УДК 004.94

Алгоритм пространственного сглаживания, обусловленного скважинными данными

Б. А. Феоктистов [1], Р. К. Газизов [2]

[1] feoktistovbogdan@gmail.com, [2] gazizovrk@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. Рассматривается операция, которая является одним из вариантов постобработки результатов геологического моделирования. Данная операция производится при помощи кригинга, что, в отличии от классических алгоритмов, позволяет сохранять скважинные значения в точках данных.

Ключевые слова: сглаживание; скважинные данные; геологическое моделирование; постобработка; геостатистика; кригинг.

При разработке месторождений углеводородов одним из необходимых этапов является построение геологической модели. Источниками информации для построения геологической модели являются [1]:

- исследование керна;
- геофизические исследования скважины;
- предположения об обстановке осадконакопления;
- особенности региона разработки;
- сейсмологическая разведка и т.д.

По сравнении с масштабами месторождения, объемы получаемой информации недостаточны для точного описания межскважинного пространства. Поэтому для построения трехмерных геологических моделей используются методы геостатистики, основанные на теории случайных процессов [2]. В связи с недостатком начальных данных и особенностей алгоритмов, имеющих стохастическую природу, результат моделирования фильтрационно-емкостных свойств в межскважинном пространстве может не удовлетворять условию «связности» геологической модели.

Поэтому возникает необходимость в дополнительной постобработке результатов моделирования свойств в межскважинном пространстве. Одним из вариантов является сглаживание.

Классические методы сглаживания, например, скользящего среднего [3], не сохраняют исходные данные в заданном множестве точек. Поэтому возникает задача разработать алгоритм сглаживания, который будет сохранять скважинные данные в заданном множестве точек.

В данной работе предлагается алгоритмизация процесса сглаживания трехмерных объектов геологической модели. Данный алгоритм сглаживания реализован на основе кригинга, что позволяет сохранять скважинные данные в заданном множестве точек.

Пусть дана регулярная решетка $U = \{u_i \in R^m\}$, $i = 1, \dots, M$, где m – размерность пространства, M – количество узлов регулярной решетки. В каждом узле решетки заданы значения $Z(u_i)$, которые были смоделированы ранее.

В некоторых узлах решетки $W = \{u_{i_k}\}$ из множества U заданы скважинные данные $Z(u_{i_k})$, $k = 1, \dots, N$, где N – общее количество скважинных данных. Требуется получить сглаженные значения $Z^*(u_i)$ в каждом узле решетки с учетом скважинных данных $Z(u_{i_k})$.

Для сглаживания задается радиус окна сглаживания $R \in N^m$. Обычное оконное сглаживание [3] без привязки к скважинным данным определяется формулой:

$$Z^S(u_i) = \sum_{j:\|u_i-u_j\|\le R} w_j(u_i) Z(u_j), \qquad (1)$$

где $Z^S(u_i)$ – значение в точке u_i после проведения процедуры оконного сглаживания, $w_j(u_i) = f(\|u_i - u_j\|)$ – весовые коэффициенты окна сглаживания, где $f(\|u_i - u_j\|) = f(h)$ определяется в соответствии с типом сглаживающего окна.

Для того чтобы сохранялись скважинные данные $Z(u_{i_k})$, аналогично обыкновенному кригингу [4], сглаживание (1) доопределяется как

$$Z^*(u_i) = \varphi Z^S(u_i) + \sum_{i_k:\|u_i-u_{i_k}\|\le R} \lambda_{i_k} Z(u_{i_k}), \qquad (2)$$

где φ – весовой коэффициент сглаживания, $\lambda(u_{i_k})$ – кригинговые весовые коэффициенты, на которые должно выполняться условие

$$\varphi(u_i) + \sum_{i_k:\|u_i-u_{i_k}\|\le R} \lambda(u_{i_k}) = 1. \qquad (3)$$

Аналогично [4], для каждой точки u_i неизвестные коэффициенты φ, $\lambda(u_i)$ подбираются так, чтобы оценка $Z^*(u_i)$ минимизировала функционал:

$$L(\lambda(u_i); \varphi; \mu) = E\left(Z^*(u_i) - Z(u_i)\right)^2 + +2\mu\left(\varphi + \sum_{i_k:\|u_i-u_{i_k}\|\le R} \lambda(u_{i_k}) - 1\right) \to \to \min_{(\lambda(u_i),\varphi,\mu)}, \qquad (4)$$

где $\lambda(u_i) = \{\lambda_{i_k} | i_k: \|u_i - u_{i_k}\| \le R\}$.

Минимуму функционала (4) соответствует решение системы линейных алгебраических уравнений [5]

$$\begin{pmatrix} C^{WW} & C^{SW} & E \\ (C^{SW})^T & C^{SS} & 1 \\ E^T & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C^{W0} \\ C^{S0} \\ 1 \end{pmatrix}, \qquad (5)$$

где $C^{WW} = \left(Cov\left(Z(u_{i_k}), Z(u_{i_l})\right)\right)$, $i_k: \|u_i - u_{i_k}\| \le R, i_l: \|u_i - u_{i_l}\| \le R$ – ковариационная матрица скважинных данных в окне сглаживания с центром в точке u_i, $C^{SW} = \left(Cov\left(Z^S(u_i), Z(u_{i_k})\right)\right), i_k: \|u_i - u_{i_k}\| \le R$, – ковариационный вектор-столбец сглаженного значения в точке u_i со скважинными данными в окне сглаживания с центром в точке u_i, $C^{SS} = Cov(Z^S(u_i), Z^S(u_i))$ – ковариация сглаженного значения в точке u_i, $C^{W0} = \left(Cov\left(Z(u_{i_k}), Z(u_i)\right)\right)$, $k: \|u_i - u_{i_k}\| \le R$ – ковариационный вектор-столбец скважинных данных со сглаживаемым значением в точке u_i, $C^{S0} = Cov(Z^S(u_i), Z(u_i))$ – ковариация сглаженного значения в точке u_i и значения, которое необходимо сгладить в точке u_i [6]. Для всех типов ковариационной матрицы целесообразно выбирать параметры радиуса вариограммы соразмерные с радиусом окна сглаживания R.

На основе описанного выше алгоритма был разработан программный модуль пространственного сглаживания для непрерывного параметра. На рис. 1 представлен пример исходного двумерного массива данных, размером 35×50 узлов.

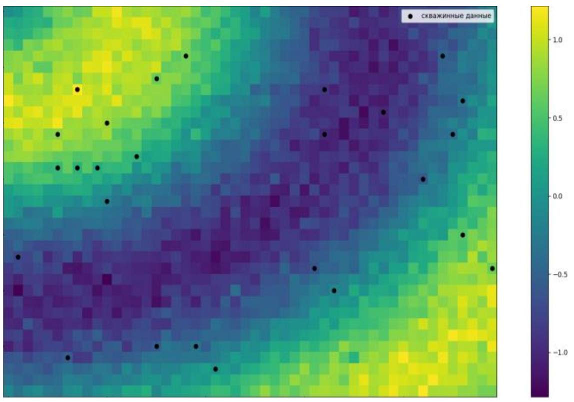

Рис. 1. Исходный двумерный массив непрерывных данных

Параметры сглаживания непрерывного параметра:

- $R_{vert} = 2$ – радиус сглаживания по вертикальному направлению;

- $R_{hor} = 3$ – радиус сглаживания по горизонтали;
- тип сглаживающего окна – окно Хэмминга [3];
- тип вариограммы – гауссова с радиусами по вертикальному и горизонтальному направлению R_{vert} и R_{hor}, соответственно.

Результаты сглаживания непрерывного параметра представлены на рис. 2.

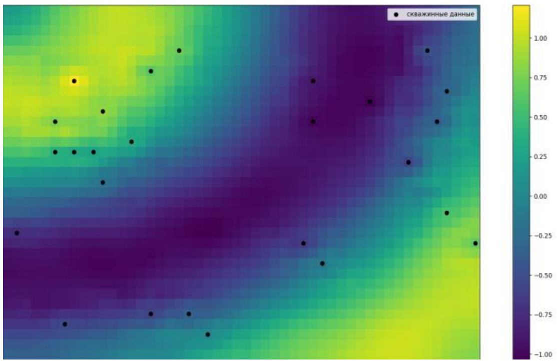

Рис. 2. Пример работы алгоритма двумерного сглаживания с сохранением скважинных данных в заданных точках для непрерывного параметра

На примере дискретного параметра. На рис. 3 представлен пример исходного двумерного массива данных, размером 100×200 узлов.

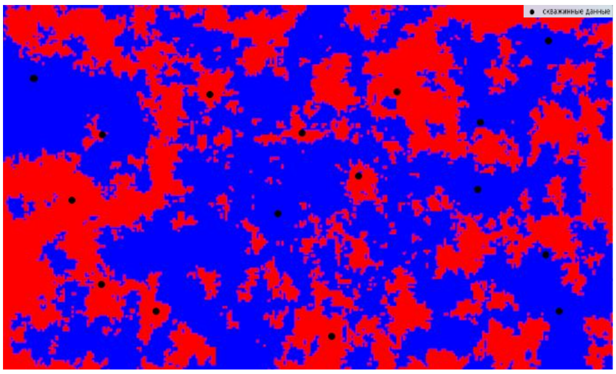

Рис. 3. Исходный двумерный массив дискретных данных

Параметры сглаживания дискретного параметра:

- $R_{vert} = 5$ – радиус сглаживания по вертикальному направлению;
- $R_{hor} = 6$ – радиус сглаживания по горизонтали;
- тип сглаживающего окна – Most of [3];
- тип вариограммы – гауссова с радиусами по вертикальному и горизонтальному направлению R_{vert} и R_{hor}, соответственно.

Результаты сглаживания непрерывного параметра представлены на рис. 4.

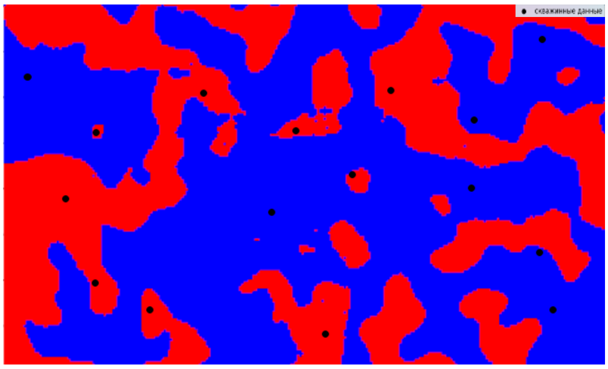

Рис. 4. Пример работы алгоритма двумерного сглаживания с сохранением скважинных данных в заданных точках для дискретного параметра

Данный программный модуль может быть использован для постобработки результатов пространственной интерполяции межскважинного пространства с сохранением скважинных данных в заданном множестве точек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Закревский К. Е.** Геологическое 3D моделирование. М.: ООО «ИПЦ «Маска», 2009. – 376 с. [Zakrevskii K.E. (2009) Geologicheskoe 3D modelirovanie [Geological 3D modeling]. Moscow, OOO «IPTs «Maska» publ. (in Russian) – pp. 376.]
2. **Байков В. А., Бакиров Н. К., Яковлев А. А.** Математическая геология: Т. I: Введение в геостатистику. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 228 с. [V.A Baikov., N.K. Bakirov, A.A. Yakovlev (2012) Matematicheskaya geologiya: T. I: Vvedenie v geostatistiku [Mathematical Geology: Volume I: Introduction to Geostatistics]. Izhevsk, Institut Komp'yuternykh issledovanii publ. (in Russian) – pp. 228.]
3. **Simonoff, Jeffrey S.** Smoothing methods in statistics. - New York: Springer-Verlag New York, 1996. – pp. 340.
4. **Goovaerts P.** Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York, Oxford: oxford University Press. 1997. – pp. 483.
5. **Аттетков А. В., Галкин С. В., Зурбин В. С.** Методы оптимизации: учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с. [A.V. Attetkov, S.V. Galkin, V.S. Zurbin (2003) Metody optimi-zatsii: Ucheb. dlya vuzov [Optimization Methods: A textbook for universities]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana publ. (in Russian) – pp. 440.]
6. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с. [E.S. Venttsel' (1969) Teoriya veroyatnostei [Probability theory]. Moscow, Nauka publ. (in Russian) – pp. 576.]

ОБ АВТОРАХ

ФЕОКТИСТОВ Богдан Альбертович, магистрант кафедры математики.

ГАЗИЗОВ Рафаил Кавыевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ВВТиС.

METADATA

Title: Assessment of the work of thermal power equipment when operating on different modes

Authors: B. A. Feoktistov [1], R. K. Gazizov [2]

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: [1]feoktistovbogdan@gmail.com, [2]gazizovrk@gmail.com

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 201-204, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: We consider the operation, which is one of the options for post-processing the results of geological modeling. This operation is performed using kriging, which, unlike classical algorithms, allows you to save well values at data points

Key words: smoothing; well data; geological modeling; post processing; geostatistics; kriging.

About authors:

FEOKTISTOV, Bogdan Albertovich., master student 2 year, Ufa state aviation technical University

GAZIZOV, Rafail Kavyevich., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor in the Department of High Performance Computing Technologies and Systems, Ufa state aviation technical University