умеренного континентального климата **весенние травяные пожары** являются ключевым фактором, который наиболее часто определяет «траекторию зарастания» - структуру и разнообразие растительности и почв на пашнях, выведенных из сельскохозяйственного оборота.

Задача – тестирование этой гипотезы применительно к растительности на ландшафтном уровне

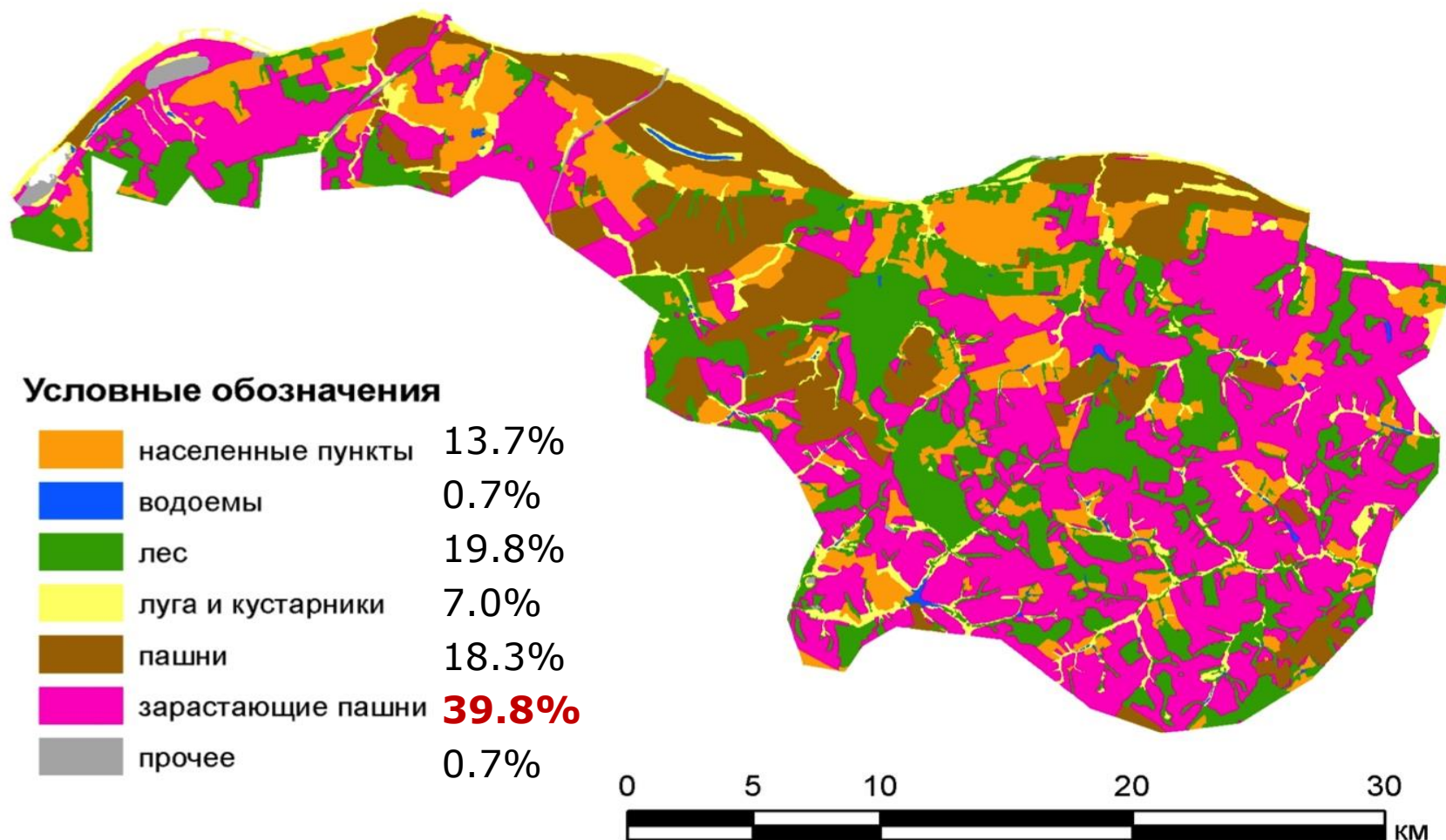


# Объект исследования – Зокский участок Серпуховского района Московской области





# Основные категории угодий на территории Заокского участка Серпуховского района Московской области



по анализу снимков высокого разрешения,  
топографических карт и наземной рекогносцировки



Поля без  
деревьев



Зарастающие поля  
Заокского участка  
Московской области

С подростом  
сосны



С единичными  
деревьями

С подростом  
средней густоты



С густым  
подростом  
пятнами



Березняки (ивняки) с  
высокой сомкнутостью





# Анализ снимков высокого разрешения

**Регулярное  
размещение  
пионерных  
деревьев по  
всей площади**



**Однородная  
структура  
выдела**





# Анализ снимков высокого разрешения

**Группы  
или  
единичные  
деревья  
пионерных  
видов**



# Анализ снимков высокого разрешения

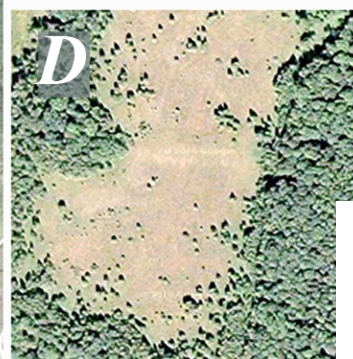
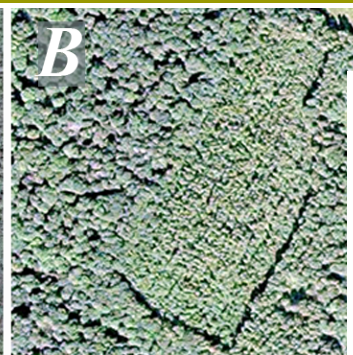
## Заброшенные пашни с травяными палами

**Группы  
или  
единичные  
деревья  
пионерных  
видов**





# Фрагмент заповедника "Калужские засеки": заброшенные пашни и пастбища внутри массива старовозрастных широколиственных лесов



1 бывшие пашни  
без пожаров (B)

2 бывшие пашни  
с пожарами (C)

3 быв.пастбища(D)

**Датированные  
данные**

Проверка гипотезы о ведущей роли пожаров в формировании структуры растительности на зарастающих полях:

анализ свободно доступных архивов космических снимков среднего разрешения Landsat

на предмет наличия травяных пожаров на анализируемой территории



Весенние снимки (март - июнь) с малой облачностью 1985-2015 гг.

Пример снимков Landsat:



зеленые полигоны – лес,  
розовые – пашни,  
черные и фиолотевые – гари,  
красная полоса – кромка травяного пожара

Весенние снимки (март - июнь) с малой облачностью 1985-2015 гг.

Пример снимков Landsat:



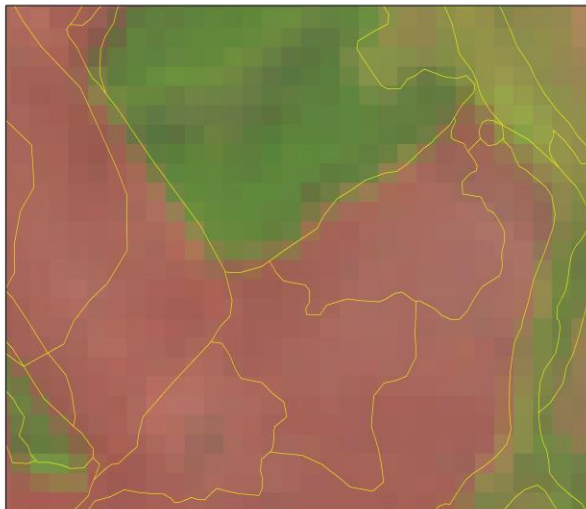
0 500 1 000 2 000  
m

За 30-летний период 37 снимков за 15 лет удалось отобразить:  
9 лет с пожарами: 1986, 2000, 2001, 2006, 2009–2012, 2014  
6 лет без пожаров: 1985, 1987, 1989, 1991, 1998, 2005



# Пример динамики зарастания по снимкам разных лет

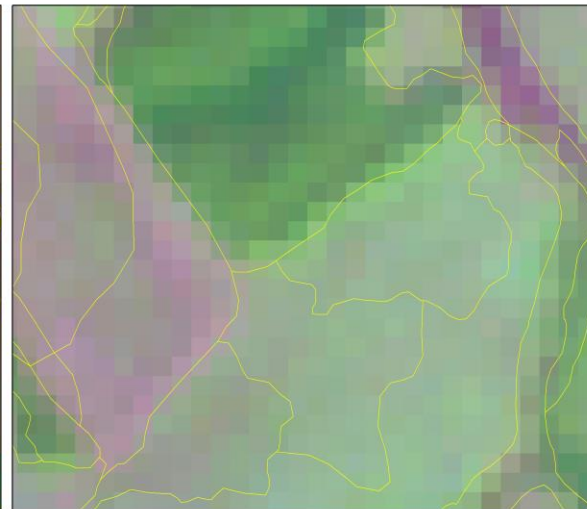
**1991**



**2000**



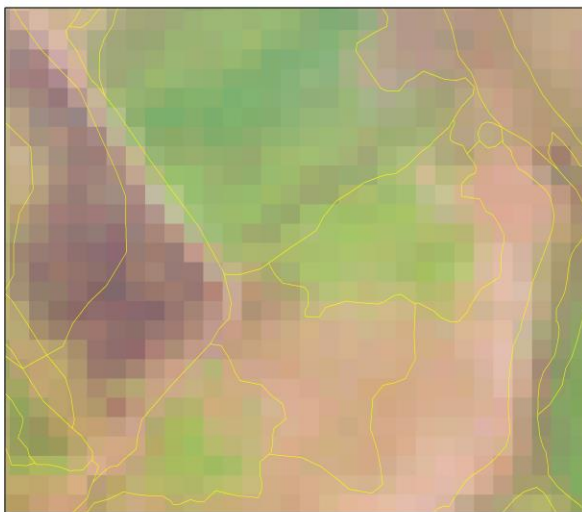
**2001**



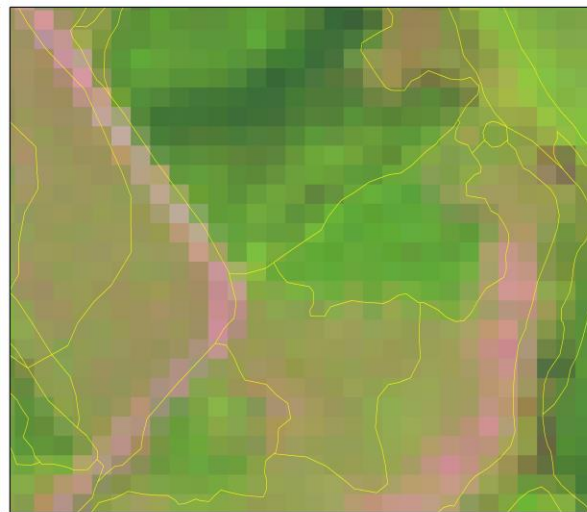
**2009**



**2010**



**2011**

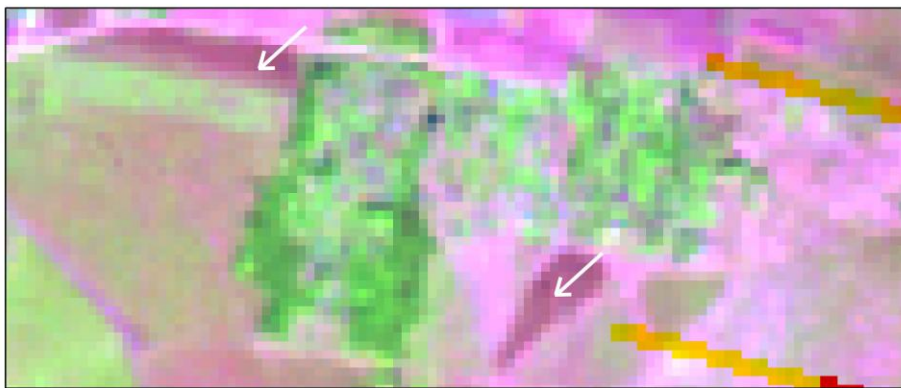


0 75 150 300  
Meters

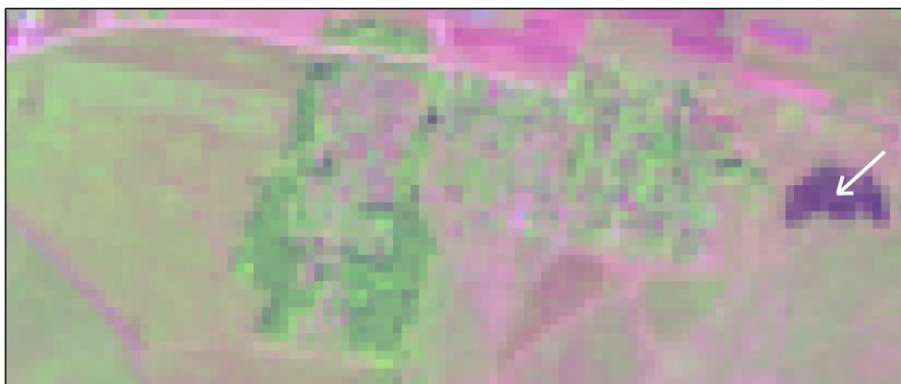
29.03.2014



08.05.2014



16.05.2014



0 250 500 1 000  
Meters

Проблемы  
диагностики факта  
пожаров по  
космическим  
снимкам разных  
дней одного года

Контурь гарей  
оцифровывали вручную  
последовательно по  
снимкам разных лет с  
сохранением топологии,  
заданной в слое с  
границами угодий  
разных типов



# Вывод

---

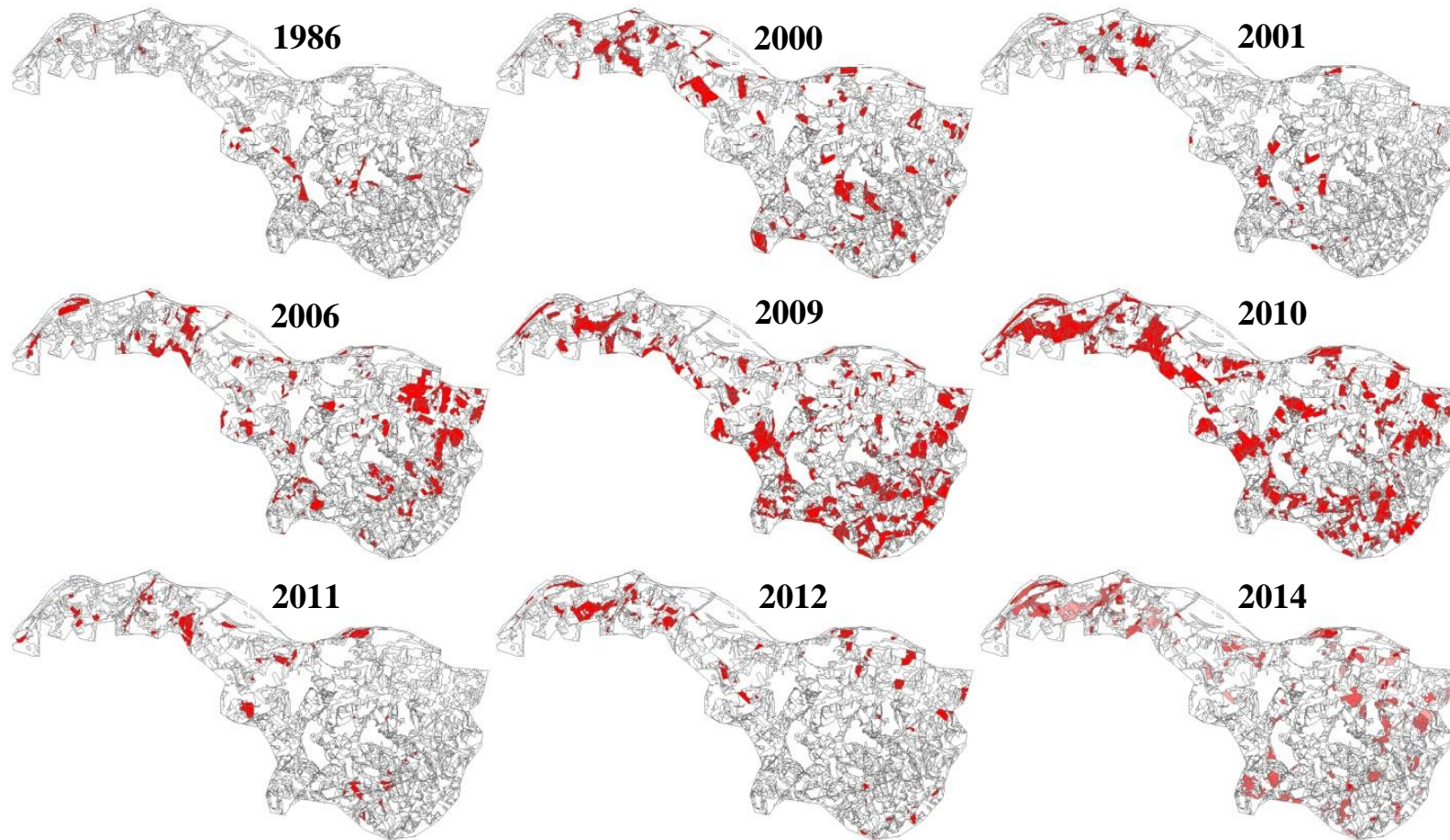
На основе архивов спутниковых данных Landsat можно реконструировать историю травяных пожаров. Однако, это «**минимальная история**». Мы идентифицируем пожары, которые точно были, но их могло быть больше.

Проблемы при идентификации пожаров – облачность дней, во время которых проводилась съемка, и довольно быстрое зарастание пожарных пятен

# Результат:

карты травяных палов девяти лет

---

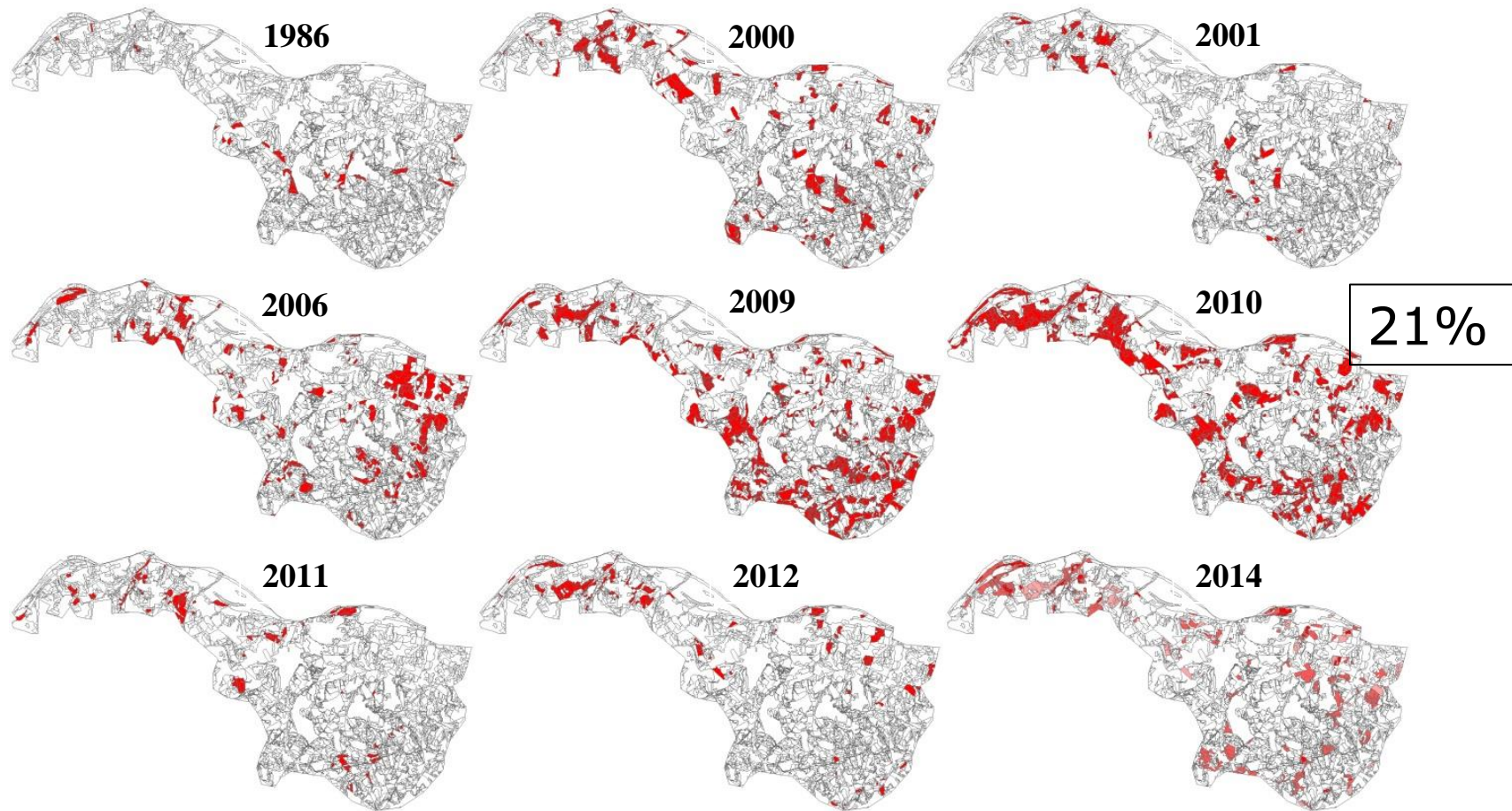


за 9 лет пожарами пройдено 58% всей территории



# Результат:

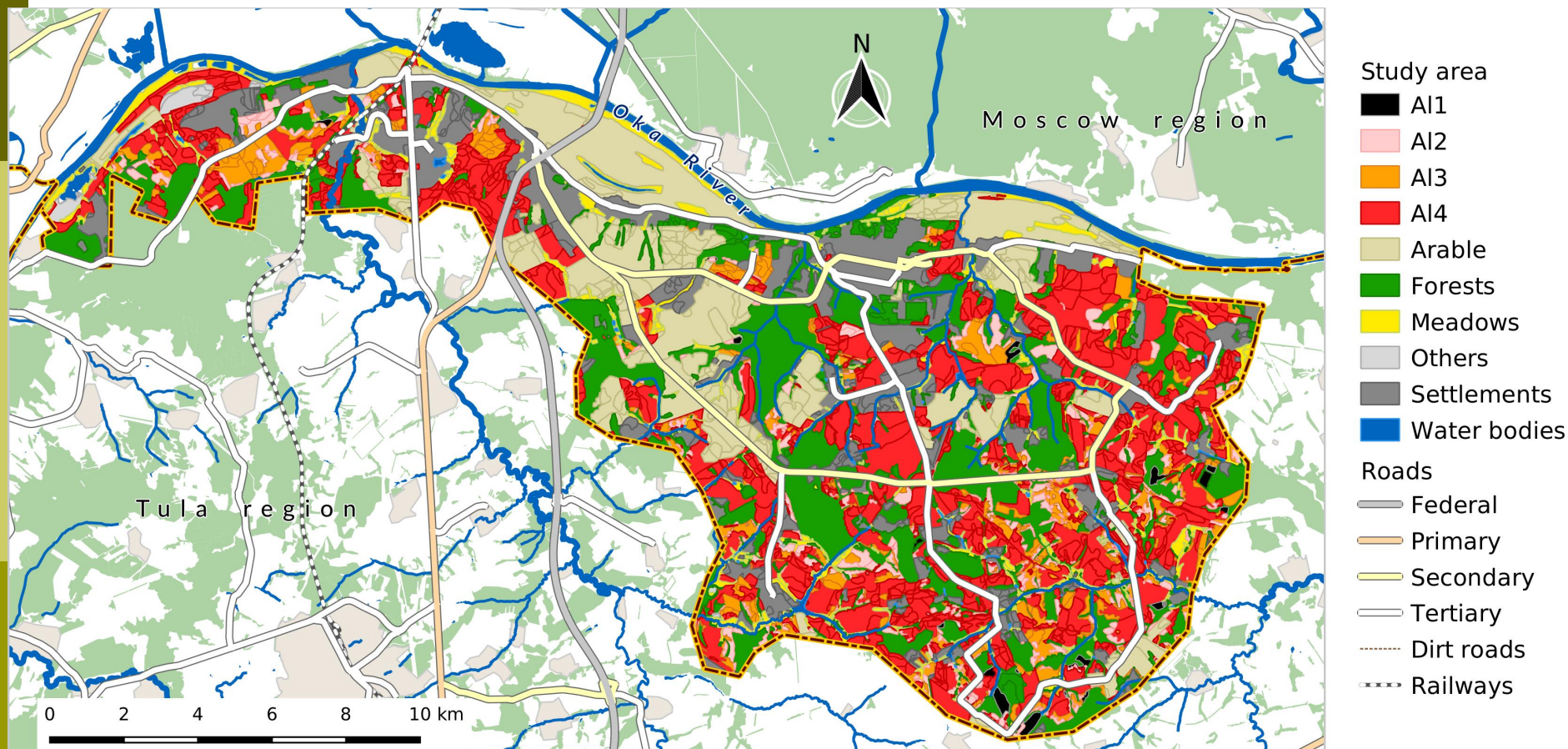
карты травяных палов девяти лет



за 9 лет пожарами пройдено 58% всей территории

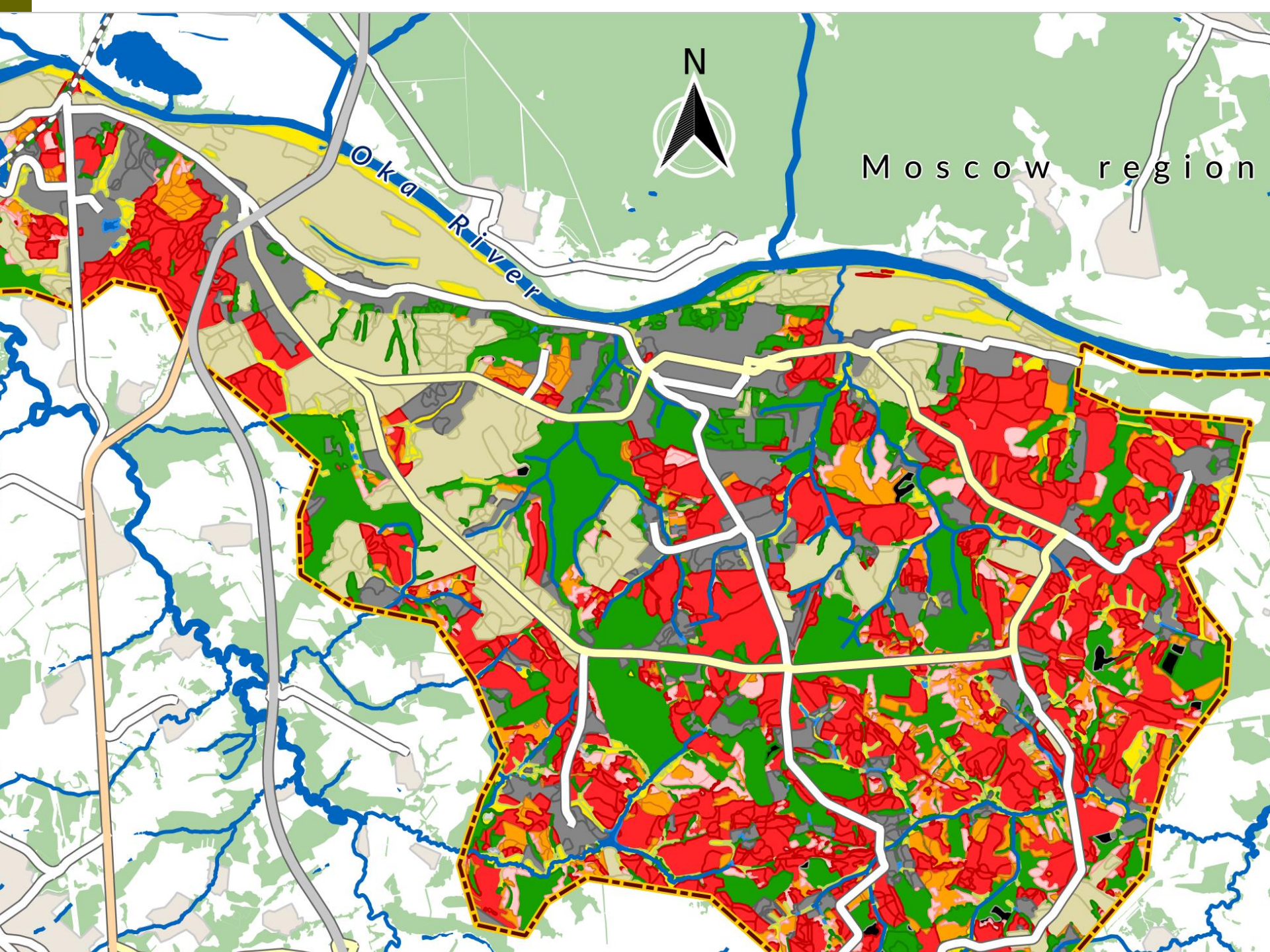
# Карта угодий с учетом истории пожаров

QGIS, OpenStreetMap® project



AI1 – молодые березняки на месте бывших полей,  
AI2, AI3, AI4 – зарастающие поля с уменьшением покрытия  
деревьев (AI4 – без деревьев или с единичными деревьями)





N



Moscow region

Oka River

# Пространственный анализ. Методы

Расчет описательных характеристик полигонов, индексов формы, расстояния, анализ соседства.

Построение пространственно-временных кластеров полигонов «с пожарными воздействиями»: a density-based clustering algorithm OPTICS (V-Analytics).

Анализ связи между частотой пожаров и типом угодий – анализ таблиц сопряженности: статистика - хи-квадрат, вклад отдельных клеток – девиаты Фримена-Тьюки.

Бинарная логистическая регрессия (отклик – наличие /отсутствие пожара)

Анализ корреляции между площадью пожаров и климатическими переменными: суммой осадков, среднемесячными температурами, индексом горимости Нестерова, классом горимости.

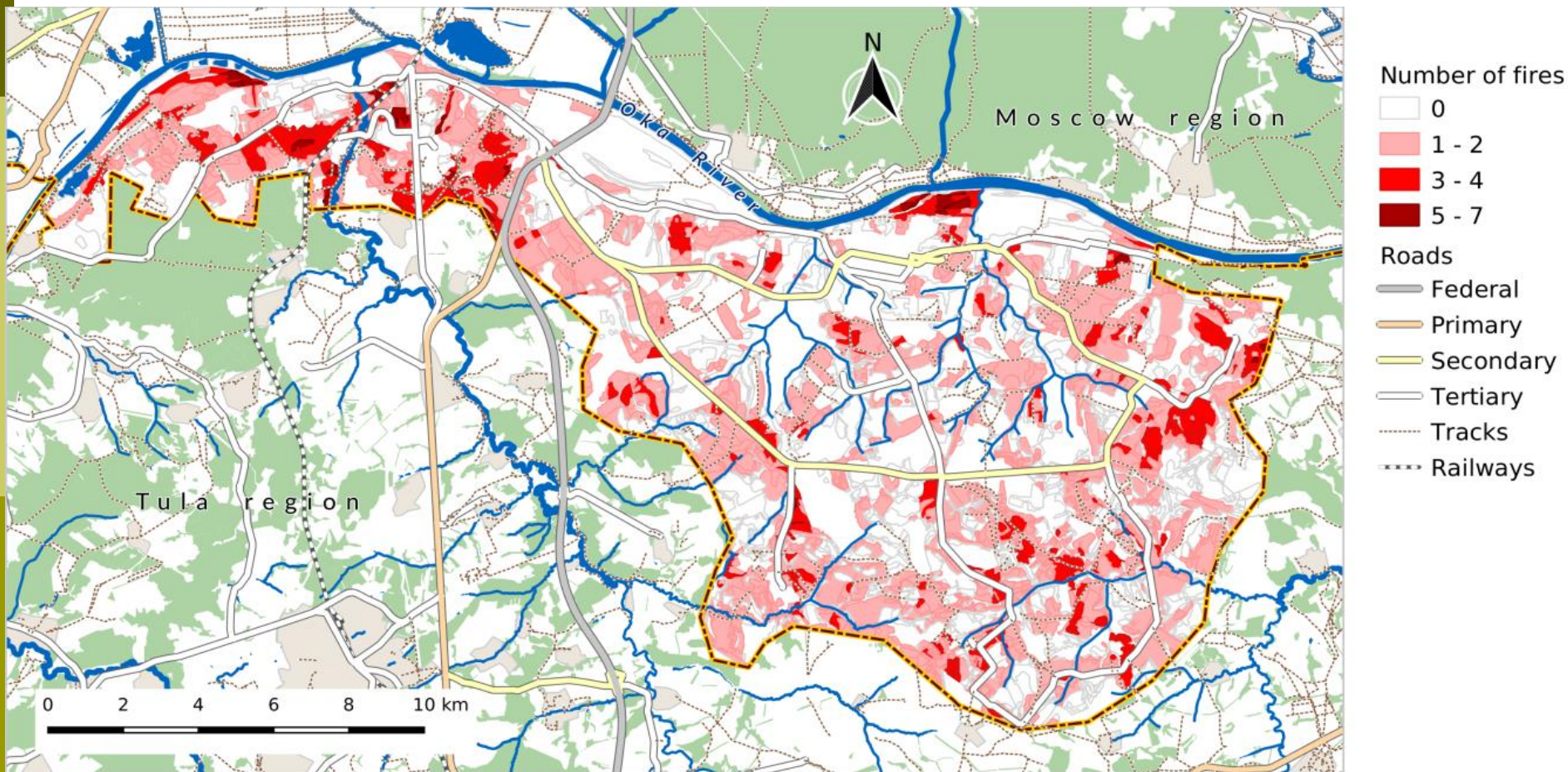


# Пространственные характеристики угодий с учетом пожарной истории

	Number of polygons	Area, %	Area, m <sup>2</sup>		Perimeter, m		Median of Shape Index	Nearest Neighbor Index
			Mean	SE	Mean	SE		
<b>Forest</b>	339	21.5	<b>162742</b>	29722	<b>2207</b>	228	1.67	0.68
<b>Sparse forest</b>	49	0.8	43039	7316	974	98	1.31	0.53
<b>AI1</b>	19	0.4	60662	12921	1225	154	1.52	<b>0.80</b>
<b>AI2</b>	433	3.9	23226	1417	769	26	1.46	0.48
<b>AI3</b>	480	6.6	35346	2233	940	34	1.46	0.50
<b>AI4</b>	<b>1154</b>	<b>28.3</b>	62876	3228	1192	30	1.45	0.55
<b>Arable</b>	305	16.1	135224	27117	1522	132	1.38	0.35
<b>Settlements</b>	329	14.9	116489	17613	1454	104	1.35	0.49
<b>Meadows</b>	443	6.3	36203	3313	1244	77	<b>1.72</b>	0.51
<b>Water bodies</b>	93	0.5	14278	3158	573	71	1.40	0.60
<b>Others</b>	21	0.6	75336	27758	1677	523	1.48	0.37

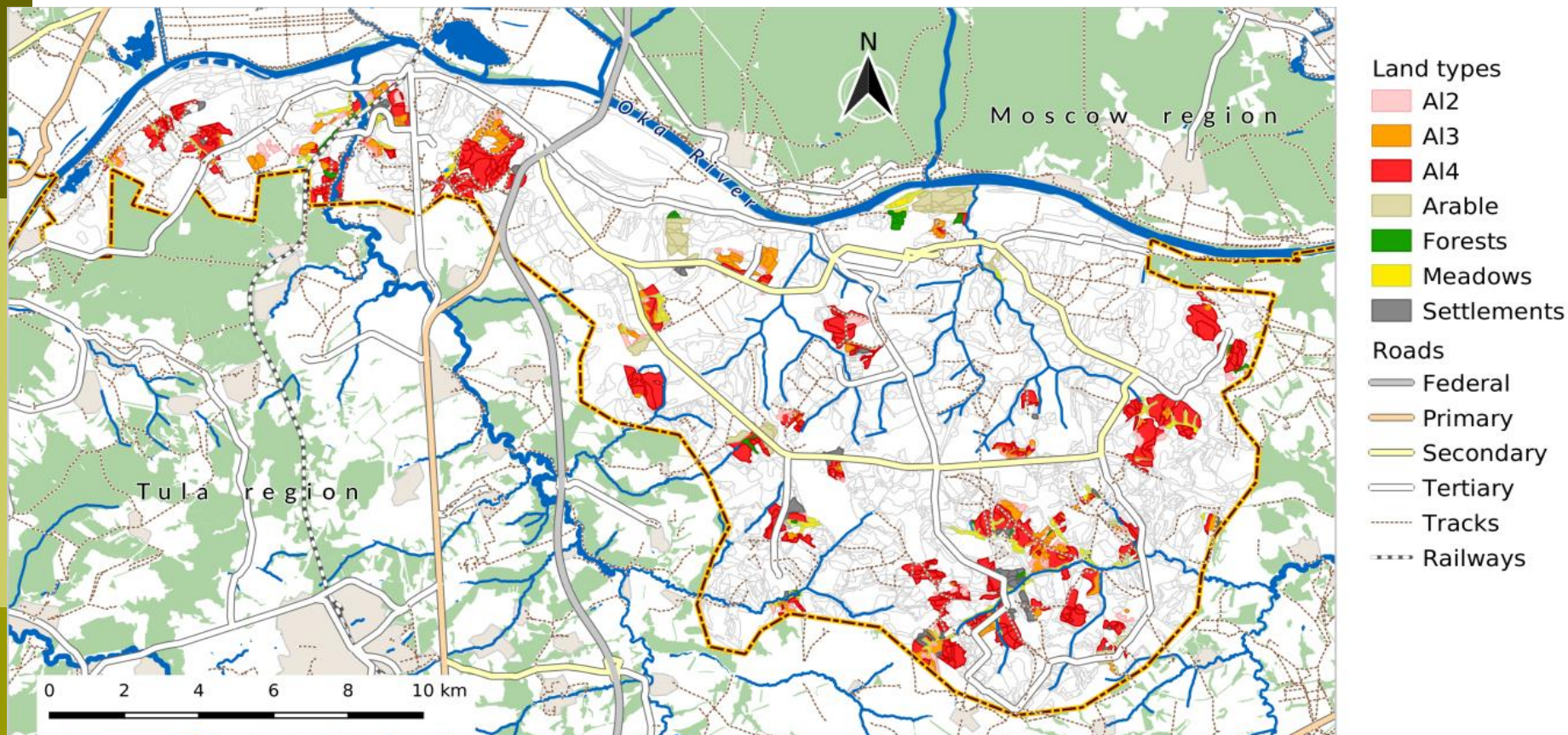
Все категории угодий, за искл. AI1, показывают статистически значимое агрегирование полигонов

# Распределение выделов с разной частотой пожаров за 15 исследованных лет в период 1985-2015 гг.



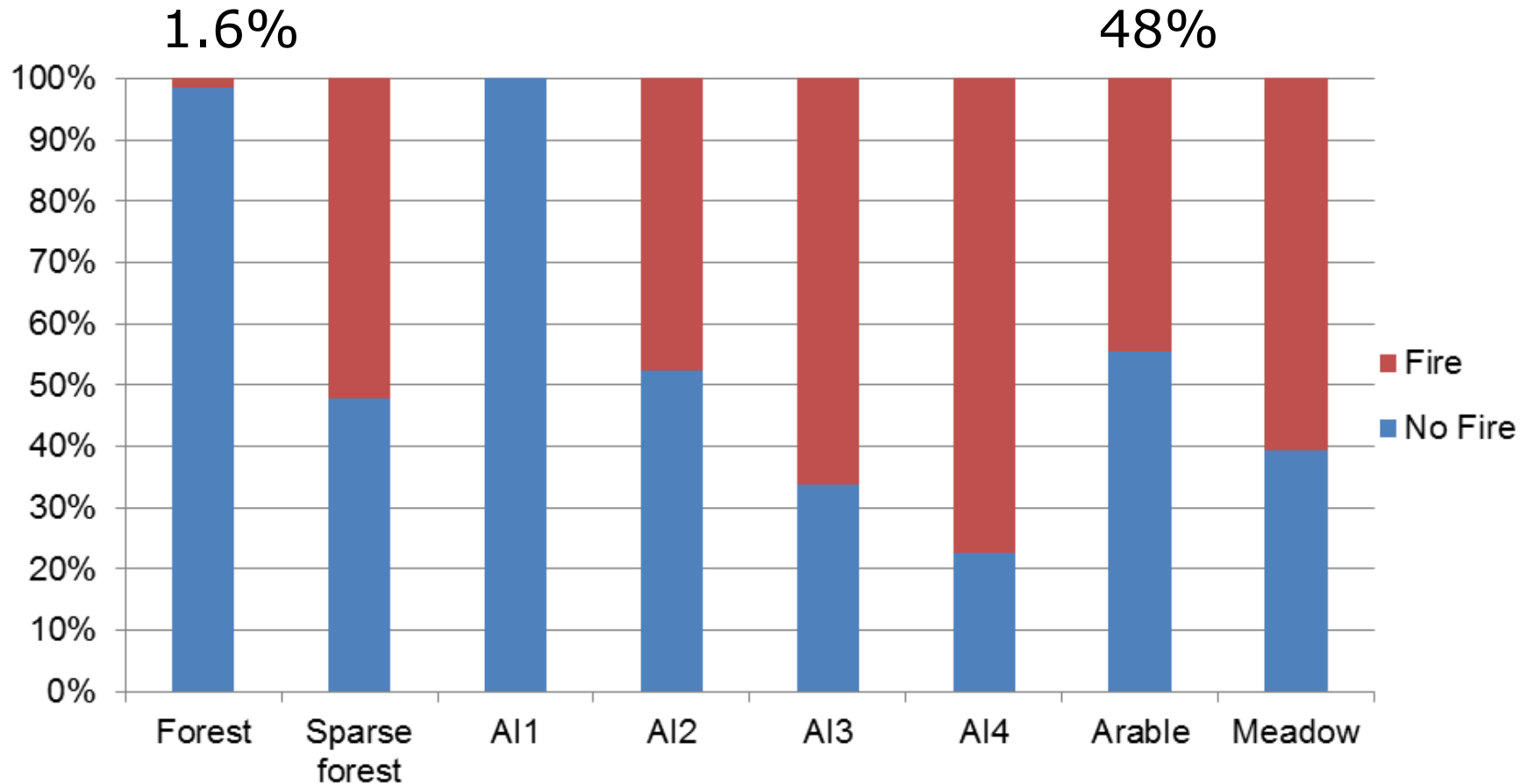


# Пространственно-временные кластеры горевших полигонов



OPTICS алгоритм в системе V-Analytics (Andrienko et al., 2013).  
Параметры: не менее 3х полигонов с пожарами в радиусе 300 м  
в текущий или соседние года. Показаны кластеры не менее чем  
из 10 полигонов. Все – рядом с дорогой /поселением / границей

# Процент площади, затронутой и не затронутой пожаром, по типам угодий



AI1 – поля с однородной структурой зарастания

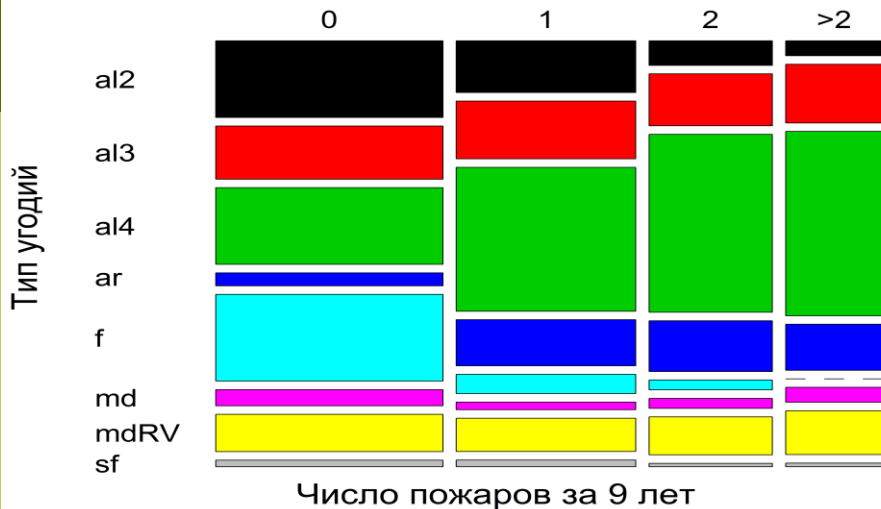
AI2 – поля с высоким покрытием деревьев пятнами

AI3 – поля с подростом малого покрытия

AI4 – поля без деревьев или с единичными деревьями



# Диаграмма таблицы сопряженности типов угодий с наблюдаемой частотой пожаров (0, 1, 2 и больше двух) за 9 лет, когда были зафиксированы пожары



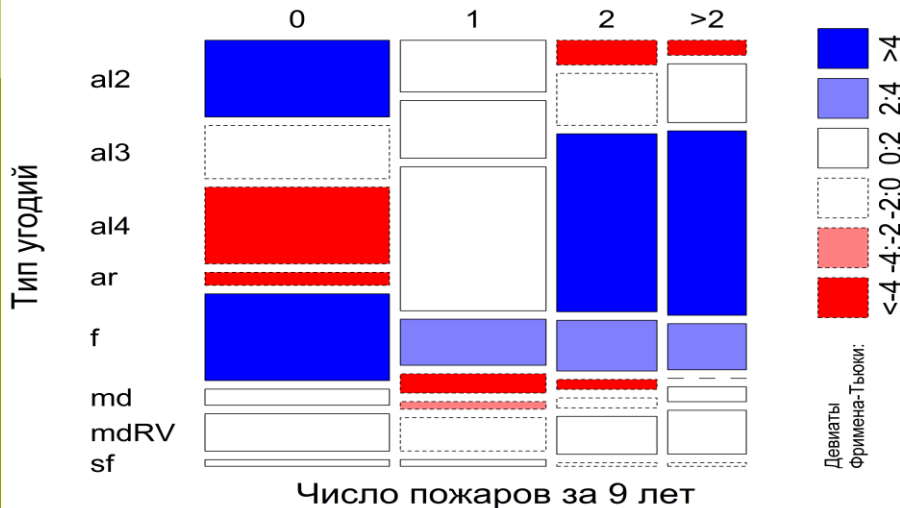
al2, al3, al4 – зарастающие пашни с густым подростом деревьев пятнами, с подростом средней густоты и без деревьев или с единичными деревьями;

ar – пашни;

f – лес;

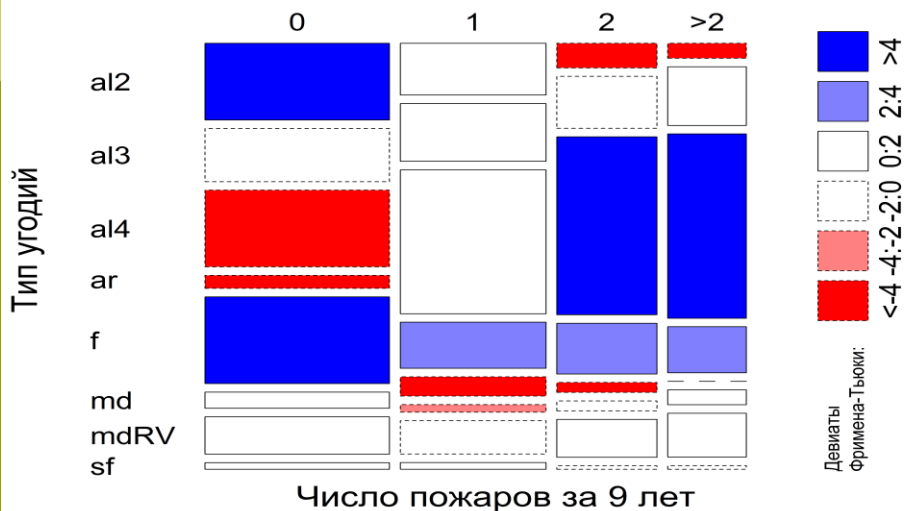
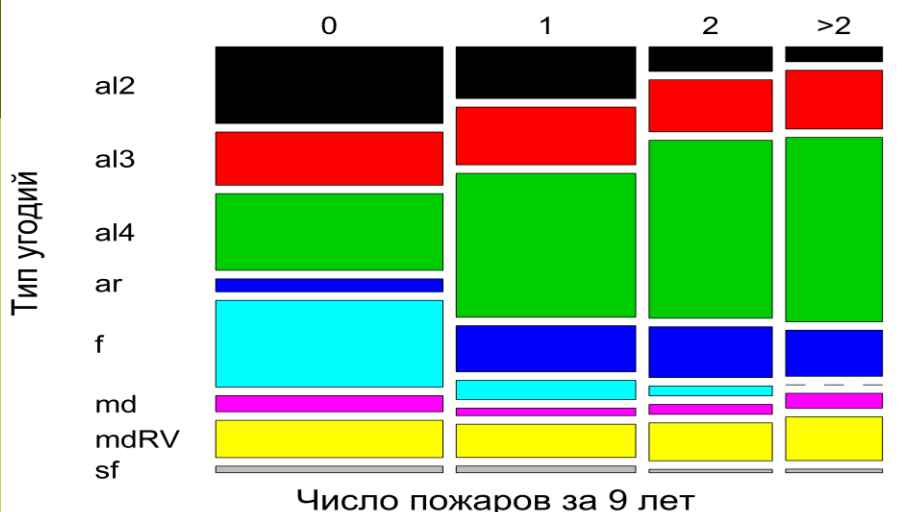
md, mdRV – луга и кустарники вне долин и по долинам малых рек и ручьев;

sf – разреженный лес



$\chi^2 = 618.4$  при 21 степени свободы,  $P < 0.001$ .

# Диаграмма таблицы сопряженности типов угодий с наблюдаемой частотой пожаров (0, 1, 2 и больше двух) за 9 лет, когда были зафиксированы пожары



На зарастающих пашнях без деревьев или с единичными деревьями (al4) пожары наблюдались чаще и в большем числе полигонов, чем во всех остальных угодьях; горели они существенно больше ожидаемого. Больше ожидаемого (но не в такой степени как al4), 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.



---

Выявлена отрицательная связь частоты пожаров и густоты древесной растительности:

частота пожаров и доля горевших площадей уменьшается от бывших пашен без древесной растительности к бывшим пашням с густым подростом.

Чем меньше интенсивность пожарных воздействий на зарастающих пашнях, тем выше сомкнутость древостоя/подроста пионерных видов деревьев

# Статистически значимые результаты биномиальной логистической регрессии: отклик – наличие пожара

Predictor	Estimate	Std. Error	Wald z-value	P	Odds ratio	95% CI for odds ratio
<b>Intercept</b>	-5.925	0.478	-12.937	<0.001	0.003	0.001-0.007
<b>Continuous</b>						
<b>Polygon area, log<sub>2</sub></b>	0.190	0.027	7.098	<0.001	1.209	1.152-1.276
<b>Ratio of burnt polygons to the number of total neighboring polygons, %</b>	0.027	0.002	16.790	<0.001	1.027	1.024-1.030
<b>Categorical</b>						
<b>Existence of settl. (1/0)</b>	0.198	0.090	2.207	0.027	1.219	1.023-1.454
<b>AI2</b>	1.402	0.180	7.847	<0.001	4.063	2.875-5.795
<b>AI3</b>	2.080	0.177	11.744	<0.001	8.005	5.686-11.393
<b>AI4</b>	2.836	0.163	17.375	<0.001	17.054	12.456-23.636
<b>Arable</b>	3.452	0.228	15.138	<0.001	31.555	20.386-49.885
<b>Meadow</b>	2.249	0.181	12.432	<0.001	9.475	6.681-13.585
<b>Sparse forest</b>	1.903	0.339	5.610	<0.001	6.707	3.467-13.173

McFadden's pseudo  $R^2 = 0.217$ . le Cessie-van Houwelingen-Copas-Hosmer global goodness-of-fit test:  $z = 1.5387$ , **P-value = 0.1239** – выбранные переменные хорошо объясняют факт наличия/отсутствия пожара



# Статистически значимые результаты логистической регрессии: отклик – наличие пожара

Predictor	P	Odds ratio	95% CI for odds ratio
Polygon area, $\log_2$	<0.001	1.209	1.152-1.276
Ratio of burnt polygons to the number of total neighboring polygons, %	<0.001	1.027	1.024-1.030
Existence of settl. (1/0)	0.027	1.219	1.023-1.454
AI2	<0.001	<b>4.063</b>	2.875-5.795
AI3	<0.001	<b>8.005</b>	5.686-11.393
AI4	<0.001	<b>17.054</b>	12.456-23.636
Arable	<0.001	<b>31.555</b>	20.386-49.885
Meadow	<0.001	<b>9.475</b>	6.681-13.585
Sparse forest	<0.001	<b>6.707</b>	3.467-13.173

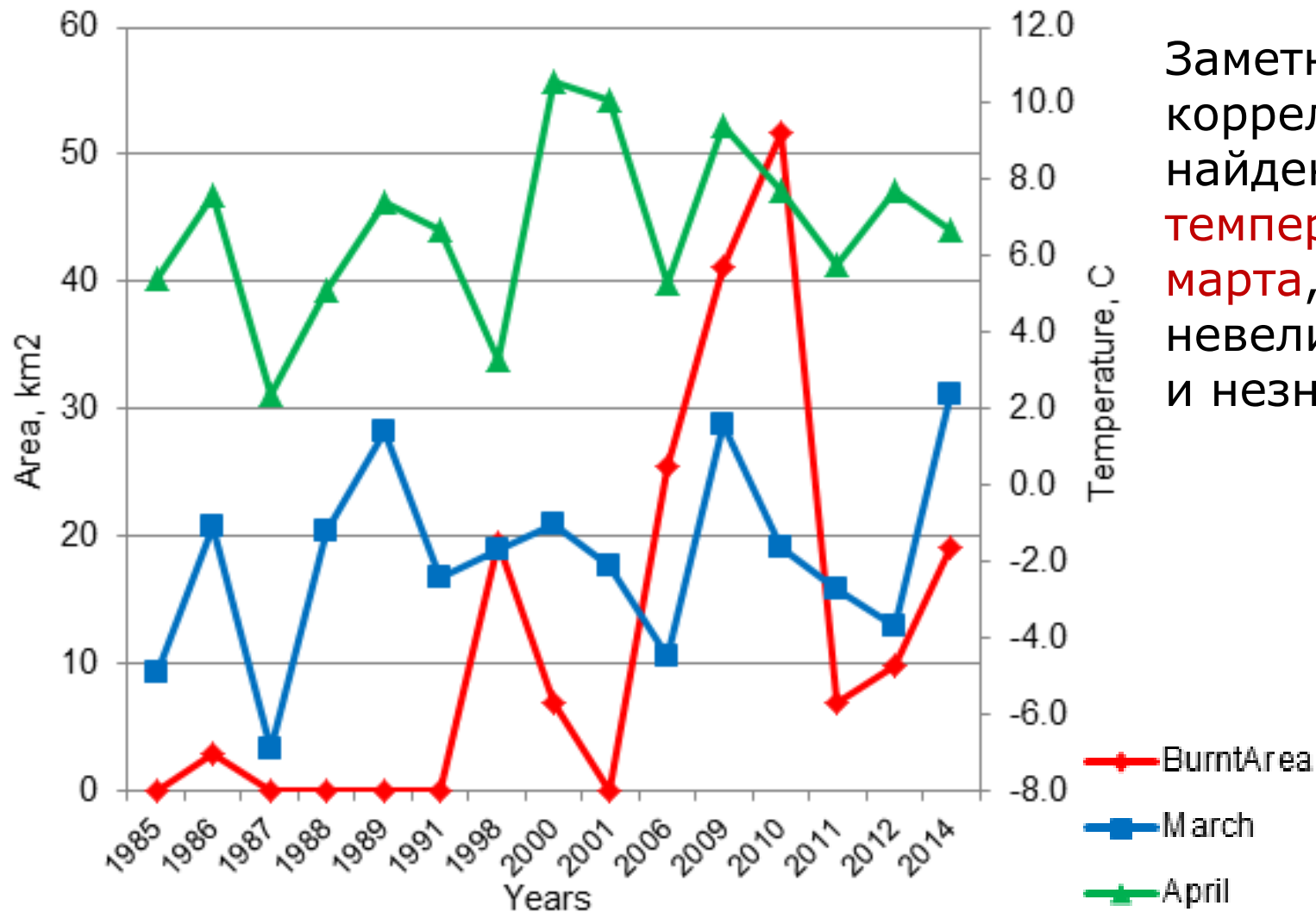
Presence of roads and small rivers in the surroundings did not change the fire odds, while the presence of **settlements was a rather important factor.**

Fire odds increased with an extension of polygon area and **with a growth of a number of burnt polygons in the surroundings.**

Fire odds also depended on land type categories: they were highest for the 'Arable' land type and fell in a line from AI4 to AI2; they were also rather high in meadows and sparse forests.

# Климат и площади пожаров

## Площадь пожаров (log) и среднемесячные температуры марта и апреля

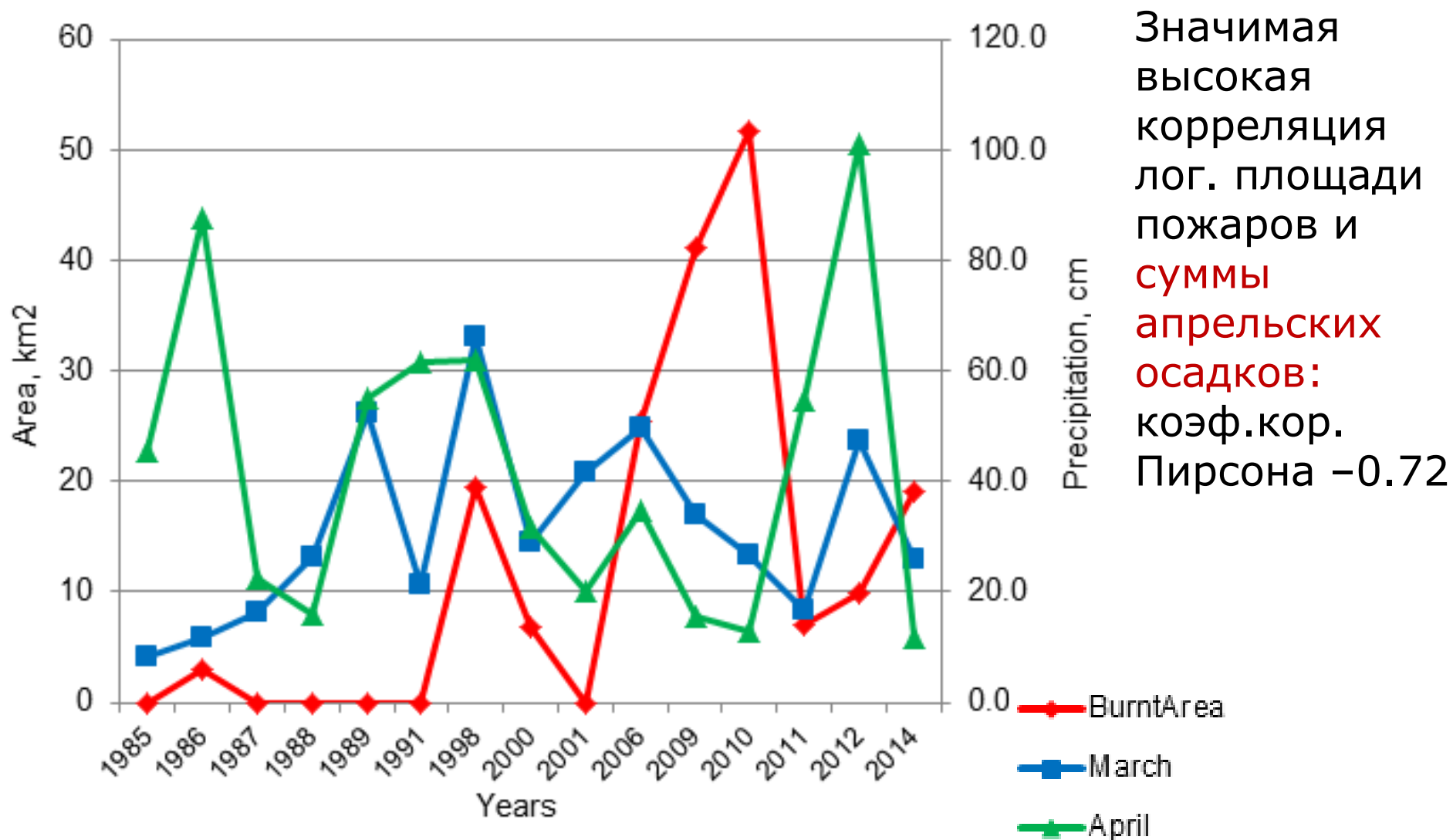


Заметная корреляция найдена для температур марта, но она невелика (0.19) и незначима



# Климат и площади пожаров

Площадь пожаров (log) и суммы осадков (log) марта и апреля



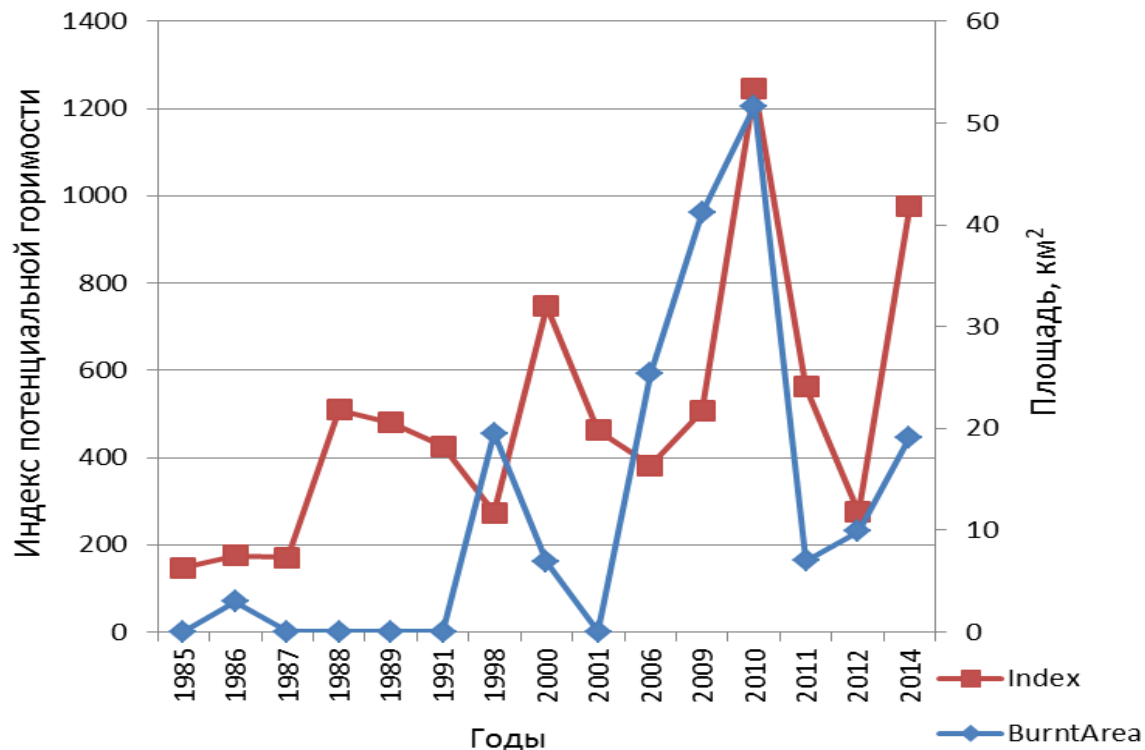
# Корреляция площади пожаров с индексом горимости В.Г. Нестерова (1949)

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

$T_i$  – температура воздуха (°C) в 12 часов дня;  $d_i$  – дефицит точки росы ( $d_i = T_i - \tau_i$ );  $\tau_i$  – температура точки росы (°C) в 12 часов;  $n$  – число дней после последнего дождя с количеством осадков не менее 3 мм/сут.

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

$g_{i-1}$  – значение индекса за предыдущий день;  
 $K$  – модифицирующий множитель, принимающий значения от 1 до 0 в зависимости от суточной суммы осадков  $R$

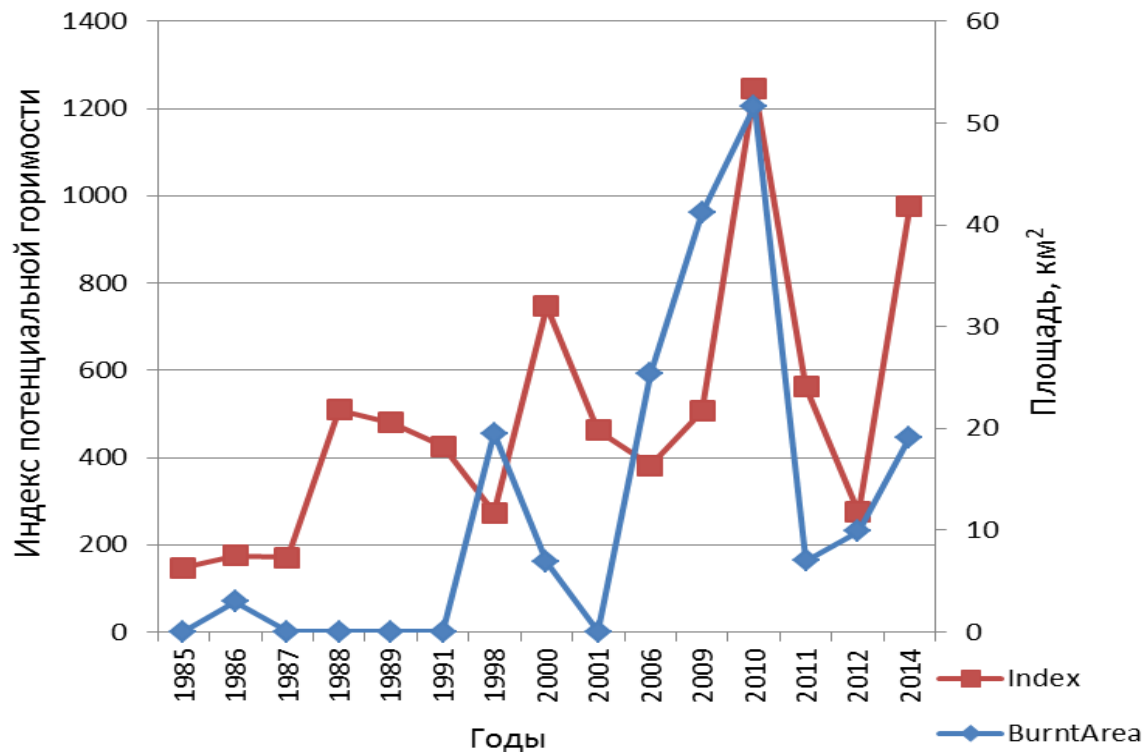


Площадь пожаров и апрельские значения модифицированного индекса потенциальной горимости Нестерова



# Корреляция площади пожаров с индексом горимости В.Г. Нестерова (1949)

Довольно высокая, хотя статистически не значимая корреляция лог. площади пожаров и значениями модифицированного индекса горимости Нестерова, посчитанными для апреля (0.53), а также логарифмов площади пожаров и числа дней в апреле со средним и высоким классами пожароопасности (0.58)



Площадь пожаров и апрельские значения модифицированного индекса потенциальной горимости Нестерова

## Заключение

---

- Анализ космических снимков Landsat за 1985-2016 гг. позволил реконструировать минимальные значения площади и частоты травяных пожаров на модельном участке
- Разнообразие вариантов зарастания бывших пашен различается по участию древесной растительности и напрямую зависит от наличия и частоты травяных пожаров
- Пространственную структуру древесной растительности можно считать диагностическим признаком сообществ, развивающихся автогенно или аллогенно



## Заключение

---

Весенние травяные палы являются случайным событием, в основном зависящим от человека.

Однако, площадь травяных пожаров зависит от климатических факторов и наличия горючего материала.

Высокая температура в марте вызывает быстрое таяние снега. Низкая сумма осадков в апреле приводит к высушиванию травы, обильной на зарастающих землях, которые уже были подвержены пожарам (ряд от А14 –А13-А12); вероятность возгорания таких участков увеличивается.

Травяные пожары уничтожают подрост деревьев и способствуют заселению и поддержанию трав, прежде всего *Calamagrostis epigeios* и лугово-опушечных видов, относимых к бурьяну (*Tanacetum vulgare*, *Artemisia vulgaris*, *Cirsium arvense* и др.).

Дернина и ветошь трав препятствуют инвазии деревьев. Формируется мозаика древесных и луговых (бурьянистых) участков.

При частых пожарах растительность десятилетиями может оставаться на бурьянистой стадии





# Благодарности

---

Благодарим Наталью и Геннадия Андриенко за помощь в использовании авторского программного обеспечения V-Analytics

Влияние травяных пожаров на видовое и экосистемное разнообразие заброшенных сельскохозяйственных земель южного Подмосковья

*РФФИ 17-44-500297 p\_a\_центр*

Оценка динамики экосистемного и видового разнообразия выведенных из оборота сельскохозяйственных земель при разных вариантах восстановительных сукцессий

*РФФИ № 14-44-03666 p\_центр\_a*



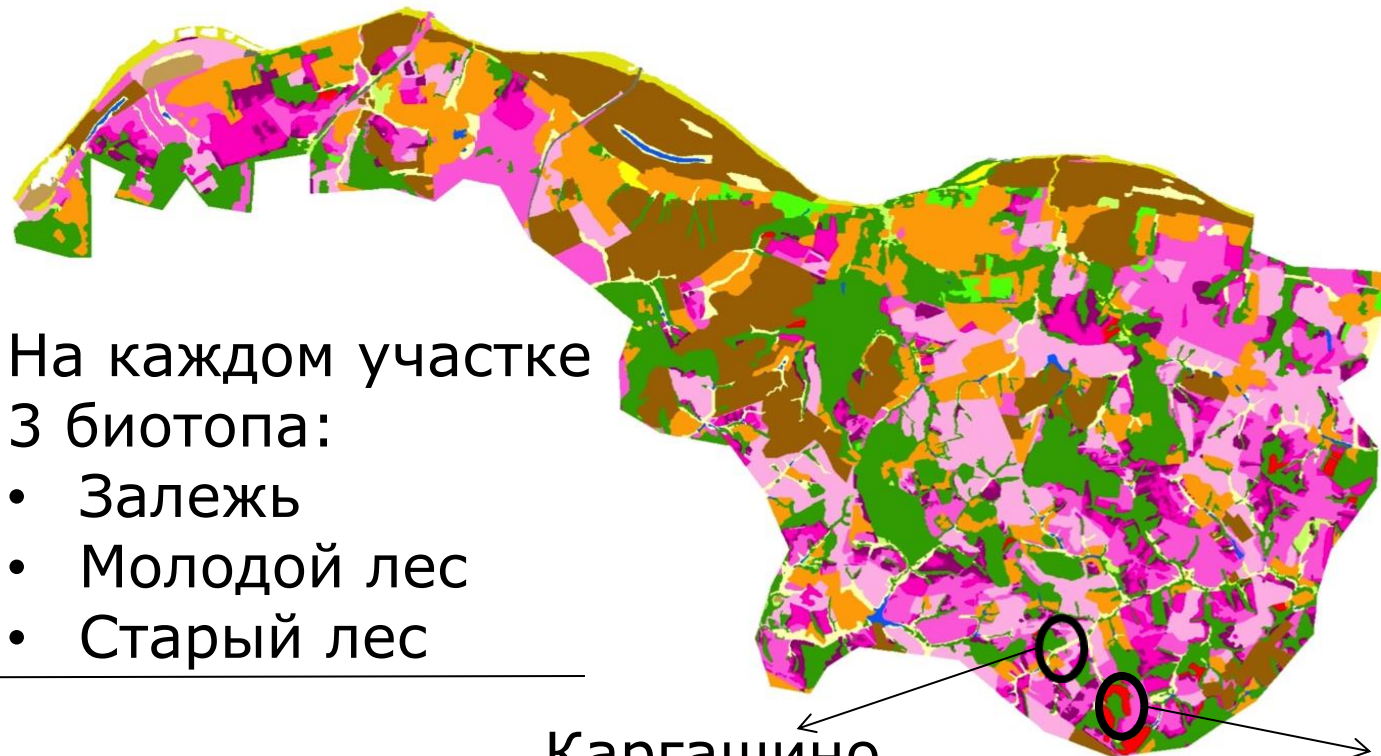
**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**





**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**





На каждом участке  
3 биотопа:

- Залежь
- Молодой лес
- Старый лес

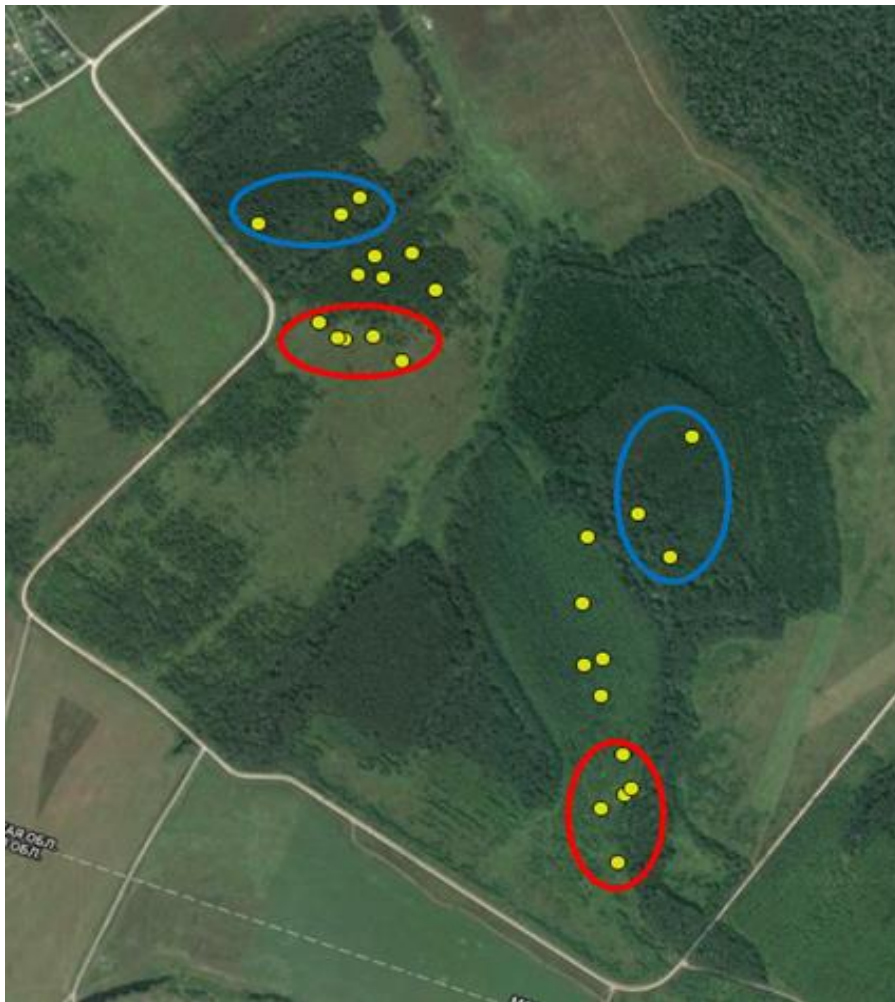
Каргашино

Агарино

26 геоботанических описаний (по 5 + по 3 в "лесу")  
18 почвенных проб в 10-см слое  
содержания Собщ., Нобщ., Сорг., рН водн.,  
рН KCl, содержание обменных оснований (Ca,  
Mg, K, Na), содержание K<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  
гранулометрический состав

# Места проведения геоботанических и почвенных исследований на участках Каргашино-Агарино

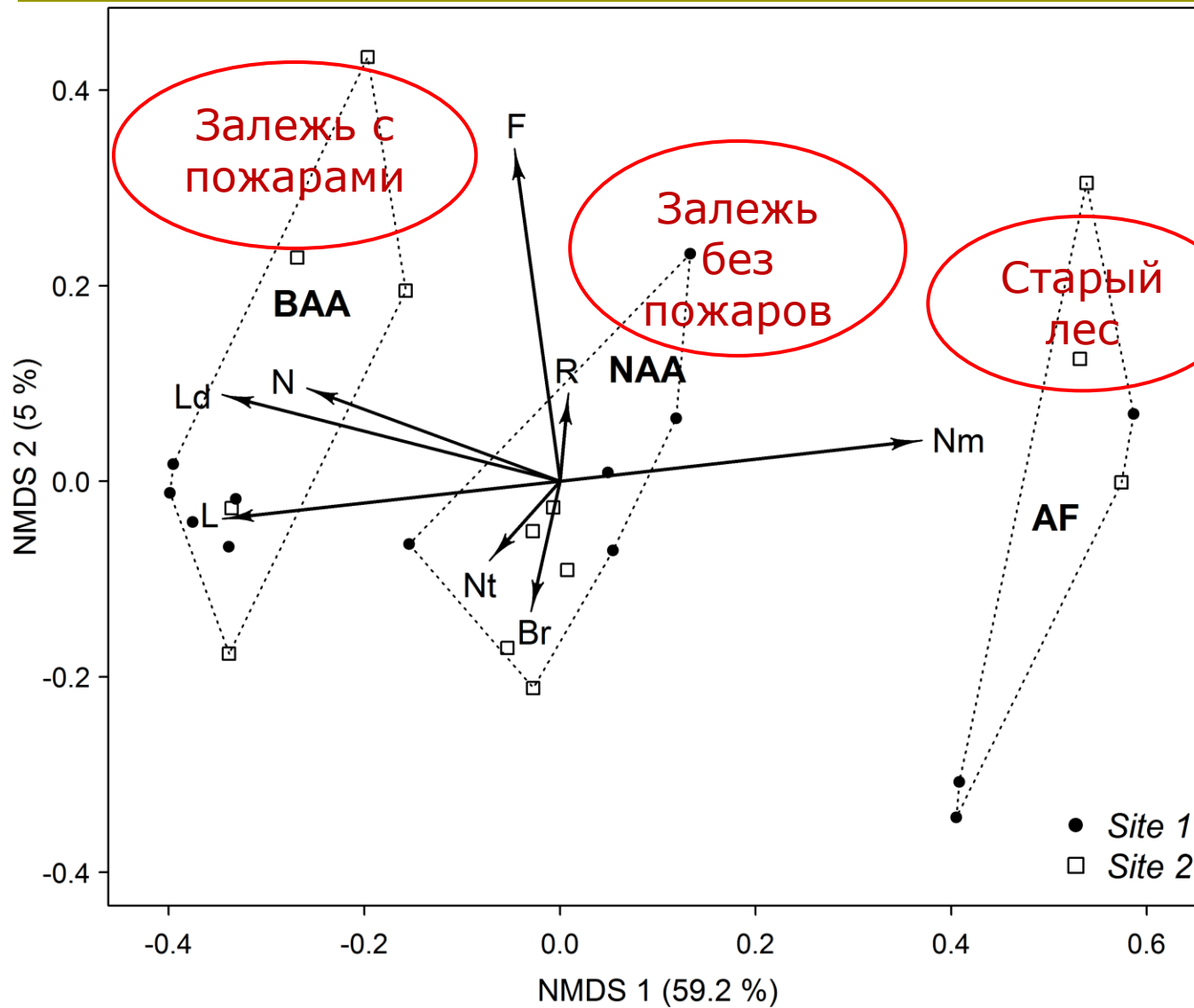
---



High-resolution satellite image with sample plots at the local scale (Yandex Maps, 2017).

Blue circles contain plots in patches of mature forests, red circles contain plots in burnt abandoned arable lands, and points without circles are plots in unburnt abandoned arable

# NMDS ordination of the vegetation data



F, R, N, L –  
 увлажнение,  
 кислотность,  
 богатство почвы  
 и освещенность  
 Nm неморальные,  
 Br бореальные,  
 Ld светлюбивые  
 (Md + Pn) виды

NAA unburnt  
 abandoned arable,  
 BAA burnt ab.  
 arable, and  
 MF patches of  
 mature forest.

Stress is 0.11



# **Оценка вкладов участков и биотопов в вариацию физико-химических характеристик почв**

однофакторный дисперсионный анализ ANOVA и v-test (Husson et al., 2017)

# **Оценка влияния почвенных характеристик на участие видов напочвенного покрова**

каноническая (прямая) ординация геоб. описаний посредством анализа избыточности (dbRDA, distance-based redundancy analysis) (Legendre, Anderson, 1999) с использованием расстояния Брея-Кертиса

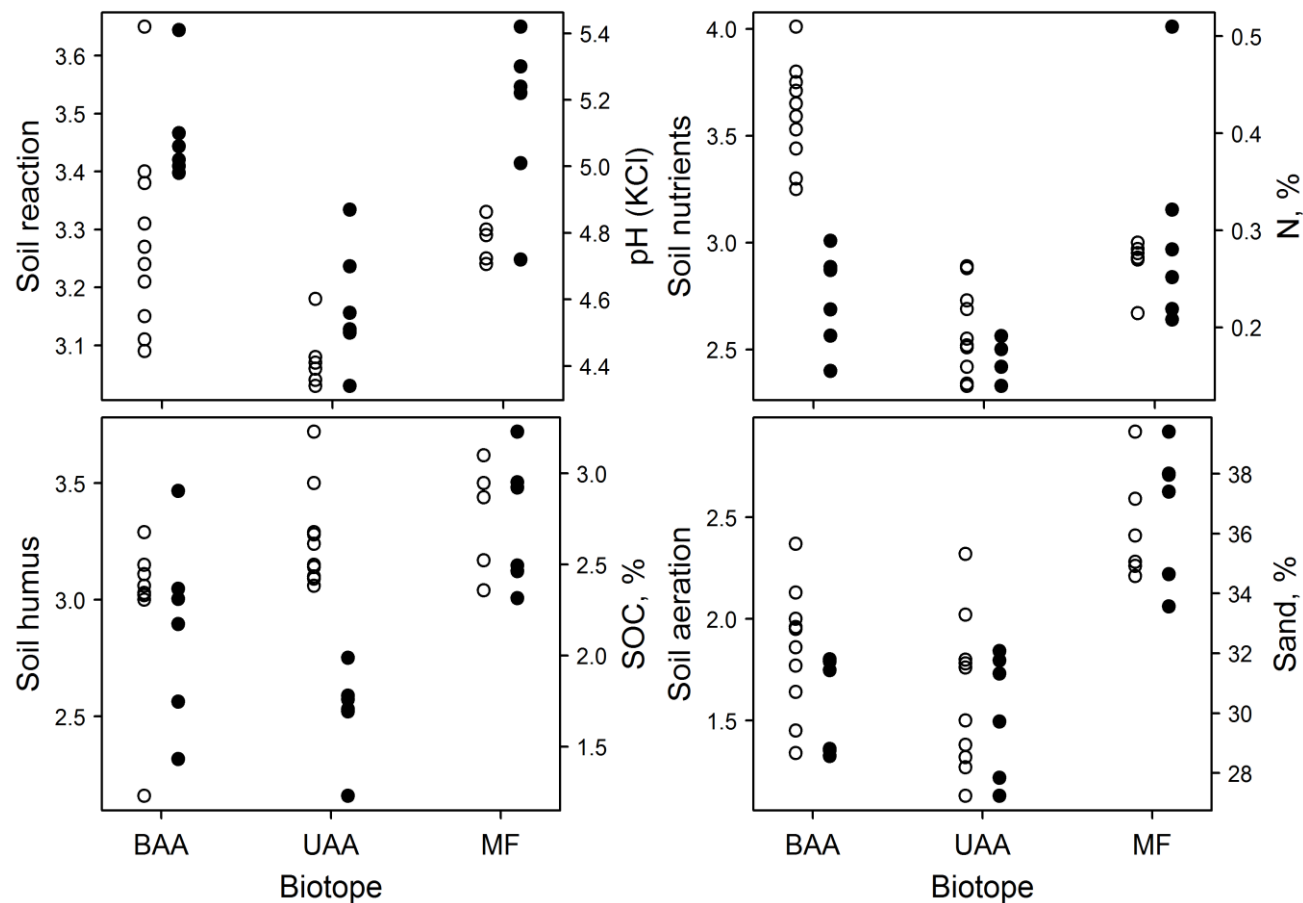
Статистический анализ выполняли в среде статистического программирования R (R Core Team, 2017).

# Results of one-way ANOVAs and v-test analyses of the chemical and physical characteristics of soils in the biotopes

Only Ca<sup>2+</sup> values were significantly different in two sites. Practically all chemical soil variables (except pH(H<sub>2</sub>O), Na<sup>+</sup>, and Mg<sup>2+</sup>) were statistically different in the studied biotopes

	ANOVA		Burnt arable (grassy field)		Unburnt arable (young forest)		Mature Forest	
	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>p-adjust</i>	<i>v-test</i>	<i>p-adjust</i>	<i>v-test</i>	<i>p-adjust</i>	<i>v-test</i>	<i>p-adjust</i>
P2O <sub>5</sub>	<b>0.776</b>	0.000	<b>3.611</b>	<b>0.002</b>	-1.469	0.304	-2.142	0.161
pH.KCl	<b>0.662</b>	0.002	1.409	0.477	<b>-3.340</b>	<b>0.006</b>	1.931	0.214
C/N	<b>0.646</b>	0.002	<b>-3.005</b>	<b>0.016</b>	0.292	0.770	<b>2.713</b>	<b>0.053</b>
K	<b>0.493</b>	0.024	<b>2.887</b>	<b>0.019</b>	-1.638	0.304	-1.249	0.635
Ca	<b>0.472</b>	0.025	2.125	0.134	<b>-2.686</b>	<b>0.043</b>	0.561	1.000
C	<b>0.429</b>	0.030	-0.681	0.991	-1.923	0.218	<b>2.605</b>	<b>0.064</b>
N	<b>0.391</b>	0.030	-0.119	0.991	-2.172	0.149	2.291	0.132
Sand	<b>0.753</b>	0.000	-1.714	0.087	-1.862	0.063	<b>3.577</b>	<b>0.000</b>

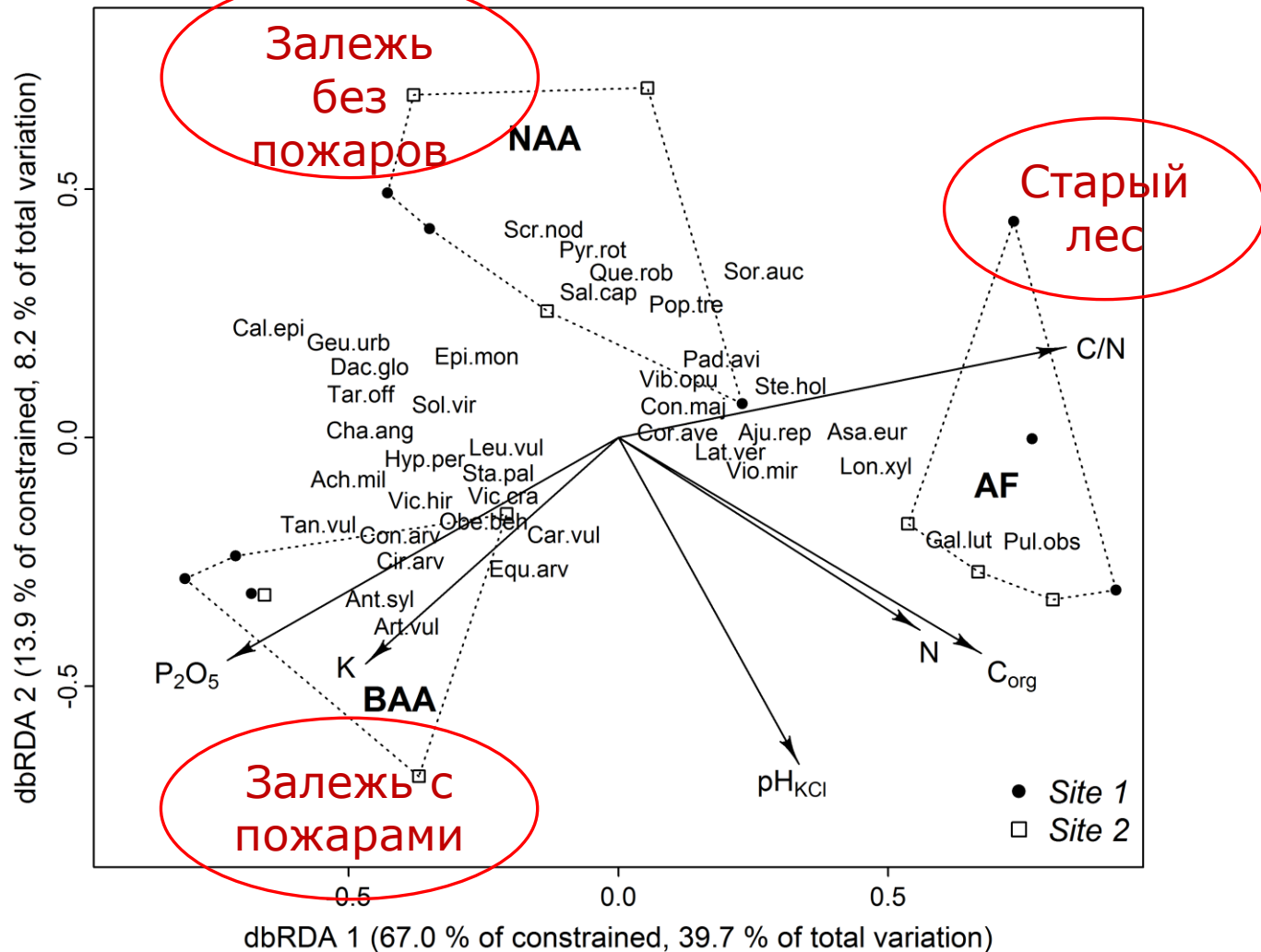
# Сопоставление результатов почвенных исследований биотопов с их экологическими характеристиками, рассчитанными по шкалам Ландольта (Landolt et al., 2010)



Soil characteristics (black dots) and Landolt's scores (white dots) for the plots in the studied biotopes: BAA and UAA burnt and unburnt abandoned arable, and MF mature forest



db-RDA ordination triplot relating the plant species to the selected soil variables. Letters represent positions of the significant ( $P < 0.05$ ) indicator species with IndVal  $\geq 50\%$

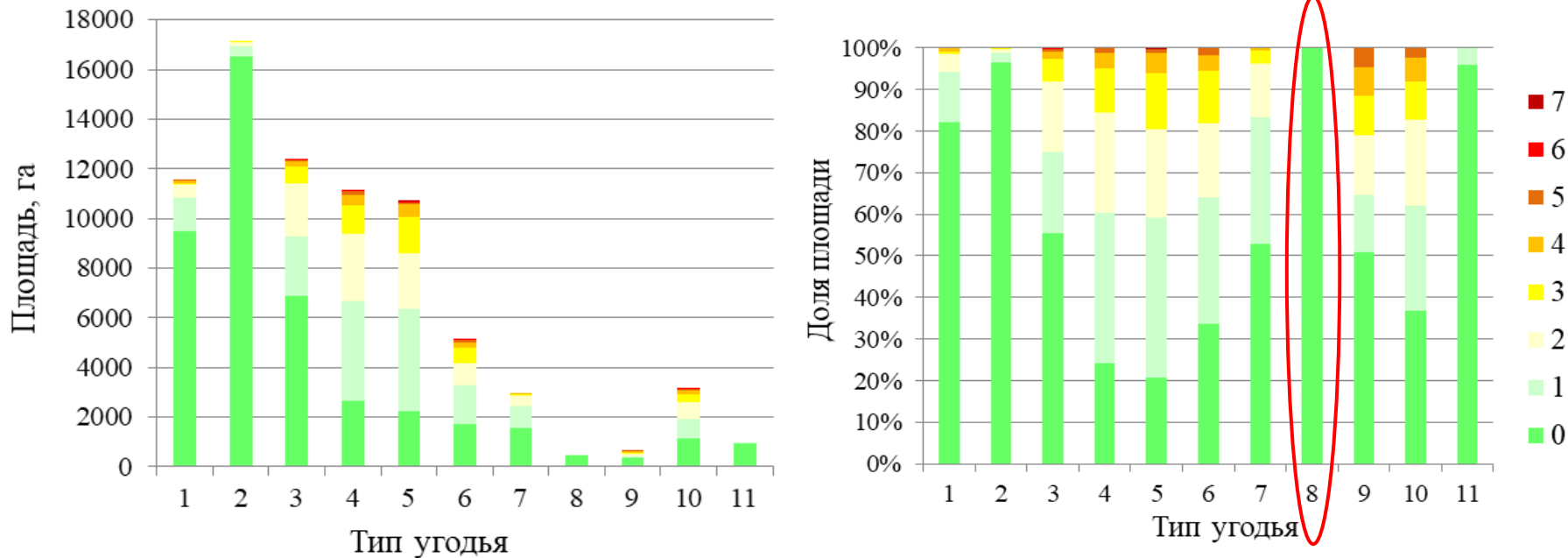


## Заключение

---

- Травяные пожары существенно влияют на состав и структуру растительных сообществ, на сукцессионное состояние экосистем и характеристики почв
- Содержание  $P_2O_5$ , кислотность почвы, отношение концентраций C/N, содержание K,  $C_{орг.}$  и N являются характеристиками, в большой мере зависимыми от типов биотопов, выделяемых на зарастающих пашнях с учетом частоты пожарных воздействий, и определяющими, в свою очередь, состав видов напочвенного покрова

# Распределение площадей и доли площадей гарей с разным числом пожаров (от 0 до 7) по типам угодий



Типы угодий: 1 населенные пункты; 2 лес; 3 пашня; 4–8 зарастающие пашни: 4 без деревьев, 5 с единичными деревьями, 6 с подростом средней густоты, 7 с густым подростом пятнами и 8 с равномерным зарастанием деревьями; 9 луга вне долин малых рек и ручьев; 10 луга и кустарники по долинам малых рек и ручьев; 11 луга и кустарники в пойме р. Ока



# Оценка влияния участков-биотопов на эколого-ценотическую структуру напочвенного покрова

---

- Многомерный дисперсионный анализ (MANOVA)  
RDA (redundancy analysis), анализ избыточности
- Одномерный дисперсионный анализ (ANOVA)
- Попарные сравнения биотопов с коррекцией р-значений на множественность сравнений

## Результат

значимым фактором для эколого-ценотической структуры растительности является «**Тип биотопа**», фактор «Участок» (как и взаимодействие этих факторов) не вносит значимых различий в ЭЦ-структуру

Типы биотопов и все пары биотопов значимо различаются по видам **неморальной и лугово-опушечной** групп.  
Бореальные виды не вносят значимых различий, но их вклад специфичен в разных биотопах

# Онтогенетическая структура популяций деревьев на зарастающих пашнях

