

Р.М. Коган, В.А. Глаголев

(Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН;

e-mail: koganrm@mail.ru)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПРОГНОЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Исследовано применение методов интерполяции для восстановления метеорологических показателей опасности лесных пожаров по условиям погоды на территории Хабаровского края и Еврейской автономной области.

Ключевые слова: метеорологические показатели опасности лесных пожаров, интерполяция, прогноз.

R.M. Kogan, V.A. Glagolev

SPATIAL FORECAST OF METEOROLOGICAL PARAMETERS DANGER OF FOREST FIRES

Investigated the use of interpolation methods for recovery of values meteorological parameters danger of forest fires to weather conditions on Khabarovsk territory and on Jewish Autonomous Region.

Key words: meteorological parameters danger of forest fires, interpolation, forecast.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 7 марта 2014 г.

Проблема предотвращения лесных пожаров – одна из ключевых для оптимизации экологического мониторинга и минимизации воздействия на компоненты геосистем.

Для прогноза опасности лесных пожаров (вероятности их возникновения) используются локальные данные *гидрометеорологических станций (ГМС)* или станций дистанционного зондирования атмосферы, которые затем применяются для расчёта показателей, индексов и классов опасности. Наиболее известные системы реализованы в Европе, Америке и Австралии, например: канадская CFFDRS, американская NFDRS, французская Numerical Risk, австралийская FDRS, итальянские IMPI и IREPI INDEX, португальская PORT, финская FFMI и др. [1].

Для пространственного прогноза лесных пожаров необходимо применение интерполяционных методов восстановления или исходных данных или показателей, рассчитанных на их основе. Для первого направления предложено использовать метод "обратно-взвешенные расстояния" [2-4], для второго – показана возможность восстановления метеорологического индекса (Fire Weather Index (FWI)) с использованием трёх интерполяционных методов ("обратно – взвешенные расстояния", "локальная полиномиальная интерполяция второй степени", "полиномиальная регрессия в виде кубического сплайна") [5]. Однако в работе [5] проводится восстановление дискретного показателя, значение которого нерегулярно прерывается в зависимости от порогового суточного объёма осадков, в ней не обоснован выбор метода интерполяции, не показана возможность использования данного метода на другой территории.

Целью проведённого автором настоящей статьи исследования, является разработка алгоритма восстановления показателей пожарной опасности по условиям погоды и верификация его на территории Дальнего Востока России. Для этого необходим анализ методов интерполяции и возможности применения их для оценки пожарной опасности; определение параметров проверки методов; разработка модулей реализации интерполяции и её кросс-валидации; верификация восстановленных значений *лесопожарного показателя*.

Методы интерполяции выбраны из группы детерминистических и геостатистических с географической привязкой данных [6]. К детерминистическим относятся "обратно-взвешенные расстояния"; "Шепарда"; "минимизация кривизны"; "полиномиальная регрессия"; "базисные радиальные функции"; "триангуляция Делоне с линейной интерполяцией"; "естественные соседи"; "локальная полиномиальная интерполяция". Их общим принципом является нахождение весовой функции, отражающей динамическое изменение показателей между узлами интерполирования, а также проверка сравнением восстановленных и фактических данных по выбранным узлам интерполирования. Геостатистические методы, например "Кригинг", базируются на статистических закономерностях и используются для более точного и сложного моделирования поверхностей, включая оценку ошибок и вычисление вероятностных параметров поверхностей.

Для интерполяции необходимо выбрать показатель, имеющий монотонный и непрерывный характер. При количественной оценке пожарной опасности на территории России используются два показателя [7]. Лесопожарный показатель (L_i) на текущий i -й день рассчитывается на основе дневной температуры воздуха (t_i) и точки росы (τ_i), измеренных в 13-15 часов местного времени:

$$L_i = t_i(t_i - \tau_i). \quad (1)$$

Вторым является комплексный показатель P_i , для расчёта которого используется значение L_i и сведения об объёме выпавших осадков (x_i) с 9 часов предыдущего дня до 9 часов текущего дня. Для "сухих" дней (при $x_i < 3$ мм/сут.) P_i вычисляется путем ежедневного суммирования L_i данного и предшествующих дней, а при наступлении "мокрых" дней (при $x_i \geq 3$ мм/сут.) P_i равен L_i текущего дня:

$$P_i = \begin{cases} L(t_i, \tau_i), & \text{при } x_i > 3 \text{ мм/сут.}; \\ L(t_i, \tau_i) + P_{i-1}, & \text{при } x_i \leq 3 \text{ мм/сут.} \end{cases} \quad (2)$$

или

$$P_i = L(t_i, \tau_i) + P_{i-1}K(x_i), \quad (3)$$

где коэффициент $K(x_i)$ задается на основе предельного количества осадков, при котором устраняется возможность загорания напочвенного покрова; он может принимать два значения: при x_i более 3 мм/сут. $K(x_i) = 0$; при x_i менее 3 мм/сут. $K(x_i) = 1$.

Для интерполирования следует использовать функцию (1), поскольку, в отличие от функций (2) и (3), она является монотонной и носит непрерывный характер без ограничений (рис. 1).

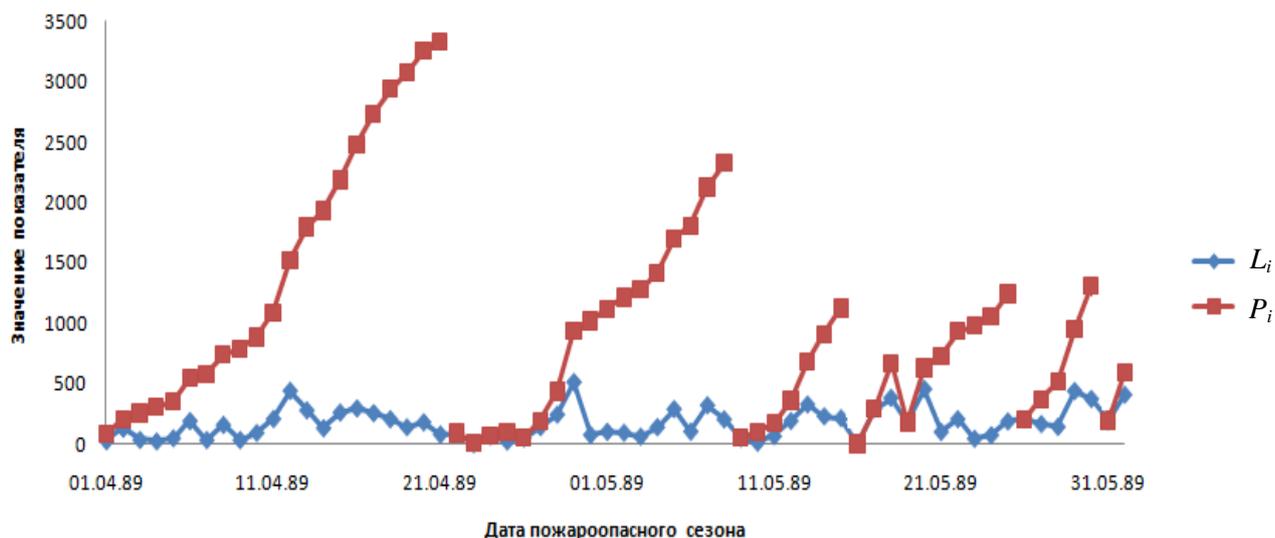


Рис. 1. Значения лесопожарного L_i и комплексного P_i показателей в весенний период 1989 г. (по данным ГМС "Биробиджан")

Метрологические характеристики каждого метода определялись по двум параметрам:

- среднеквадратическая ошибка интерполяции $RMSE_m$ (Root Mean Square Error):

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - L_{in})^2},$$

где N – количество ежедневных расчётов;

L_i и L_{in} – значения фактического и интерполяционного показателей в i -й день [5, 6];

- коэффициент Нэша-Сатклиффа или эффективность метода E_m [8]:

$$E_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (L_i - L_{in})^2}{\sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L})^2},$$

где \bar{L} – среднее значение показателя.

Учитывались следующие требования:

- среднеквадратическая ошибка метода $RMSE_m$ должна иметь наименьшее значение;

- коэффициент эффективности E_m должен быть больше 0,5 (1 – метод является идеальным; $\geq 0,75$ – хорошим; $\geq 0,5$ – удовлетворительным; $\leq 0,5$ – неудовлетворительным).

Разработан алгоритм проверки методов интерполяции показателя L_i (рис. 2). Вначале задаются координаты контрольной точки, номер метода интерполяции, год пожароопасного сезона. Контрольная точка представлена каждой ГМС, при интерполяции она не используется, в то время как остальные ГМС применяются в качестве узлов интерполяции на каждый день пожароопасного сезона. Затем в информационной системе оценки и прогноза показателей пожарной опасности [9] рассчитываются значения L_i , и экспортируются в текстовый файл с расширением "csv".

Авторский скрипт загружает текстовый файл и передает его виртуальному объекту картографического приложения по технологии Microsoft ActiveX (пример приведен на листинге 1).

```
Sub Main 'Начало скрипта
  Dim SurferApp As Object 'задать переменную виртуального приложения
  Set SurferApp = CreateObject("Surfer.Application") 'создать виртуальный объект
  For YearO = 1960 To 1991 'цикл обработки пожароопасных сезонов
  For DayO = 1 To 214 'цикл обработки дней выделенного пожароопасного сезона
  Data = YearO+"\"+DayO+".csv" 'Формирование пути к файлу данных для загрузки значений узлов
интерполяции обратно-взвешенные расстояния
  SurferApp.GridData(DataFile:=Data, xcol:=1, ycol:=2, zcol:=3, ShowReport:=False, Algorithm:=1,
  OutGrid:=Data+"_InverseDistance.grd") 'Восстановление значений лесопожарного показателя в ячейках
регулярной сети (грид)
  GridFile = Data+"_InverseDistance.grd" 'переменная для хранения имени файла грида
  OutFile = Data+"_InverseDistance.csv" 'переменная для хранения имени файла данных
  SurferApp.GridConvert(InGrid:=GridFile, OutGrid:=OutFile, OutFmt:=srfGridFmtXYZ)'конвертация
файла грида в файл данных
  Next 'следующий день
  Next 'следующий пожароопасный сезон
End Sub 'Окончание скрипта
```

Листинг 1. Программный код авторского скрипта для интерполяции методом "обратно-взвешенные расстояния" в картографическом пакете Surfer 10

В картографическом приложении при выполнении метода интерполяции создается грид файл *.grd, который конвертируется в файл данных *.csv, содержащий координаты центров ячеек грида и восстановленные значения лесопожарного показателя L_i .

Следующие шаги алгоритма выполняются в модуле "Проверка метода интерполяции" (рис. 2): выбирается контрольная ГМС, по её данным производится расчёт фактических значений показателя L_i и сравнение с восстановленными значениями, которые находятся в центре ячейки грида; затем рассчитываются среднеквадратическая ошибка $RMSE_m$ и коэффициент эффективности E_m в контрольной точке за каждый день пожароопасного сезона, результат сохраняется в таблице "Интерполяция" в базе метеорологических данных, состоящей из 6 числовых атрибутов: код расчёта, код метеостанции, год, метод интерполяции, среднеквадратическая ошибка, коэффициент эффективности.

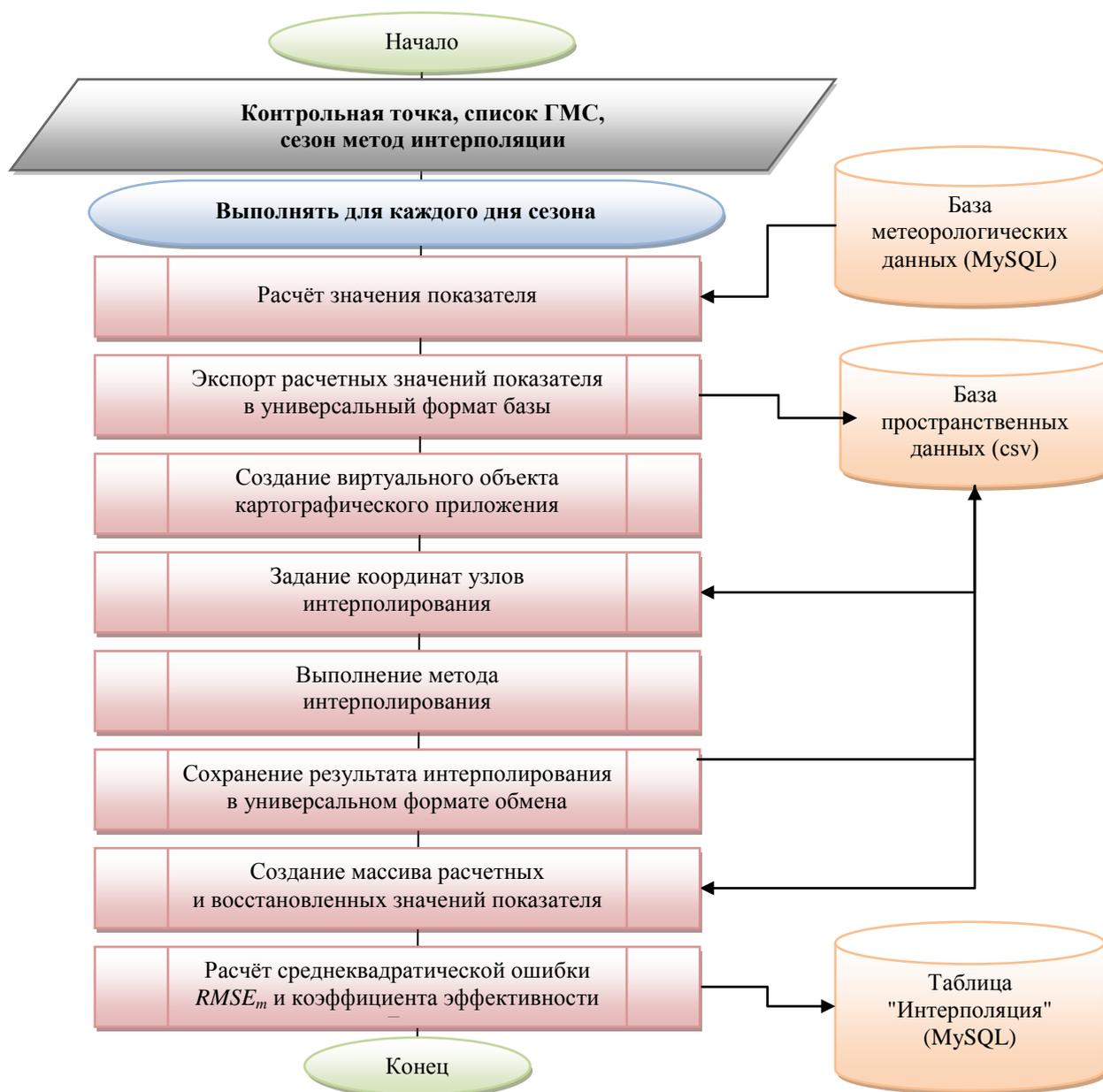


Рис. 2. Блок схема проверки метода интерполяции показателя пожарной опасности в контрольной точке

Определение среднегодового значения $RMSE_m$, E_m и количества пожароопасных сезонов с удовлетворительным коэффициентом эффективности E_m производится агрегирующими SQL-запросам из таблицы "Интерполяция".

В качестве инструмента интерполяции использован картографический пакет Surfer 10, в котором реализованы перечисленные выше детерминистические и геостатистические методы.

Для верификации выбрана территория Хабаровского края и Еврейской автономной области с высокой ежегодной плотностью лесных пожаров.

Расчёт лесопожарного показателя L_i проведен по уравнению (1); прогноз – по уравнениям, опубликованным в [10].

Восстановление L_i осуществлялось в ячейках прямоугольной регулярной сети, наложенной на территорию Хабаровского края и ЕАО размером $0,56^\circ \times 0,56^\circ$ в проекции Пулково 1942. Узлы интерполяции представлены 22 ГМС, из них 16 равнинных и 6 горных (высота над уровнем моря свыше 200 м). По двум метеостанциям "Арка" и "Нелькан" (северная часть Хабаровского края) восстановленные значения не проверялись на достоверность ввиду их большой удаленности от оставшихся узлов интерполирования (около 340 км).

В каждой ячейке сети оценка методов интерполяции осуществлялась ежедневно с 1960 г. по 1991 г., для этого был построен ансамбль из 554658 электронных карт. Пример приведён на рис. 3.

Определение оптимального интерполяционного метода осуществлялось подсчетом случаев, когда ошибка была минимальной и коэффициент эффективности больше 0,5 (табл. 1).

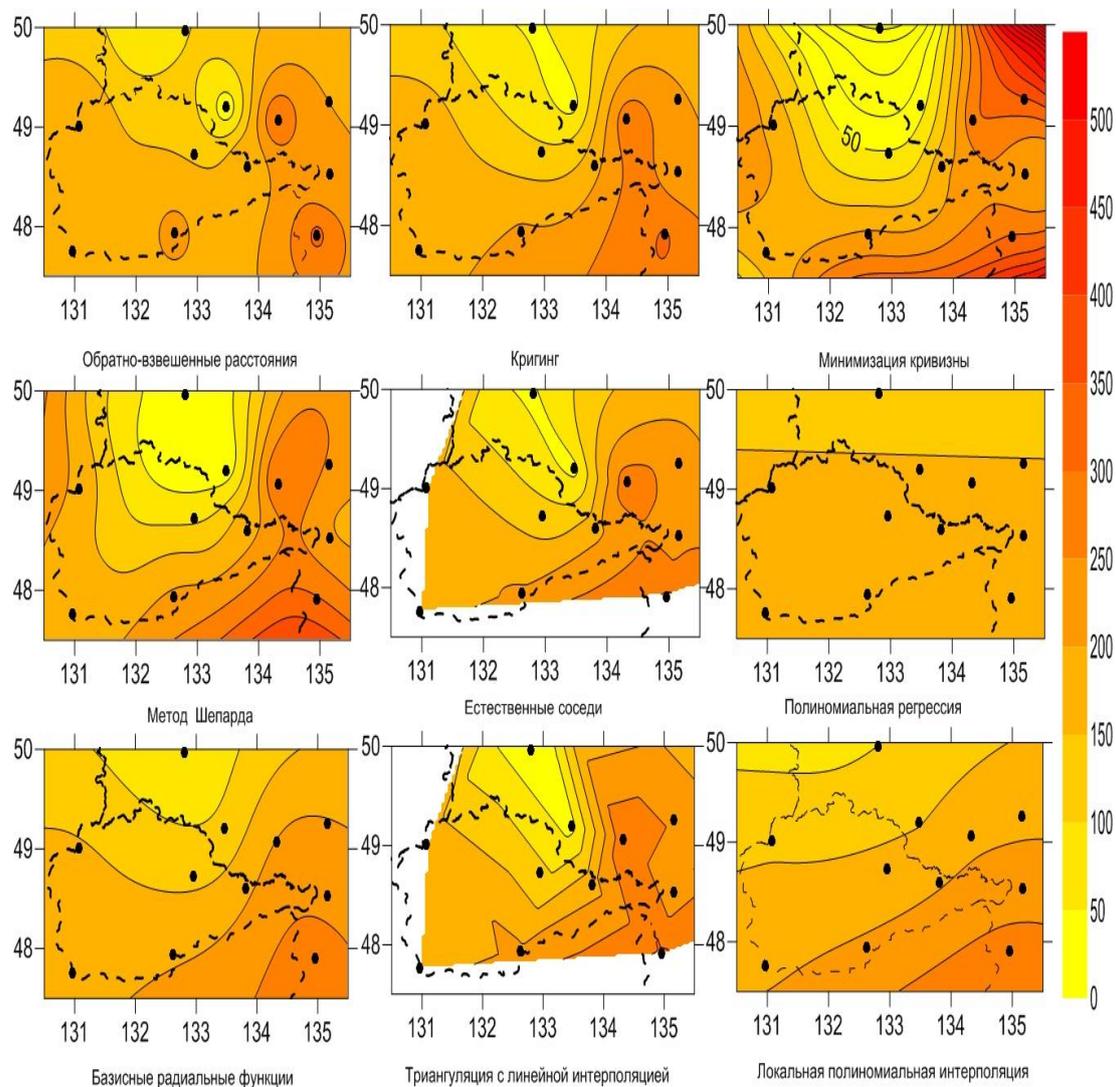


Рис. 3. Электронные карты восстановления комплексного показателя 10 мая 1989 г. (контрольная точка ГМС "Биробиджан"):
 ● ГМС; --- административные границы; — изолинии.

Для территории южной части Хабаровского края и ЕАО оптимальными оказались несколько методов ("обратно-взвешенные расстояния", "полиномиальная регрессия", "локальная полиномиальная интерполяция"), поскольку в 90-93 % сезонов коэффициенты эффективности превышали значение 0,5. В других частях Дальнего Востока эти же методы являются лучшими, но количество сезонов с удовлетворительным и хорошим коэффициентами эффективности не превышало 75 %, что в большинстве случаев связано с проблемой восстановления значений в крайних контрольных точках (табл. 1, №№ 9, 17, 18). Для дальнейших расчётов выбран метод "обратно-взвешенные расстояния", который является приемлемым для всего Дальневосточного региона.

Таблица 1

Количество пожароопасных сезонов с коэффициентом эффективности интерполяции значений показателя $L_i \geq 0,5$ (1960-1991 гг.)

№	Контрольные точки (ГМС)	Метод интерполяции								
		Обратно-взвешенные расстояния	Кригинг	Минимизация кривизны	Метод Шепарда	Метод естественных соседей	Полиномиальная регрессия	Базисные радиальные функции	Триангуляция с линейной интерполяцией	Локальная полиномиальная интерполяция
Количество сезонов с коэффициентом эффективности интерполяции ≥ 5										
Южная часть территории (265 сезонов)										
1	Биробиджан	35	4	0	3	0	28	26	0	28
2	Победа	31	29	27	27	29	31	30	29	31
3	Кукан	28	28	28	127	28	26	28	28	29
4	Хабаровск	31	31	20	30	31	30	31	31	31
5	Сутур	32	33	17	26	0	31	32	0	32
6	Хорское	28	28	21	27	0	18	29	0	29
7	Чегдомын	30	30	1	0	31	29	31	30	30
8	Троицкое	27	27	24	12	28	36	27	28	38
	Итого сезонов, %	232 90	209 82	118 47	152 60	157 61	229 90	234 91	173 67	238 93
Центральная часть территории (192 сезона)										
9	Совгавань	7	5	0	0	0	4	5	0	0
10	Дуки	30	29	26	24	29	25	29	29	29
11	Им. Полины Осипенко	29	29	27	21	29	29	29	29	30
12	Нижне-Тамбовское	31	31	28	21	31	31	31	31	31
13	Тумнин	20	17	17	16	17	24	20	17	15
14	Комсомольск-на-Амуре	27	26	26	25	26	28	26	26	27
	Итого сезонов, %	144 75	137 71	99 52	107 56	131 68	141 73	140 73	132 69	132 69
Северная часть территории (192 сезона)										
15	Богородское	28	28	27	28	27	18	27	27	27
16	Херпучи	27	27	16	0	25	24	27	24	25
17	Чумикан	3	3	3	1	3	0	3	2	3
18	Николаевск-на-Амуре	19	17	6	0	17	11	19	21	13
19	Марейское	32	31	29	26	31	30	32	31	31
20	Удское	29	24	6	0	0	16	28	0	23
	Итого сезонов, %	138 72	128 67	4 44	53 28	100 46	100 52	129 67	103 54	120 57

Расчёт показателя P_i осуществлялся по уравнениям 2 и 3 на основе интерполированных значений показателя L_i и суточного объёма осадков x , проявляющих, в основном, дискретный фронтальный характер. Распределение осадков определено в круговых зонах влияния ГМС с радиусом 30 км, в зонах ответственности ГМС – по полигонам сети Тиссена.

Проверка интерполированных значений комплексного показателя P_i выполнена на территории ЕАО в течение пожароопасного сезона 2010 г., когда в области возникло 126 лесных пожаров.

На каждый день сезона построен векторный слой квартальной сети лесхозов, в центрах кварталов восстановлены значения L_i , определены суточные объёмы осадков (x) и рассчитаны показатели P_i .

Многомерный набор слоев распределения показателя P_i использован для определения вероятности возникновения пожаров по погодным условиям в различных растительных формациях с использованием шкалы Т.В. Костыриной (табл. 2).

Таблица 2

**Достоверность прогноза пожаров растительности
по погодным и лесорастительным условиям**

Степень пирологической пожароопасности основных растительных формация		I	II	III	IV	I-IV
Фактическое количество пожаров		24	40	47	14	125
Расчётное количество пожаров		21	33	44	10	108
Достоверность, % (вероятность) 0,95	Текущий день	0,88 ± 0,14	0,83 ± 0,12	0,94 ± 0,07	0,71 ± 0,26	0,86 ± 0,06
	1-й день прогноза	0,88 ± 0,14	0,85 ± 0,11	0,85 ± 0,1	0,57 ± 0,29	0,82 ± 0,07
	2-й день прогноза	0,88 ± 0,14	0,88 ± 0,11	0,77 ± 0,12	0,57 ± 0,29	0,79 ± 0,07
	3-й день прогноза	0,88 ± 0,14	0,85 ± 0,11	0,77 ± 0,12	0,50 ± 0,29	0,78 ± 0,07

Установлена высокая достоверность прогноза ($0,86 \pm 0,06$) при вероятности 0,95. При краткосрочном прогнозе на каждые 3 суток пожароопасного сезона достоверность незначительно уменьшалась от $0,82 \pm 0,07$ до $0,78 \pm 0,07$, но оставалась достаточно высокой.

Таким образом, восстановление лесопожарного показателя методом "обратно-взвешенные расстояния" позволяет определить вероятность возникновения лесных пожаров на Дальнем Востоке России с высокой достоверностью.

Литература

1. **Кузнецов В.Г., Барановский Н.В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
2. **Курбатский Н.П., Дорогов Б.И., Доррер Г.А.** Прогнозирование лесных пожаров с помощью ЭВМ // Лесное хозяйство. 1976. № 7. С. 51-55.
3. **Понамарев Е.И., Сухинин А.И.** Методика картирования и среднесрочного прогнозирования пожарной опасности лесов по условиям погоды // География и природные ресурсы. 2002. № 4. С. 112-117.
4. **Bailey T.C. & Gatrell A.C.** Interactive spatial data analysis. Longman. 1995. 413 p.
5. **Flannigan M.D., Wotton B.M.** A study of the interpolation methods for forest fire danger rating in Canada // Canadian Journal of Forest Research. 1989. № 19(8). P. 1059-1066.
6. **Ковин Р.В.** Алгоритмическое и программное обеспечение геоинформационной системы для анализа двумерных геополей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11. Томск, 2004. 19 с.
7. **Нестеров В.Г.** Горимость лесов и методы её определения. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. 74 с.
8. **Nash J.E., Sutcliffe J.V.** River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. V. 10, № 3. P. 282-290.
9. **Глаголев В.А., Коган Р.М.** Информационная система оценки и прогноза пожарной опасности по условиям погоды (на примере Среднего Приамурья) // Вестник ТПУ. 2009. Т. 314. № 5. С. 180-184.
10. **Глаголев В.А., Коган Р.М.** Прогностическая оценка вероятности возникновения пожаров растительности // Инженерная экология. 2011. № 6. С. 38-51.