



СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ДАННЫХ АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БВС НА ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ СЕТЯХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Д.Н. Гапеев¹, М.И. Эпов², А.А. Тишкин³, А.П. Фирсов⁴, Я.В. Фролов³, В.А. Останин⁴,
А.С. Колесов^{2,4}, Ю.Ю. Малетин⁴

¹ООО ГМК «Цифра», 630090, Новосибирск, ул. Инженерная, 5/9, офис 12

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

³Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, ул. Ленина, 61, Россия

⁴ООО «СКАН АЭРО», 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4г, оф. 215, Россия

e-mail: denis.gapeyev@gmail.com

В статье рассматривается подход к построению регулярного куба данных в приложении к задачам аэромагнитной съемки. Он основан на построении аппроксимационной сплайн-функции с узлами на нерегулярной сетке в трехмерном пространстве. Для его построения дополнительно используется информация о погрешностях измерения, что позволяет сократить число параметров по сравнению с интерполяционным сплайном. Данный подход опробован на экспериментальных данных, полученных на археологическом комплексе Ивановка-I в Алтайском крае при проведении аэромагнитного обследования.

Аэромагнитная съемка; индукция земного магнитного поля; беспилотное воздушное судно; сплайн-сглаживание; археологический комплекс

SPLINE APPROXIMATION OF UNEQUAL AEROMAGNETIC SURVEY DATA WITH THE USE OF UAV ON SPATIALLY INHOMOGENEOUS NETWORKS WHEN SOLVING PROBLEMS OF ARCHAEOLOGICAL EXPLORATION

D.N. Gapeev¹, M.I. Epov², A.A. Tishkin³, A.P. Firsov⁴, Ya.V. Frolov³, V.A. Ostanin⁴,
A.S. Kolesov^{2,4}, Yu.Yu. Maletin⁴

¹GMK Digit LLC, Inzhenernaja Str., 5/9, 12, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Altai State University, Lenin Str., 61, Barnaul, 656049, Russia,

⁴SKAN AERO LLC, Kutateladze Str., 4g, 215, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: denis.gapeyev@gmail.com

The article discusses an approach to get a regular cube of data in context of aeromagnetic survey. It is based on spline approximation with nodes on an irregular grid in three-dimensional space. To construct

approximation spline, information on measurement errors is additionally used, which makes it possible to reduce the number of parameters as opposed to spline interpolation. This approach was tested on experimental aeromagnetic data from archaeological site Ivanovka-I.

Aeromagnetic survey; Earth's magnetic field; unmanned aerial vehicle; spline smoothing; archaeological complex

ВВЕДЕНИЕ

В процессе аэромагнитной съемки с помощью беспилотных воздушных судов (БВС) измеряется индукция земного магнитного поля. В процессе работ БВС совершает перемещения в пространстве с измерительным оборудованием на борту. Оно регистрирует траекторию полета и значения магнитной индукции с некоторой погрешностью. Совокупность всех траекторий в трехмерном пространстве будет в дальнейшем называться кубом. Его максимальные и минимальные значения по всем пространственным координатам выбираются из соответствующих наибольших и наименьших значений координат на траекториях. В статье рассмотрены решения следующих задач:

- сжатие объема исходных данных с учетом погрешностей измерения;
- построение регулярного куба данных на основе нерегулярных пространственных сетей измерений;
- расчет пространственных производных измеренных данных в построенном кубе.

Рассмотрим решение этих задач на основе аппроксимационного сплайна, т. е. сплайна на выпуклых множествах. Такие сплайн-функции проходят в каждой точке измерения через доверительный интервал, определяемый абсолютной погрешностью измерений. Для расчета значений сплайн-функции может потребоваться не весь набор данных, а только его «информативная» часть, полностью их определяющая. Это позволяет произвести сжатие данных без потери точности аппроксимации.

Сплайн является аналитической функцией. После его построения значения, измеренные на нерегулярной пространственной сети, легко пересчитываются на любую регулярную сеть в кубе. Ее значения и значения ее пространственных производных можно вычислить любой точке куба.

СПЛАЙН ФУНКЦИИ

Общее определение интерполяционных сплайнов можно сформулировать следующим образом [Василенко, 1984]:

Пусть X , Y , Z – три пространства Гильберта со скалярным произведением $(\cdot, \cdot)_X$, $(\cdot, \cdot)_Y$, $(\cdot, \cdot)_Z$ и нормами

$$\|u\|_X = (u, u)_X^{1/2}, \|u\|_Y = (u, u)_Y^{1/2}, \|u\|_Z = (u, u)_Z^{1/2}.$$

Рассмотрим пару линейных ограниченных функционалов $A: X \rightarrow Z$ и $T: X \rightarrow Y$. Зафиксируем элемент $z \in Z$ и рассмотрим его полный прообраз $A^{-1}(z)$ при отображении A ,

$$A^{-1}(z) = \{x \in X: Ax = z\}.$$

Предположим, что $A^{-1}(z)$ – непустое множество. *Интерполяционным сплайном* называется элемент $\sigma \in X$, удовлетворяющий соотношению

$$\|T\sigma\|_Y^2 = \min_{x \in A^{-1}(z)} \|Tx\|_Y^2.$$

Пусть множество $C \subset X$ выпуклое, замкнутое и непустое. *Сплайном на выпуклом множестве* будем называть $\sigma^* \in X$ такое, что

$$\|T\sigma^*\|_Y^2 = \min_{x \in C} \|Tx\|_Y^2.$$

Пусть заданы диапазоны измеренных значений $F_i^- \leq F_i \leq F_i^+, i = \overline{1, N}$, определяемые их абсолютной погрешностью. Определим операторы, порожденные узлами, следующим образом:

$$L_i x = x(P_i), i = \overline{1, N}, \forall x \in X.$$

Аппроксимирующим сплайном $\sigma_* \in X$ будем называть сплайн на выпуклом множестве $C = \{x \in X: F_i^- \leq L_i x \leq F_i^+, i = \overline{1, N}\}$.

Теорема [Лоран, 1975]. Для того, чтобы элемент $\sigma_* \in C$ был сплайном на выпуклом множестве C , необходимо и достаточно, чтобы

$$T^* T \sigma_* = \sum_{i=1}^N \lambda_i L_i,$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_i &\leq 0, \text{ при } L_i \sigma_* = F_i^+, \\ \lambda_i &\geq 0, \text{ при } L_i \sigma_* = F_i^-, \\ \lambda_i &= 0, \text{ при } F_i^- < L_i \sigma_* < F_i^+. \end{aligned}$$

Узлы, для которых $\lambda_i \leq 0$, будем называть верхними узлами прилипания; узлы, для которых $\lambda_i \geq 0$, – нижними узлами прилипания. Если $\lambda_i = 0$ и при этом $L_i \sigma_* = F_i^+$ или $L_i \sigma_* = F_i^-$, то эти узлы будем называть узлами касания.

Подмножество функционалов из $\{L_1, \dots, L_N\}$, определяющие узлы прилипания, назовем подсеткой узлов прилипания и обозначим L_{ak} . Из теоремы следует, что:

$$T^* T \sigma_* = \sum_{L_i \in L_{ak}} \lambda_i L_i,$$

а это значит, что σ_* есть интерполяционный сплайн с соответствующими узлами.

Введем понятие фундаментального (для множества L_{ak}) сплайна φ_i , отвечающего функционалу $L_i \in L_{ak}$ следующим образом:

$$L_i \varphi_i = 1, L_j \varphi_i = 0, \forall j \neq i: L_j \in L_{ak}.$$

Тогда для любого $\vec{G} = \{G_1, \dots, G_N\} \in \mathbb{R}^N$ имеет место равенство $\sigma_{\vec{G}} = \sum_{i=1}^N G_i \varphi_i$, где $\sigma_{\vec{G}}$ – интерполяционный сплайн по набору входных данных \vec{G} .

Введем выпуклую неотрицательную квадратичную форму, характеризующую «энергию» сплайна:

$$\Phi(\vec{G}) = \|T\sigma_{\vec{G}}\|_Y^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_i G_j (T\varphi_i, T\varphi_j) = (\mathbf{B}\vec{G}, \vec{G}),$$

где \mathbf{B} – матрица, составленная из элементов $b_{ij} = (T\varphi_i, T\varphi_j)$. Следовательно, задача поиска сплайна на выпуклом множестве эквивалентна задаче квадратичного программирования [Ковалков, 1983]

$$\min_{x \in C} \|Tx\|_Y^2 = \min_{\vec{G} \in C} (\mathbf{B}\vec{G}, \vec{G}) = (\mathbf{B}\vec{F}^0, \vec{F}^0),$$

где $\vec{C} = [F_1^-, F_1^+] \times [F_2^-, F_2^+] \dots [F_N^-, F_N^+]$, а \vec{F}^0 – ее решение. При этом \vec{F}^0 связано с решением задачи соотношениями $L_i \sigma_* = \sigma_*(P_i) = F_i^0$. Вектор \vec{F}^0 очевидным образом определяет узлы прилипания сплайна σ_* .

Далее будем рассматривать полигармонические интерполяционные и аппроксимационные сплайны, для построения которых необходимо определить следующее:

- 1) пространство Соболева $W_2^2(\mathbb{R}^3)$ в качестве пространства X ;
- 2) оператор Лапласа Δ в качестве оператора T ;
- 3) пространство Лебега $L(\mathbb{R}^3)$ в качестве пространства Y ;
- 4) $Z = \mathbb{R}^N$ – N -мерное пространство вещественных чисел, где N – число узлов сплайна;
- 5) интерполяционный функционал $A: W_2^2(\mathbb{R}^3) \rightarrow \mathbb{R}^N$ однозначно определяется набором узлов по формуле: $A(f) = \{f(P_1), \dots, f(P_N)\}$, где $f \in W_2^2(\mathbb{R}^3)$, $P_1, \dots, P_N \in \mathbb{R}^3$ – узлы интерполяции.

Рассмотрим применение сплайн-аппроксимации реальных данных пространственной аэромагнитной съемки.

АЭРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА НА АРХЕОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИВАНОВКА-I

Аэромагнитная съемка проводилась на археологическом комплексе «Ивановка-I, курганная группа» в Шелаболихинском районе Алтайского края для локализации конкретных объектов (курганов [Эпов, 2016]) и уточнения их пространственной структуры. Для проведения работ было выделено два участка. На участке «Южный» расположены два крупных объекта (№ 1 и № 2), достоверно являющиеся древними погребальными сооружениями. На участке «Северный» сосредоточено большинство объектов, насыпи которых разрушены в ходе распашки и слабо выделяются на земной поверхности. Сначала тестировались курганы участка «Южный». На рисунке 1 представлен план памятника, составленный на основе визуальных полуинструментальных фиксаций и уточненный с использованием спутниковых снимков. Далее в статье рассматривается «Южный» участок.

Объекты участка «Южный» представлены двумя искусственными сооружениями из грунта. Курган № 1 имеет насыпь диаметром 43 м и высотой 3 м, а курган № 2 – диаметр 35 м и высоту 1.2 м. В центре каждого кургана прослеживаются грабительские ямы глубиной до 3 м. Оба кургана сильно повреждены в результате антропогенного и техногенного воздействия: сооружение триангуляционного пункта на кургане № 1, систематическая распашка краев насыпи и околокурганного пространства. Это сильно изменило первоначальные размеры и конфигурацию земляных надмогильных сооружений.

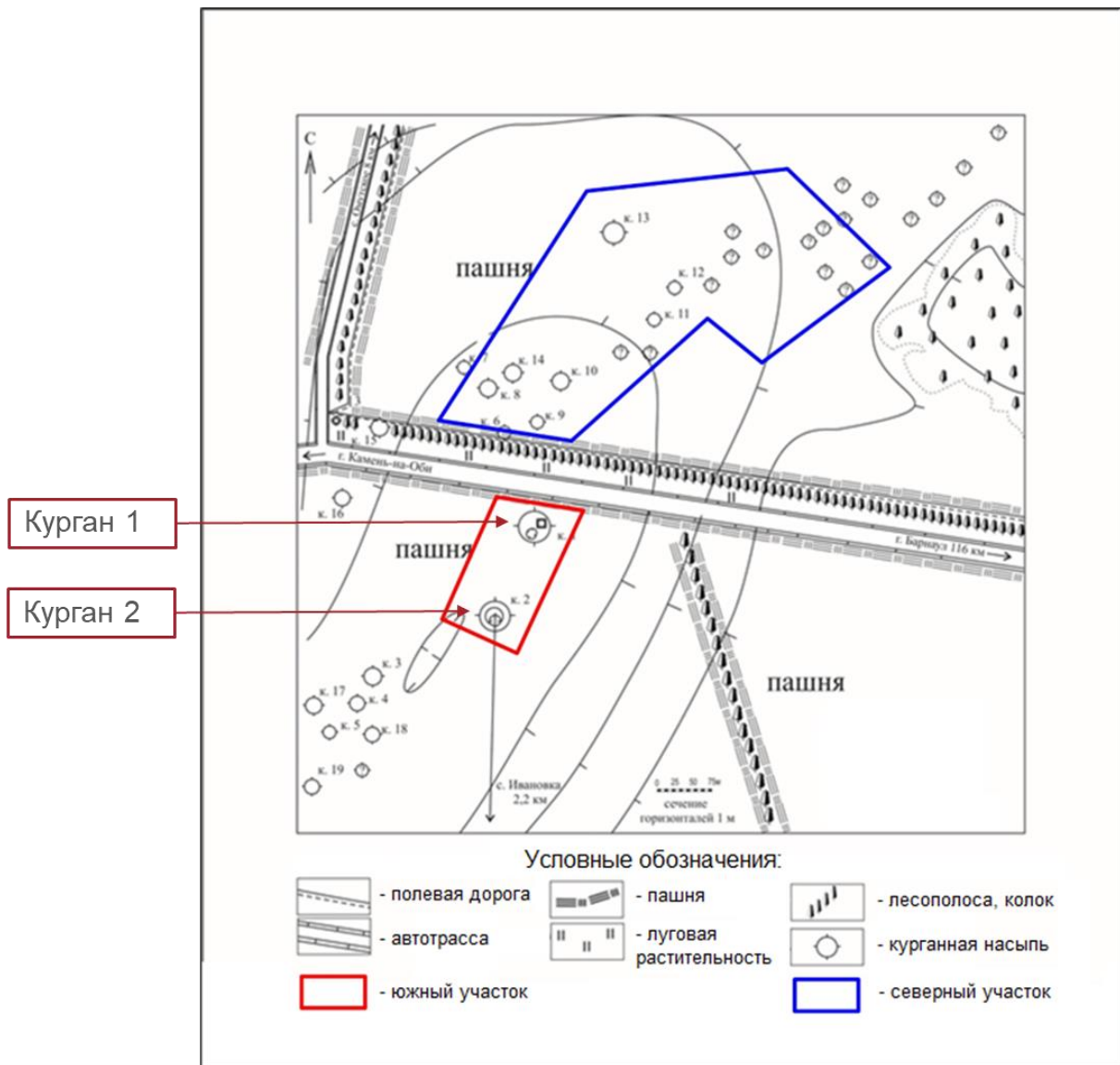


Рис. 1. Схема расположения объектов и участков работ

Аналогичные курганы имеют насыпи, сложенные из камня [Тишкин и др., 2017], а также часто окружены рвами [Тишкин и др., 2007; Фролов, Тишкин, 2020]. При полевом обследовании подножий курганов обнаружено увеличение магнитной восприимчивости почв по сравнению с фоновыми значениями с $0.6 \cdot 10^3$ ед. СИ, до $1.4 \cdot 10^3$ ед. СИ.

На каждом из двух участков выполнена трехуровневая аэромагнитная съемка модуля вектора индукции земного магнитного поля. Траектории полетов на участке «Южный» и их местоположение в трехмерном пространстве (с коэффициентом 10 для высот полета) показаны на рис. 2 и 3, соответственно. Каждая траектория характеризуется двумя наборами профилей и участками перехода с одного профиля на другой. Каждый из наборов профилей характеризуется прямым или обратным направлениями полетов. Среднее расстояние между профилями на одном высотном уровне составляет в среднем 2.5 м. Расстояние между точками измерений на профиле составляет в среднем 0.02 м. Полеты выполнялись на трех высотах над земной поверхностью: 5, 7 и 9 м. Таким образом, сеть наблюдений была очень неравномерной: густой на профилях и редкой между профилями. Куб для представления данных: $-5 \leq x \leq 197$, $0 \leq y \leq 212$, $0 \leq z \leq 13$.

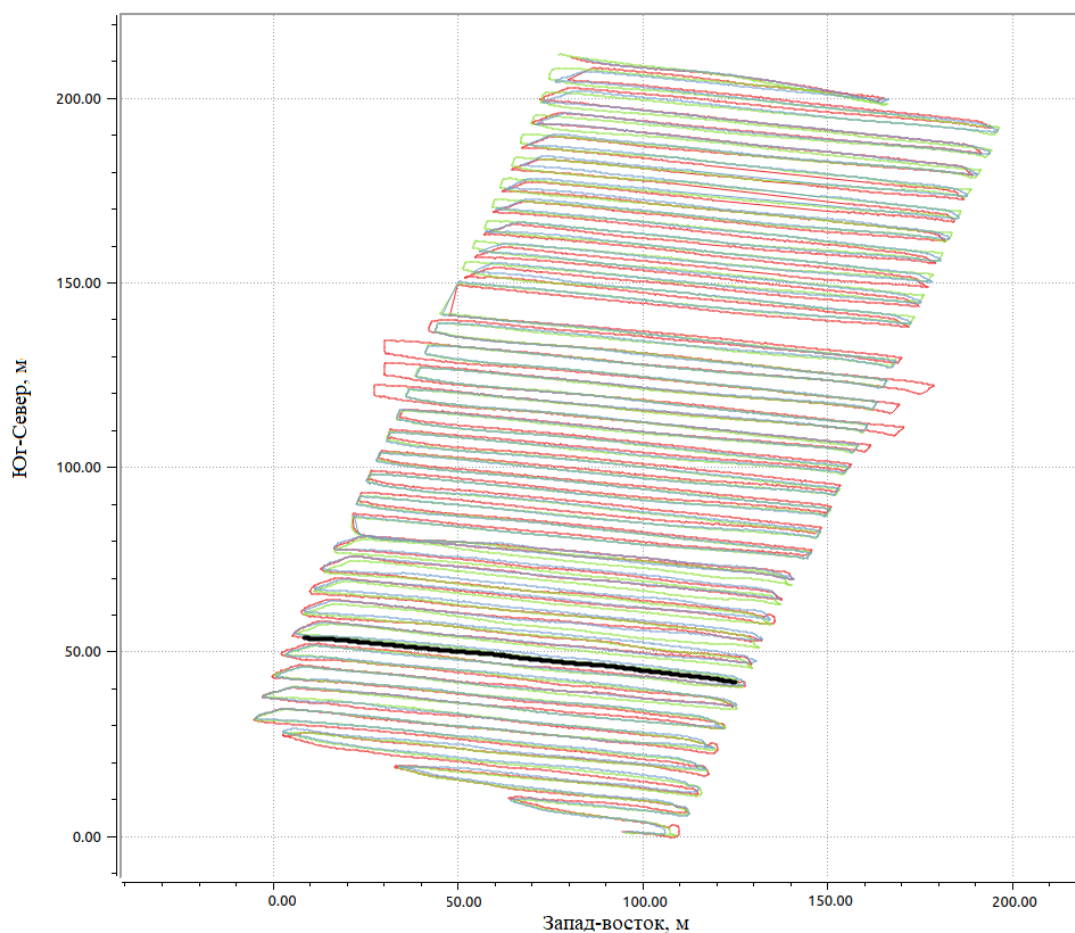


Рис. 2. Схема траекторий полетов на участке «Южный». Красным цветом отмечена траектория на высоте 5 м, зеленым – 7 м, синим – 9 м, черным отмечен выделенный профиль, проходящий через курган 2

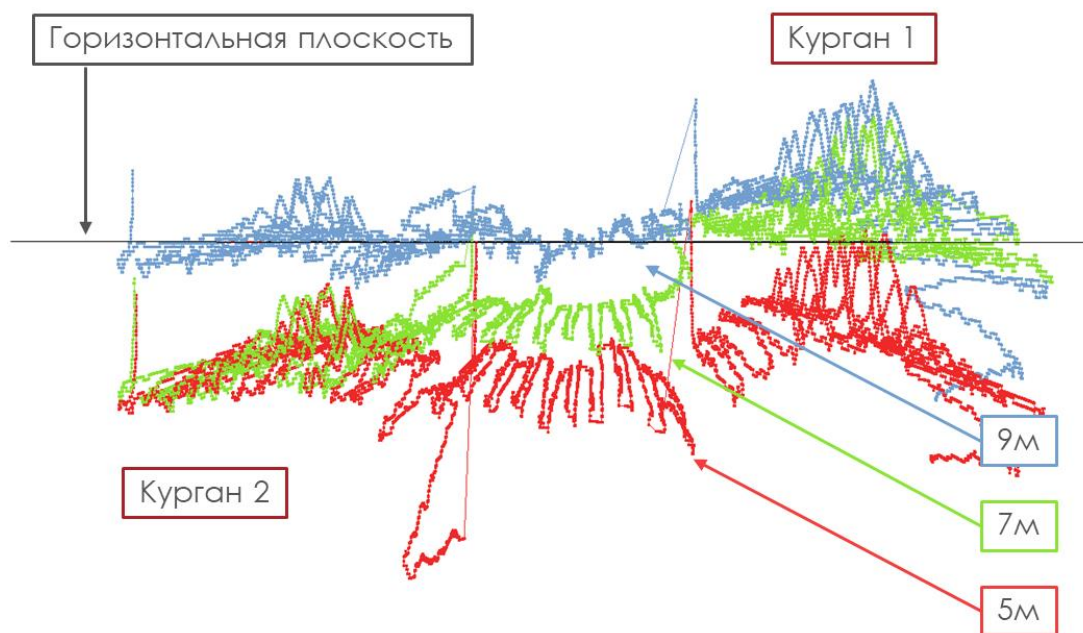


Рис. 3. Траектории полетов на участке «Южный» в пространстве. Красным цветом отмечена траектория на высоте 5 м, зеленым – 7 м, синим – 9 м, горизонтальная плоскость построена на высоте 9 м

В каждой точке измерений регистрировалось значение сигнала и абсолютная погрешность его измерения. Аномальное значение модуля индукции земного магнитного поля было определено как разность измеренного значения и среднего арифметического значения, рассчитанного по всем измеренным значениям. На рисунке 4 показано распределение аномального сигнала по профилям. Подавляющая часть значений укладывается в диапазон от -15 нТл до 30 нТл.

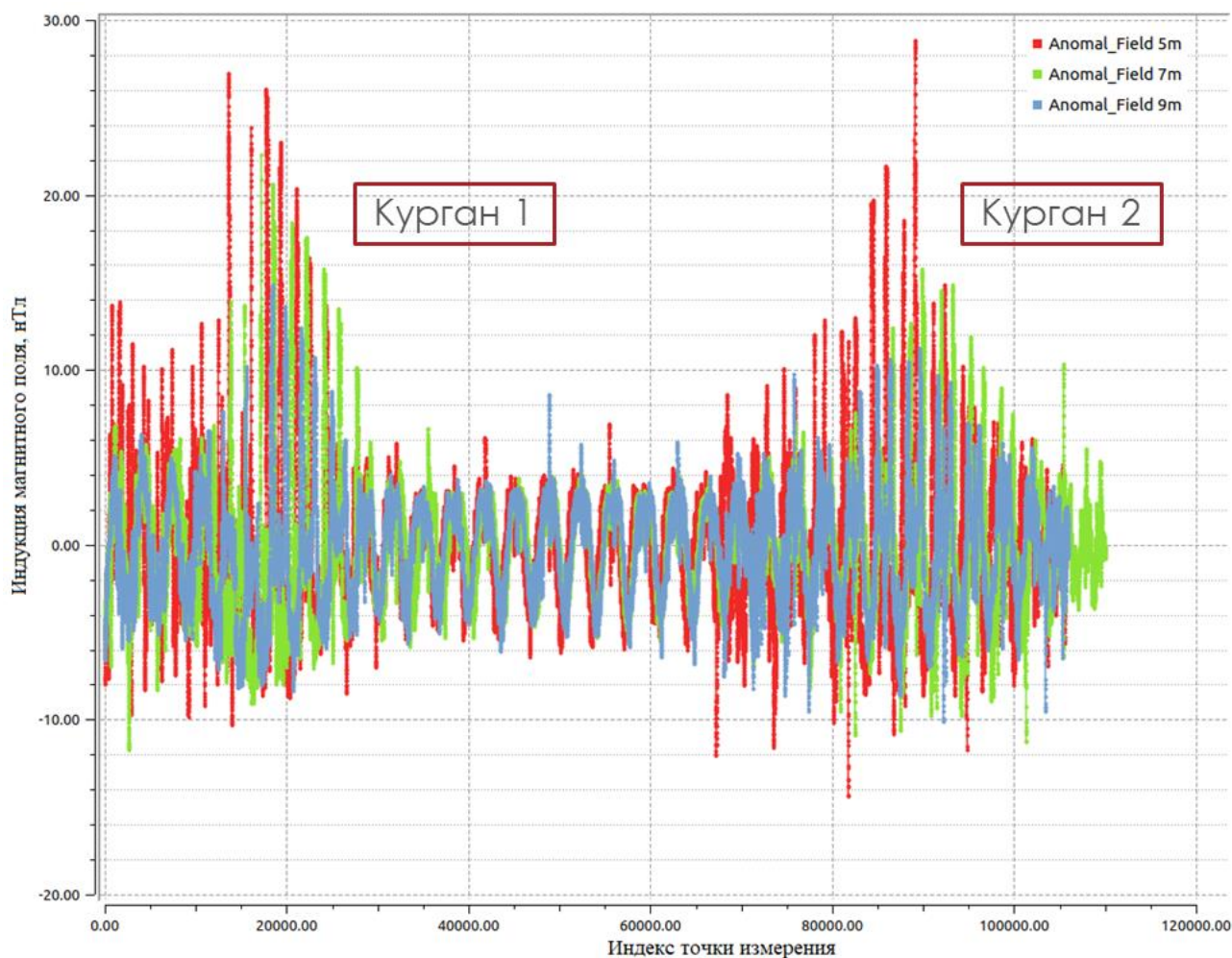


Рис. 4. Аномальные значения модуля индукции земного магнитного поля

На рисунке 5 показаны значения индукции магнитного поля и доверительный интервал ± 1 нТл на разных высотах вдоль профиля, выделенного на рис. 2.

Была проведена серия вычислений аппроксимирующего сплайна для доверительных интервалов ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 и ± 5 нТл, результаты представлены в табл. 1. При построении трехмерных сплайн-функций использовалось 327188 точек измерения.

Для построения аппроксимирующего сплайна, удовлетворяющего погрешности ± 5 нТл, понадобилось всего 522 узла, т. е. 0.16 %. Такое малое число информативных узлов объясняется относительно широким доверительным интервалом, составляющим 10/40 или 25 % всего интервала изменений аномальной части индукции аномального магнитного поля. Для построения аппроксимирующего сплайна, удовлетворяющего погрешности ± 1 нТл, уже понадобилось 14504 узла, т. е. 4.43 %.

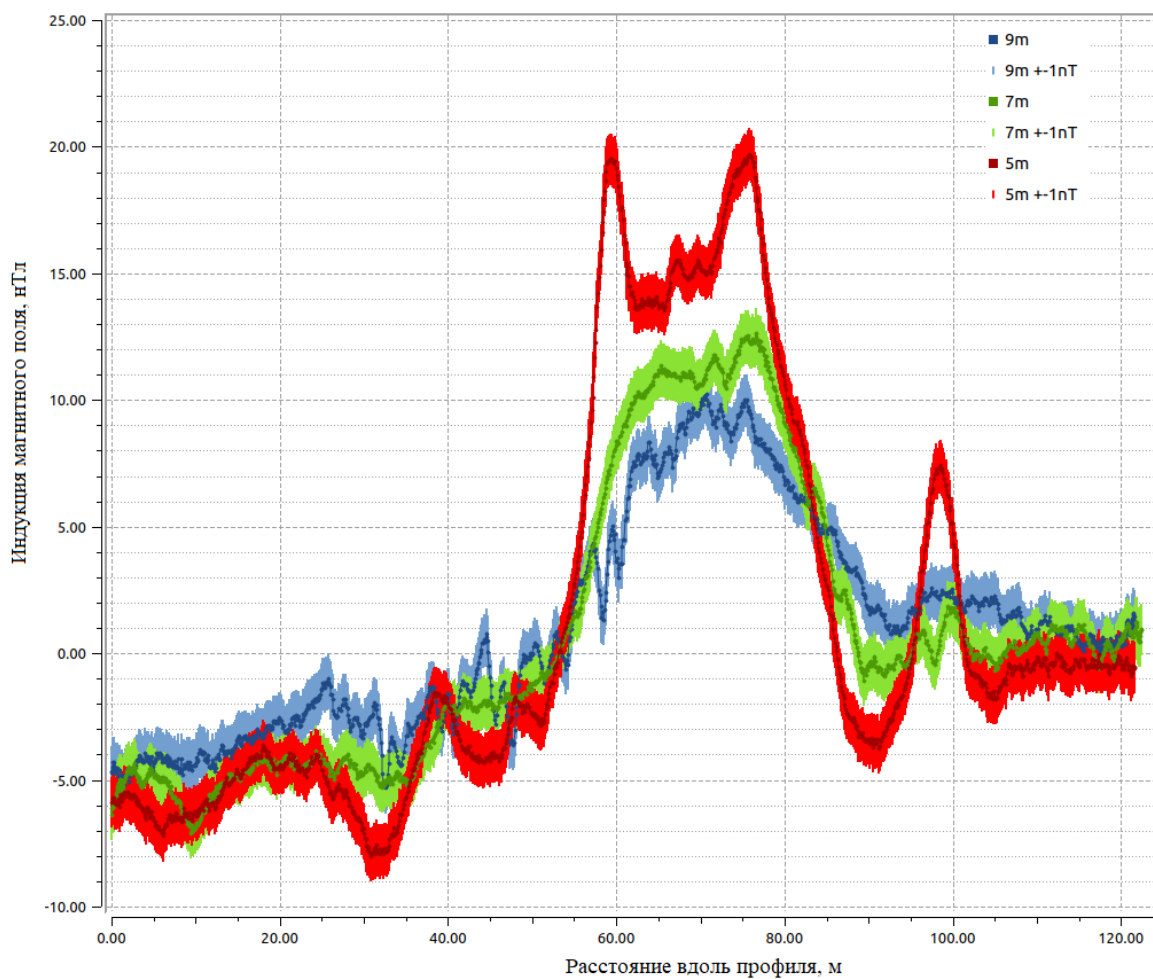


Рис. 5. Значения индукции магнитного поля на высотах 5, 7 и 9 м вдоль профиля, выделенного на рис. 2: темно-красный, темно-зеленый и темно-синий цвет соответствует измеренным значениям, ярко-красный, ярко-зеленый и голубой – доверительному интервалу ± 1 нТл

Таблица 1.

Степень сжатия информации

Значения доверительного интервала, нТл	Количество узлов аппроксимирующего сплайна, шт.	Степень сжатия информации, %
± 5	522	0.16
± 4	1020	0.31
± 3	2204	0.67
± 2.5	3270	1.00
± 2	4981	1.52
± 1.75	6243	1.91
± 1.5	7977	2.44
± 1.25	10616	3.24
± 1	14504	4.43

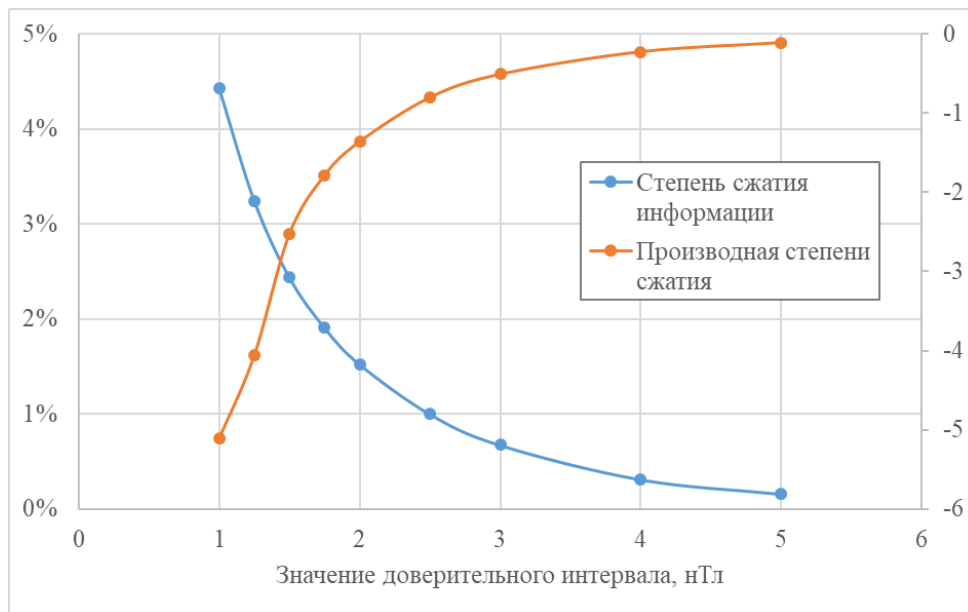


Рис. 6. Степень сжатия информации (ось ординат слева) и ее производная (ось ординат справа).

На рисунках 7 и 8 представлены карты значений сплайн-функции на высотах 5 и 7 м, построенные на пересчитанной прямоугольной регулярной сетке с шагами дискретизации 0.67 м и 0.71 м (300 точек на диапазон) по осям X и Y соответственно. При этом, доверительный интервал абсолютных погрешностей был принят равным ± 1 нТл. Отчетливо видны, выделенные синим цветом положительные аномалии, соответствующие курганам. В центрах аномалий наблюдается уменьшение положительных значений, обусловленные ямами в курганах. Менее отчетливо видны кольцевые аномалии вокруг курганов № 1 и 2, соответствующие рвам. При детальном сравнении карт видно, что на более низкой высоте есть структуры, исчезающие на более высоком уровне. Так касательно к кургану № 2 расположена тонкая линейно вытянутая отрицательная аномалия, наблюдаемая только на высоте 5 м. На рисунках 9 и 10 приведены карты нормированной амплитуды пространственного градиента на высотах 5 и 9 м соответственно. На них хорошо выделяются тонкие детали строения участка «Южный», в частности линейные аномалии субширотного направления, связанные с участками пашни.

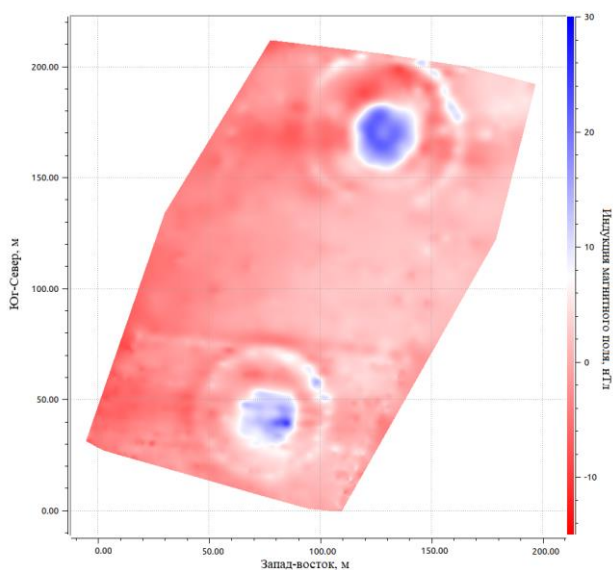


Рис. 7. Карта значений сплайн-функции на высоте 5 м

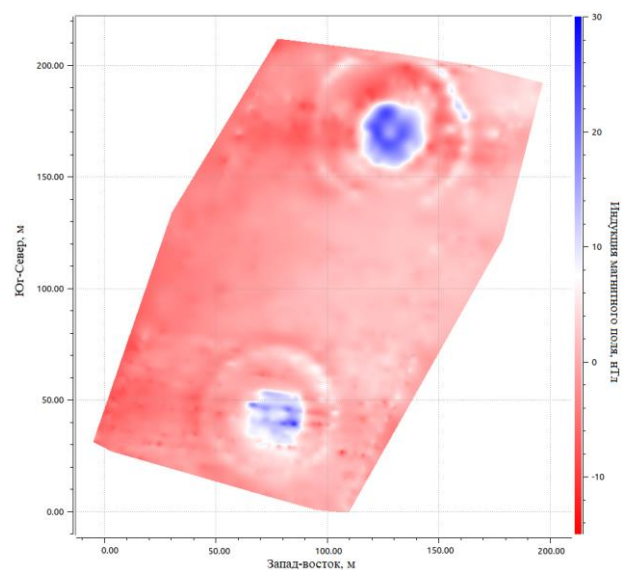


Рис. 8. Карта значений сплайн-функции на высоте 7 м

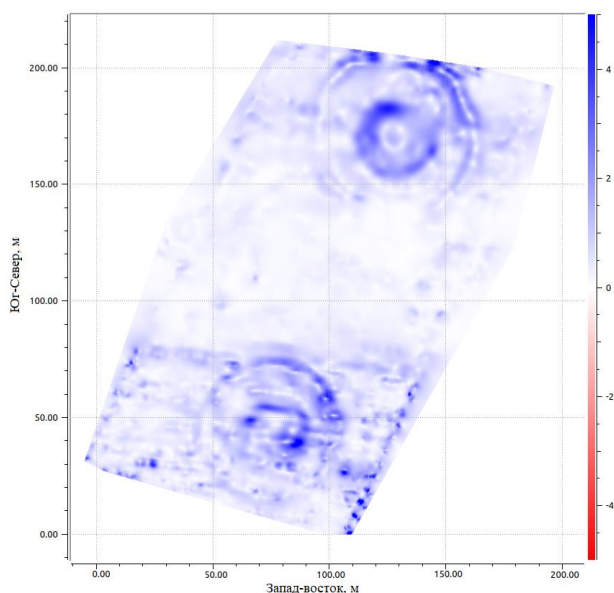


Рис. 9. Карта нормированной амплитуды пространственного градиента сплайн функции на высоте 5 м

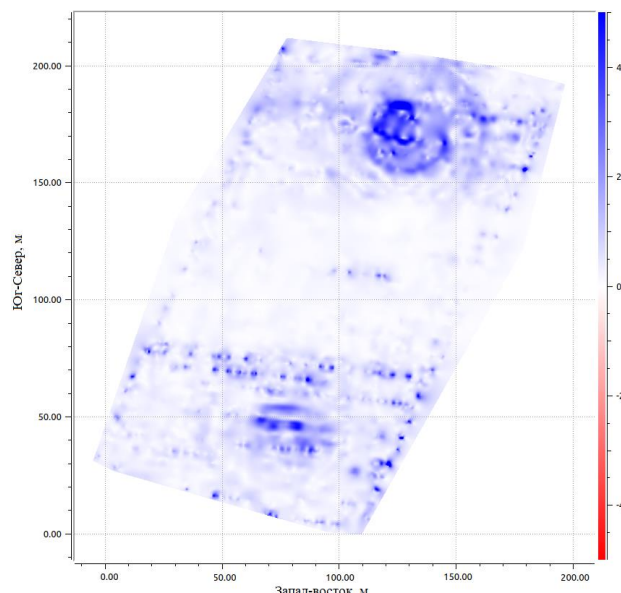


Рис. 10. Карта нормированной амплитуды пространственного градиента сплайн функции на высоте 9 м

На рисунках 11 и 12 показаны карты вертикальной производной от сплайн-функции на высотах 5 и 7 м соответственно. На них, кроме основных структур, отражаются и другие детали строения, еще нуждающиеся в археологической расшифровке.

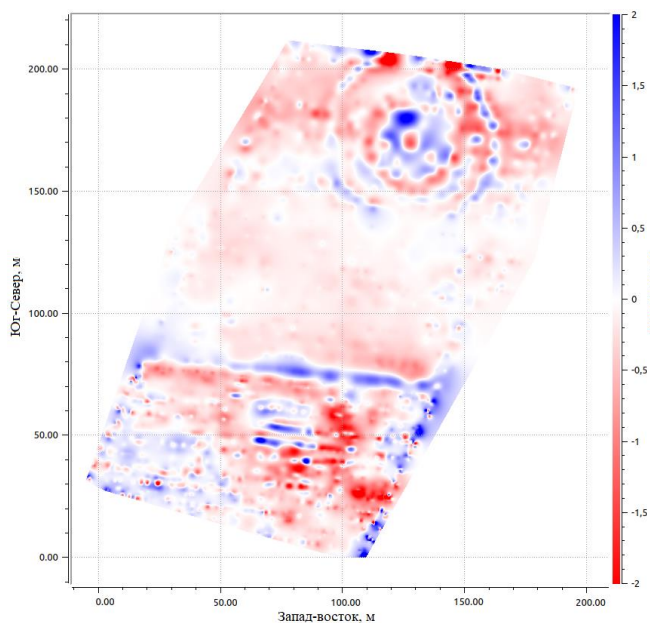


Рис. 11. Карта значений вертикальной производной сплайн-функции на высоте 5 м

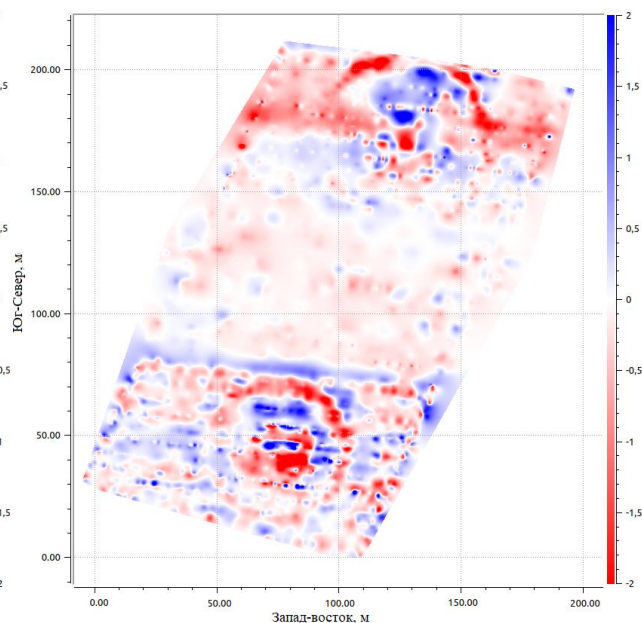


Рис. 12. Карта значений вертикальной производной сплайн-функции на высоте 7 м

На рисунках 13–16 приведены карты меридиональной и широтных производных, на высотах 5 и 7 м соответственно. Общая структура неоднородностей хорошо коррелирует с картами пространственных производных. На них отчетливо видно, что глубина грабительской ямы на кургане № 1 превосходит таковую на кургане № 2. На рисунке 17 показана карта лапласиана аномальных значений индукции магнитного поля на высоте 7 м, показывающая возможность расчета вторых пространственных производных.

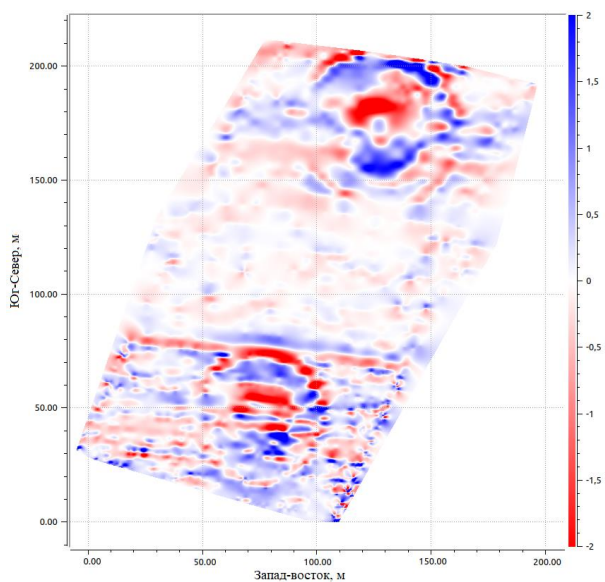


Рис. 13. Карта значений меридиональной производной сплайн-функции на высоте 5 м

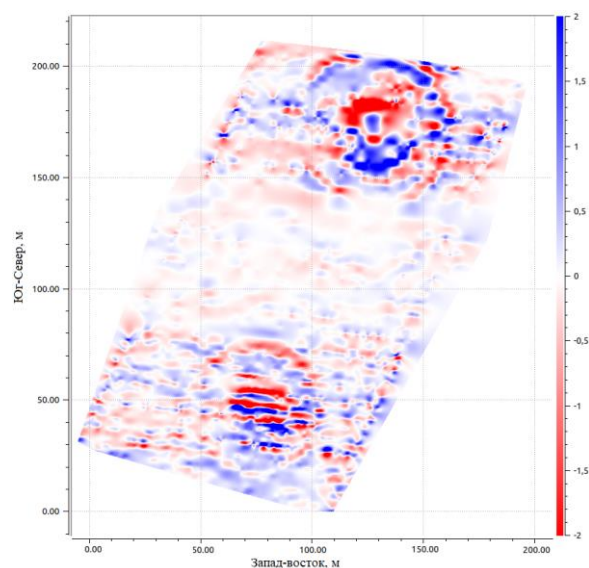


Рис. 14. Карта значений меридиональной производной сплайн-функции на высоте 7 м

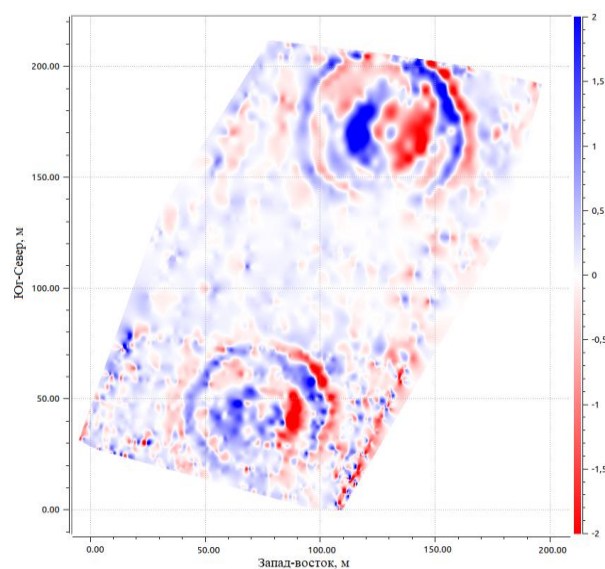


Рис. 15. Карта значений широтной производной сплайн-функции на высоте 5 м

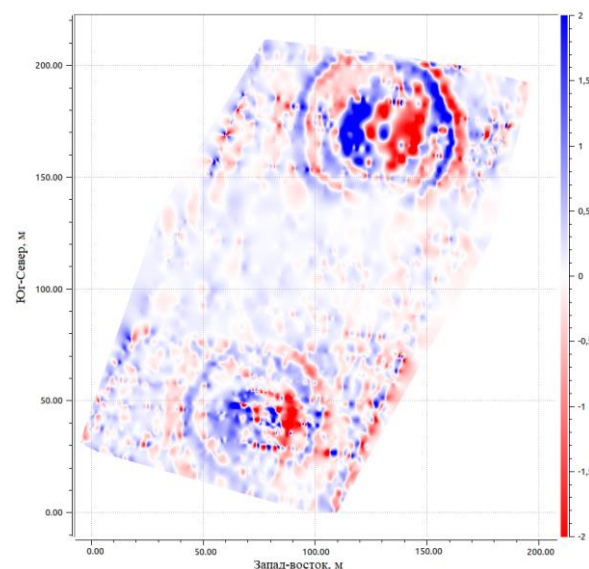


Рис. 16. Карта значений широтной производной сплайн-функции на высоте 7 м

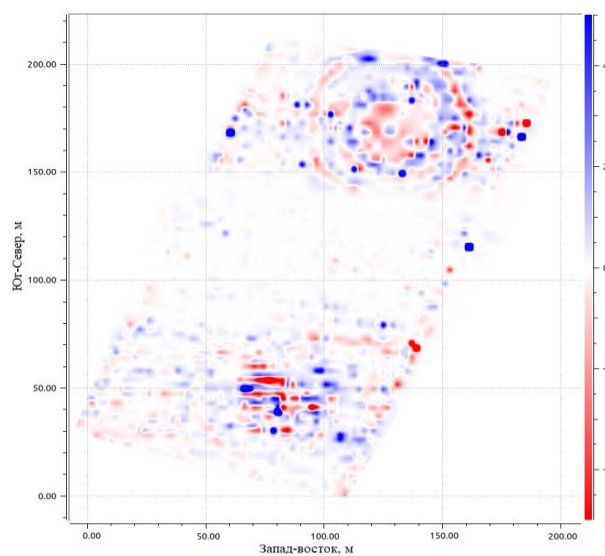


Рис. 17. Карта значений лапласиана сплайн-функции на высоте 7 м

Целью данной статьи была демонстрация работы предложенного алгоритма сплайн-аппроксимации на практических данных. Для этого были выбраны кондиционные данные аэромагнитной съемки на трех уровнях. Археологические результаты предполагается опубликовать в другой статье в специализированном журнале по археологии.

ВЫВОДЫ

Применение сплайнов позволило построить регулярный куб аномальных значений индукции магнитного поля, ее пространственных производных, а также модуля градиента и вертикальной производной от магнитной индукции.

На полевых данных показано, что расширение доверительного интервала (увеличение абсолютной погрешности измерений) приводит к сокращению объема данных, необходимых для представления полевых измерений с заданной точностью. Это связано с тем, что не все измеренные значения необходимы для построения аппроксимирующего сплайна. Изменение степени сжатия информации позволяет сделать достоверную оценку среднего уровня абсолютной погрешности по всему участку.

На картах аномальных значений индукции магнитного поля и ее пространственных производных отчетливо проявляются черты археологических объектов, требующие детальной идентификации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-49-220006 «Крупные курганы элиты древних и средневековых кочевников на территории Алтайского края как объекты экскурсионно-туристической деятельности: историко-археологические и естественно-научные исследования»).

ЛИТЕРАТУРА

Василенко В.А., Зюзин М.В., Ковалков А.В. Сплайн-функции и цифровые фильтры. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – 156 с.

Ковалков А.В. Об одном алгоритме построения сплайнов с дискретными ограничениями типа неравенств. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. – Препринт № 385. – 15 с.

Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация. – М.: Мир, 1975. – 495 с.

Тишкин А.А., Чугунов К.В., Чемякина М.А., Дядьков П.Г., Манштейн А.К., Позднякова О.А., Миненко М.И., Адайкин А.А. Геофизические исследования на памятнике Бугры в предгорьях Алтая // Алтае-Саянская горная страна и история освоения ее кочевниками. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2007. – С. 215–220.

Тишкин А.А., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Колесов А.С., Шеремет А.С. Магнитометрическая съемка «царского» кургана и ближайшей территории на археологическом памятнике Урочище Балчикова-3 с помощью беспилотного летательного аппарата // Теория и практика археологических исследований. – 2017. – № 4 (20). – С. 103–111.

Фролов Я.В., Тишкин А.А. Крупные курганы в Мамонтовском районе Алтайского края // Сохранение и изучение культурного наследия Алтайского. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2020. – Вып. XXVI. – С. 216–224.

Эпов М.И., Молодин В.И., Манштейн А.К., Балков Е.В., Дядьков П.Г., Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Бортникова С.Б., Позднякова О.А., Карин Ю.Г., Кулешов Д.А. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 3. – С. 603–614.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГАПЕЕВ Денис Николаевич – технический директор ООО ГК «Цифра». Основные научные интересы: математические методы в геофизики, разработка программного обеспечения в том числе с использованием технологий параллельных/распределенных вычислений.

ЭПОВ Михаил Иванович – доктор технических наук, академик, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, включая их интерпретацию; геофизические методы поиска и разведки месторождений, включая морскую геоэлектрику и скважинную геофизику, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии; а также эффекты взаимодействия электромагнитных импульсов с флюидонасыщенными горными породами.

ТИШКИН Алексей Алексеевич – доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой археологии, этнографии и музеологии Алтайского государственного университета. Основные научные интересы: разработка и наполнение конкретным содержанием культурно-хронологической концепции изучения истории древних и средневековых народов Алтая и сопредельных территорий, использование естественно-научных методов в археологических исследованиях, архаичные кочевые империи, социальные реконструкции, система жизнеобеспечения, методологические принципы интерпретации крупных курганов.

ФИРСОВ Андрей Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, руководитель проекта «Аэротомография», ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: теория и моделирование систем расплав – двухкомпонентный флюид, флюидные и расплавные включения в минералах, геофизических методов исследования с помощью БВС.

ФРОЛОВ Ярослав Владимирович – кандидат исторических наук, директор Музея археологии и этнографии Алтая Алтайского государственного университета. Основные научные интересы: документирование археологических объектов, культура населения Обь-Иртышского междуречья в раннем железном веке, создание базы данных о крупных курганах, музейное дело.

КОЛЕСОВ Александр Сергеевич – ведущий специалист, ООО «СКАН АЭРО»; инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: конструирование БВС и аэрокомплексов на основе легких БВС.

ОСТАНИН Владимир Александрович – ведущий специалист ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: корректирование гидродинамических моделей на основании данных площадной геофизической съемки (сейсморазведка, магниторазведка), реализация прикладного программного обеспечения.

МАЛЕТИН Юрий Юрьевич – ведущий специалист ООО «СКАН АЭРО». Основные научные интересы: первичная обработка геофизических данных, полученных с помощью БВС.