

УДК 550.389.1

## К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ КАРТ АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ( $\Delta T$ )а ДВУХ ТЕРМАЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК НАЛЫЧЕВСКОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Мельникова А.В. (4 курс)*

*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

*Научный руководитель: к.т.н. В.А. Рашидов*

На основе оригинальных материалов, полученных при изучении двух термальных площадок Налычевской гидротермальной системы (Юго-Восточная Камчатка), – «Котел» и «Грифон Иванова», рассматриваются особенности интерполяции магнитных полей с помощью программы Surfer 9.0, которая позволяет редуцировать результаты съемки в регулярную сеть 12-тью способами. В результате проведенных исследований, наиболее оптимальным, по нашему мнению, для редуцирования оказался метод Шепарда.

*Ключевые слова: карты, аномальное магнитное поле, интерполяция.*

Результатами магнитной съемки являются карты и карты графиков аномального магнитного поля. Из наблюдаемых значений поля вычитают значения нормального поля и поправки за вариации, в результате получая значения аномального магнитного поля. При модульной съемке:

$$(\Delta T)_a = T - T_{\text{норм}} - T_{\text{вар}},$$

где  $\Delta T_a$  – аномальное магнитное поле,  $T$  – наблюдаемое магнитное поле,  $T_{\text{норм}}$  – нормальное магнитное поле Земли,  $T_{\text{вар}}$  – вариации магнитного поля.

Качество построенных геомагнитных карт и их кондиционность, определяется, прежде всего, точностью съемки и густотой сети наблюдения. Для оценки точности съемки проводятся повторные наблюдения в объеме 5-10% от общего количества точек измерения, как правило, по секущим профилям, и рассчитывается среднеквадратическая ошибка измерений [6]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{2n}},$$

где  $\delta_i$  – разность отсчетов на  $i$ -той точке при основном и повторном измерениях, а  $n$  – число повторных точек наблюдения.

Точность съемки увеличивается при минимизации ошибок. Суммарная ошибка съемки складывается из аппаратурной точности прибора, координатной ошибки, ошибки оператора и ошибки интерполяции. Ошибка съемки приводит к ошибкам интерпретации.

К большому сожалению, на практике сети съемочных геофизических профилей нередко оказываются нерегулярными и выполненными с редкой плотностью. Материалы подобных съемок для построения карт и интерпретации полученных данных предварительно редуцируют на регулярную сеть, что, строго говоря, является некорректной процедурой [1]. Для этого используется множество различных способов. Так, например, программа ArcGIS имеет 4 способа редуцирования, программа Geosoft – 6, а программа Surfer – 12. Каждый из этих способов имеет различные модификации и обладает своими специфическими недостатками.

Переход от исходных сетей к интерполированным, особенно, в случае нерегулярных редких сетей, приводит к серьезным ошибкам в интерпретации [1]. Поэтому для обработки данных, полученных на нерегулярных сетях наблюдений, в последнее время, разрабатываются технологии количественной интерпретации, позволяющие проводить интерпретацию непосредственно по исходным данным, не прибегая к некорректной процедуре их предварительного восстановления в узлах регулярной сети [2, 3, 8, 9].

В последнее десятилетие многие российские и иностранные исследователи занимаются сравнением способов редуцирования для выбора наиболее оптимального метода интерполяции, приводящего к наименьшим ошибкам при интерпретации различных данных [1, 4, 5, 12-14]. Так в работе [5] для анализа больших массивов данных рекомендуют метод обратных расстояний, для анализа небольших массивов – методы крикинга и радиальных базисных функций. В работе [12], посвященной исследованию

вертикальных коровых движений на территории Польши, наиболее удовлетворительным считают метод естественного соседа. В работе [13] по изучению климата в качестве наиболее оптимальных выделяют методы кригинга, минимальной кривизны и радиальных базисных функций. В работе [14] применяемые методы интерполяции анализировались при изучении рельефа, но однозначно, ни один из них не был выбран в качестве рекомендуемого.

В наших исследованиях, как наиболее доступная, была использована программа Surfer 9.0 (<http://www.goldensoftware.com/>), из 12-ти методов интерполяции которой эмпирическим путём были выбраны 7.

Краткое описание алгоритма построения карт с помощью этих методов интерполяции, основанное на материалах работ [5, 14] представлено в табл. 1.

Проведенные нами исследования базируются как на синтетических примерах, так и на оригинальных данных, полученных в июле 2010 г. в Природном парке Налычево (Юго-Восточная Камчатка) во время проведения полевых работ в рамках Научно-исследовательского лагеря «Геофизик-10» (рис. 1).

Комплексные геофизические исследования термальных площадок травертиновый купол «Котел» и «Грифон Иванова» (названный в честь известного гидрогеолога Валерия Владимировича Иванова) включали в себя площадные и профильные геомагнитные и ядерно-геофизические исследования в 501 точке [10, 11] (рис. 2).

На термальной площадке «Котел» размером 180×200 м измерения проводились в узлах предварительно разбитой квазирегулярной сети по сетке 10×20 м, а на термальной площадке «Грифон Иванова» размером 90×100 м – площадные измерения с шагом 10 м вдоль профилей съемки без разбивки сети, но с непосредственной привязкой в точках измерения.

Таблица 1. Краткое описание алгоритма построения карт

<i>Метод обратных расстояний</i> <i>Inverse distance to a power</i>	В данном методе влияние каждой конкретной точки определяется расстоянием до узла сетки (весом точки). Сумма весов в узле всегда равна единице, поэтому, если координаты точки заданного массива совпадают с координатами узлов рассчитываемой сети, то этой точке присуждается вес равный 1.0, всем остальным близкие к нулю.
<i>Метод крикинга</i> <i>Kriging</i>	В процессе работы происходит анализ направлений изогипс и объединение отдельных точек вдоль выбранных аномальных зон.
<i>Метод минимальной кривизны</i> <i>Minimum curvature</i>	Рассчитывает самую гладкую возможную поверхность с наименьшими искажениями исходных данных
<i>Метод Шепарда</i> <i>Shepard's method</i>	Для расчетов использует квадраты расстояния. Данная особенность определяет его использование для визуализации геофизических (гравитационных, магнитных, электрических) полей, интенсивность которых обычно уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника.
<i>Метод естественного соседа</i> <i>Natural neighbor</i>	Создает набор многоугольников, используя среднее взвешенное значение соседних наблюдений.
<i>Метод радиальных базисных функций</i> <i>Radial basis function</i>	Группа разнообразных методов интерполяции данных. Степень сглаженности поверхности определяется задаваемыми коэффициентами.
<i>Метод триангуляции</i> <i>Triangulation with linear interpolation</i>	Метод работает, создавая из ближайших к узлу расчетной сети точек треугольники. Исходные данные считываются таким образом, что никакие из треугольников не пересекаются друг с другом. Метод работает наилучшим образом, когда данные распределены равномерно.

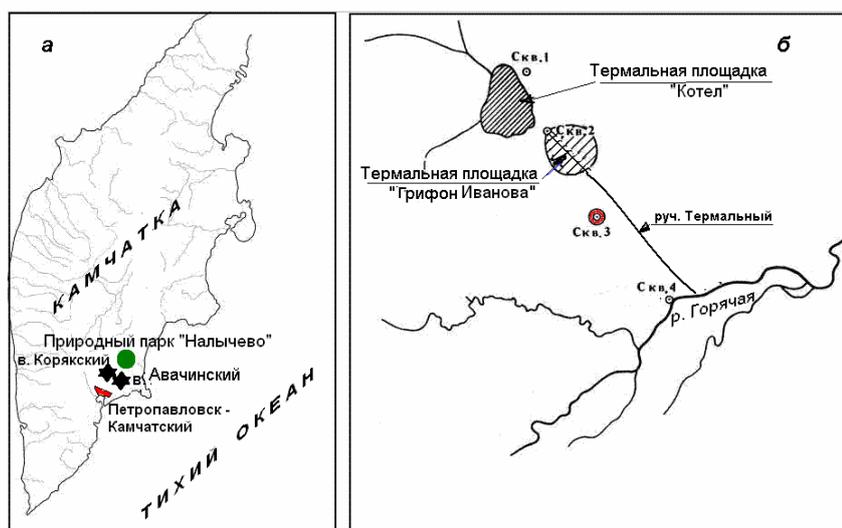


Рис. 1. Местоположение Природного парка Налычево (а) и исследованных термальных площадок (б). Построено с использованием материалов из работы [7].

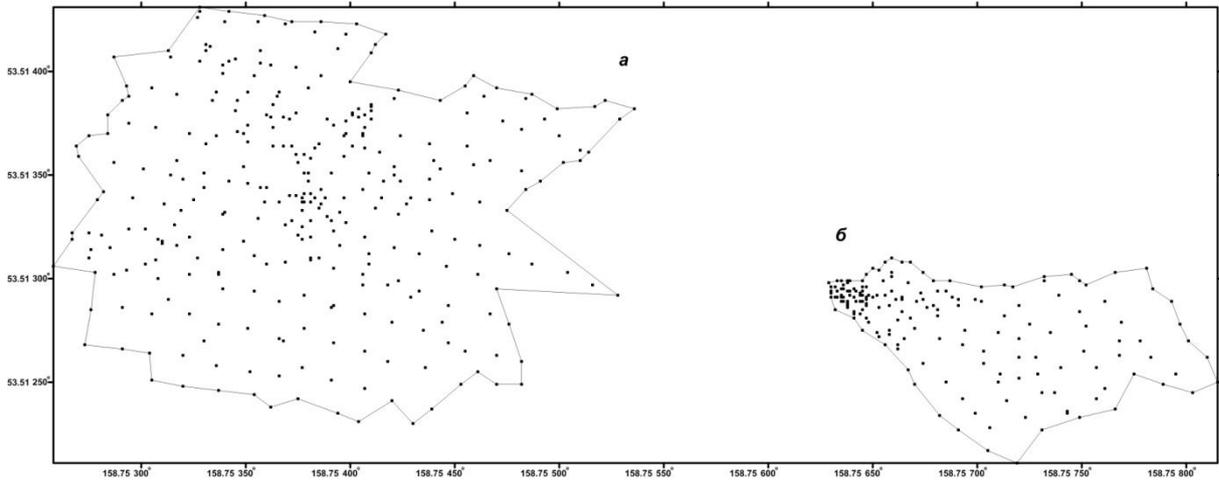


Рис. 2. Точки измерений, выполненных при проведении комплексных геофизических исследований: *а, б* – точки измерения ( $\Delta T$ )а на термальных площадках «Котел» (*а*) и «Грифон Иванова» (*б*).

Результаты площадных геомагнитных измерений в силу специфики природноохраняемого объекта Природного парка «Налычево» оказались не увязанными друг с другом. При построении карт программа Surfer 9.0 по своим алгоритмам экстраполировала значения в лакуны и, вследствие чего, построила некорректные карты (рис. 3). Естественно, что такие карты нельзя использовать для интерпретации.

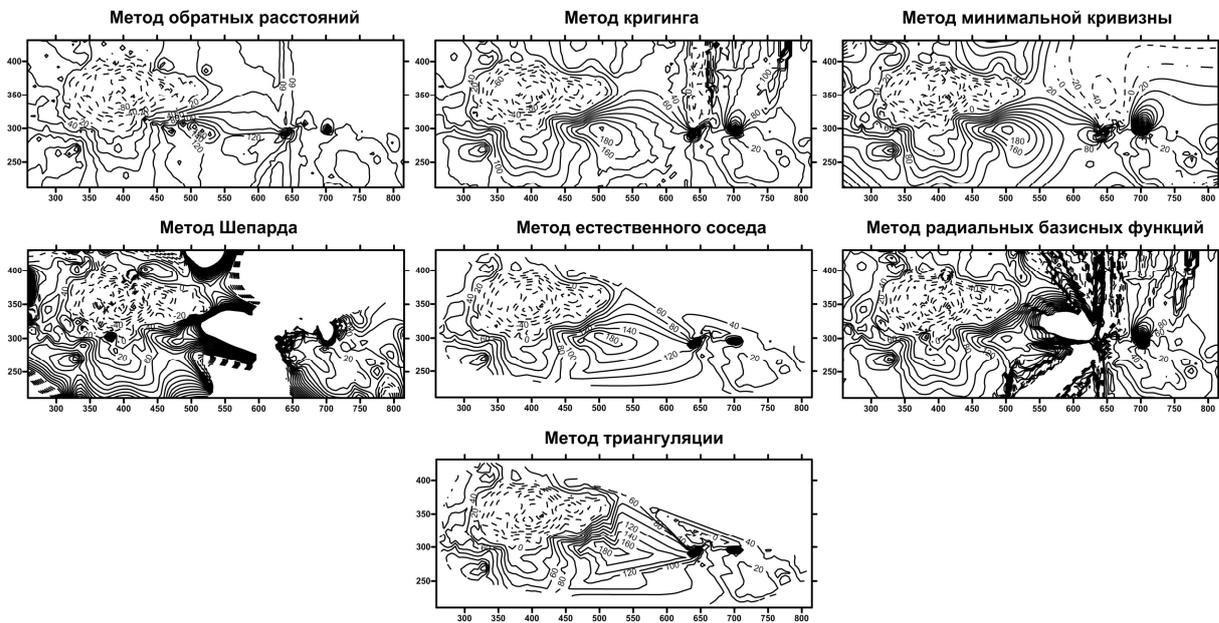


Рис. 3. Карты ( $\Delta T$ )а термальных площадок «Котел» и «Грифон Иванова», построенные различными способами интерполяции.

Для построения карт ( $\Delta T$ ), мы решили выбрать наиболее оптимальный способ интерполяции, основываясь на трех критериях:

- визуальной устойчивости на модельных примерах при уменьшении априорной информации;
- по быстродействию методов;
- по оценке среднеквадратической ошибки методов.

Были рассмотрены три синтетические модели: изометрического поля (рис. 4-6) и полей субширотного (рис. 7-9) и субмеридианального (рис. 10-12) простираний.

Для изометрического поля рассматривались три варианта построения карт в узлах квадратной регулярной сети размерностью  $25 \times 25$ ,  $13 \times 13$  и  $7 \times 7$  точек. Для полей субширотного и субмеридианального простирания – три варианта с размерностью  $17 \times 33$ ,  $9 \times 17$  и  $5 \times 9$  точек.

При значительном объеме данных карты, построенные различными методами, визуально не отличаются друг от друга (рис. 4, 7, 10). При уменьшении априорной информации при использовании метода обратных расстояний, возникают псевдоаномалии; в методе минимальной кривизны в углах сети возникают градиентные зоны, а методы естественного соседа и триангуляции строят искаженные изображения (6, 8, 12).

По нашему мнению, наиболее устойчивыми во всех трех моделях визуально являются карты, построенные методами крикинга, Шепарда и радиальных базисных функций.

Те же 7 способов интерполяции были использованы и при построении карт ( $\Delta T$ ) термальных площадок «Котел» и «Грифон Иванова» (рис. 13-14). Анализ построенных карт показал, что методы естественного соседа и триангуляции не экстраполируют значения в лакуны. Метод обратных расстояний строит локальные изолированные аномалии, которые на наш взгляд не являются реальными. При использовании метода Шепарда, при экстраполяции в краевых частях возникают высокоградиентные зоны.

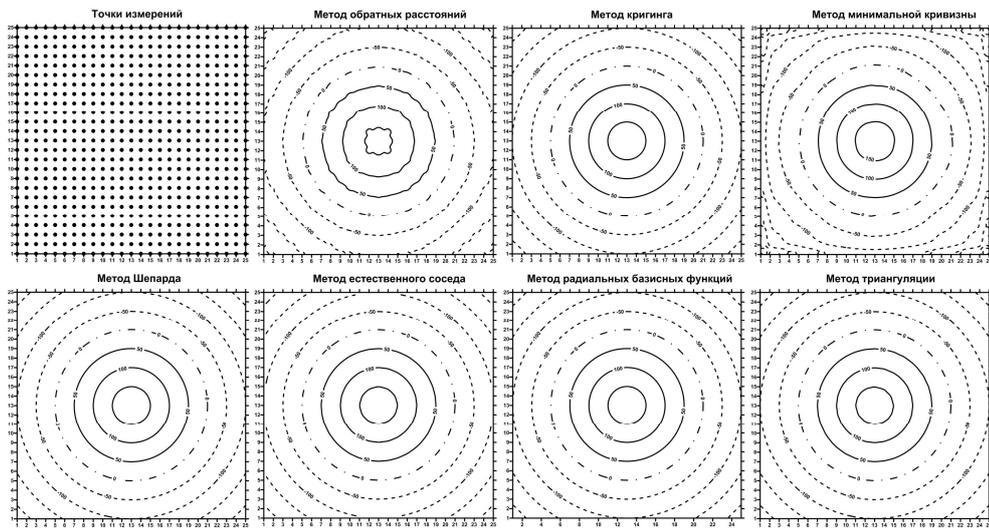


Рис. 4. Карты изометрического поля, 625 точек измерений.

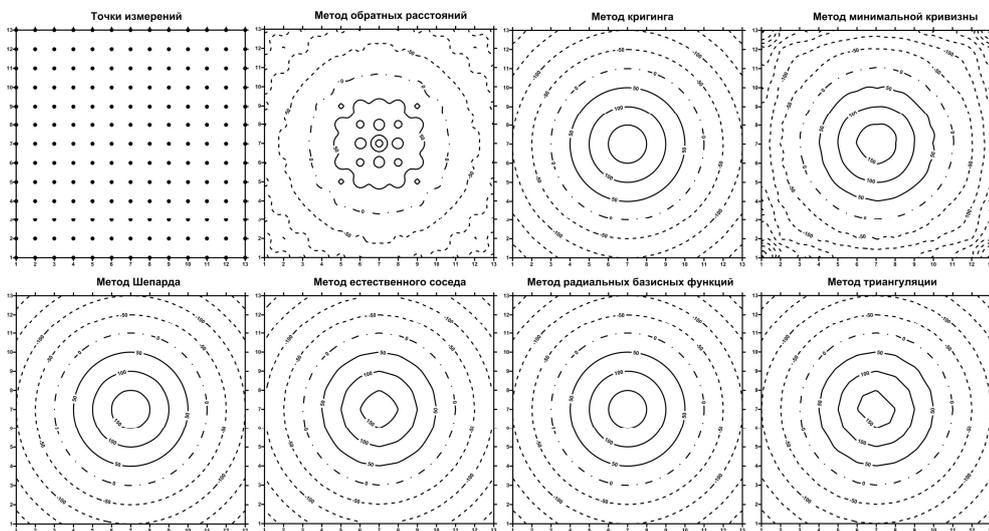


Рис. 5. Карты изометрического поля, 169 точек измерений.

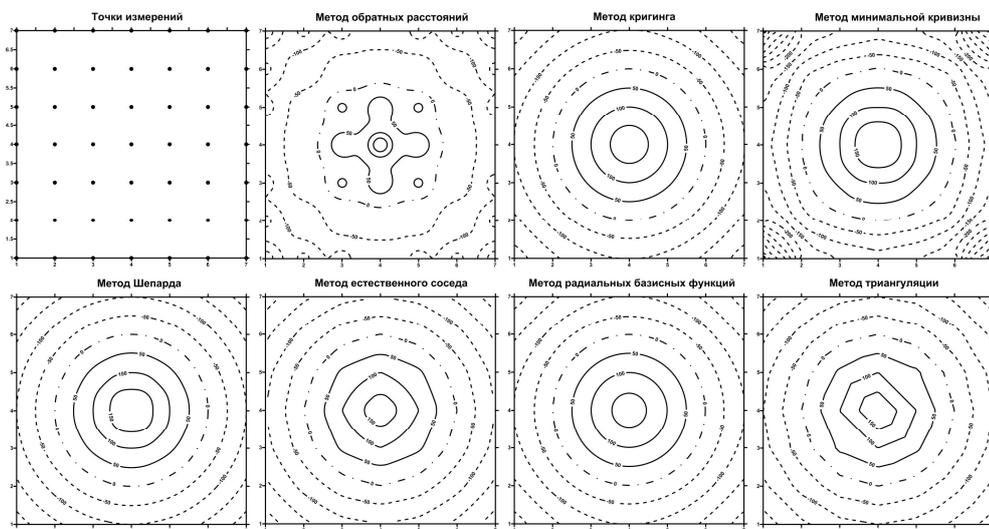


Рис. 6. Карты изометрического поля, 49 точек измерений.

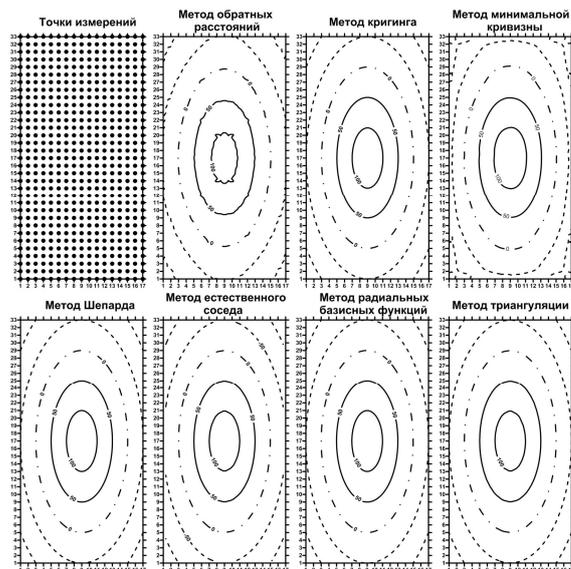


Рис. 7. Карты поля, имеющего субмеридианальное простиране, 561 точка измерений.

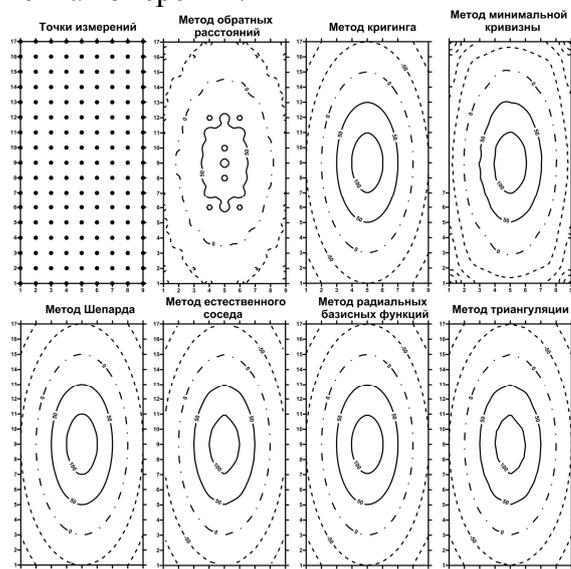


Рис. 8. Карты поля, имеющего субмеридианальное простиране, 153 точки измерений.

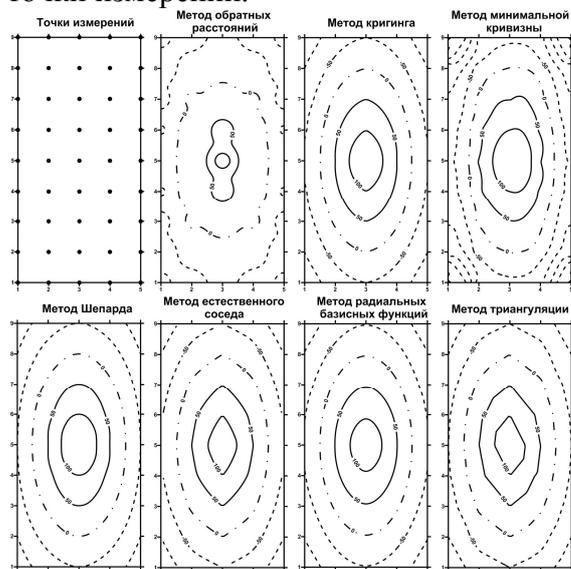


Рис. 9. Карты поля, имеющего субмеридианальное простиране, 45 точек измерений.

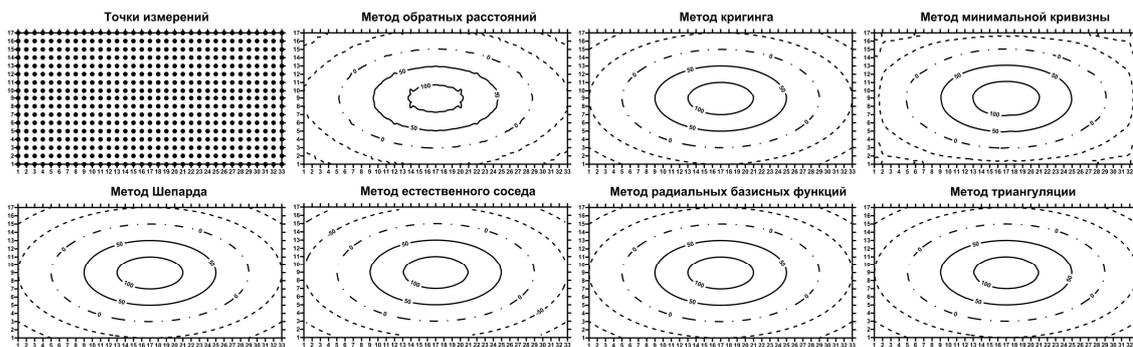


Рис. 10. Карты поля, имеющего субширотное простирание, 561 точка измерений.

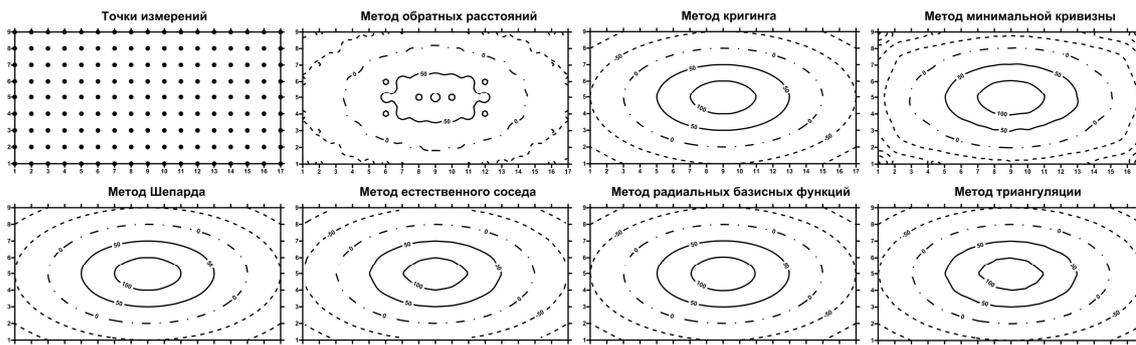


Рис. 11. Карты поля, имеющего субширотное простирание, 153 точки измерений.

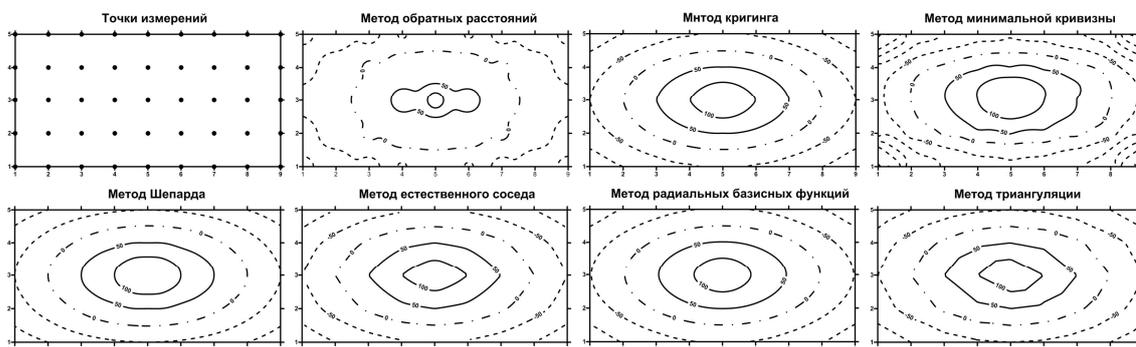


Рис. 12. Карты поля, имеющего субширотное простирание, 45 точек измерений.

Также были построены разностные карты ( $\Delta T$ ) а термальной площадки «Котел», имеющей более дифференцированное поле. Карты, построенные всеми семью методами, сравнивались между собой (рис. 15).

Из анализа разностных карт следует, что размах разницы аномалий составляет до трети значения измеренного поля, а ряд экстремумов смещается на несколько метров в зависимости от способа интерполяции. Поэтому при интерпретации по произвольно снятому с карты профилю, не являющимся профилем съемки, возникают ошибки, приводящие к недостоверным результатам. Для исключения этих ошибок интерполяции многие

исследователи предлагают проводить интерпретацию данных непосредственно по исходным профилям съемки [2, 3, 8, 9].

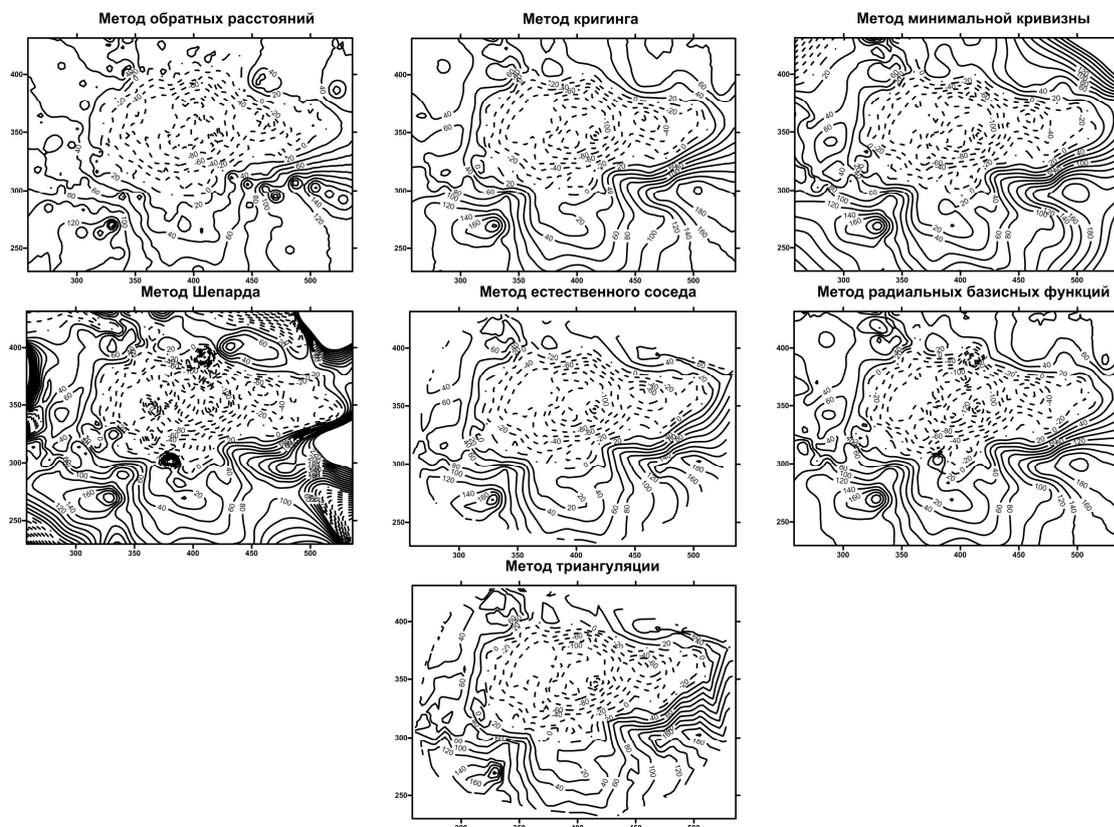


Рис. 13. Карты аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а термальной площадки «Котел», построенные различными способами.

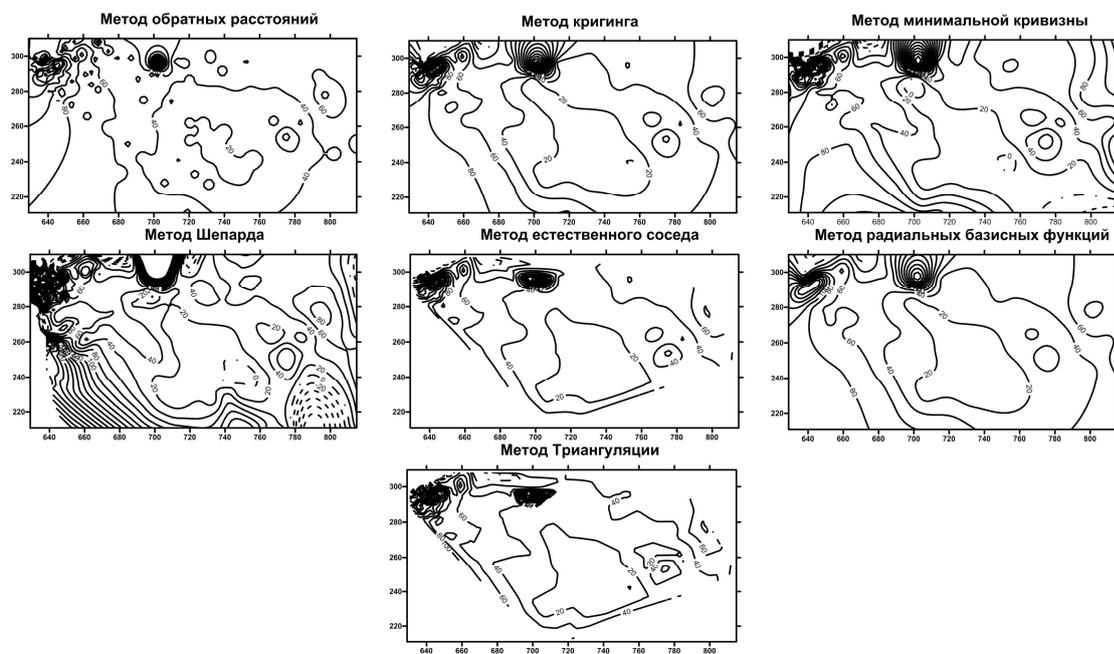


Рис. 14. Карты аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а термальной площадки «Грифон Иванова», построенные различными способами.

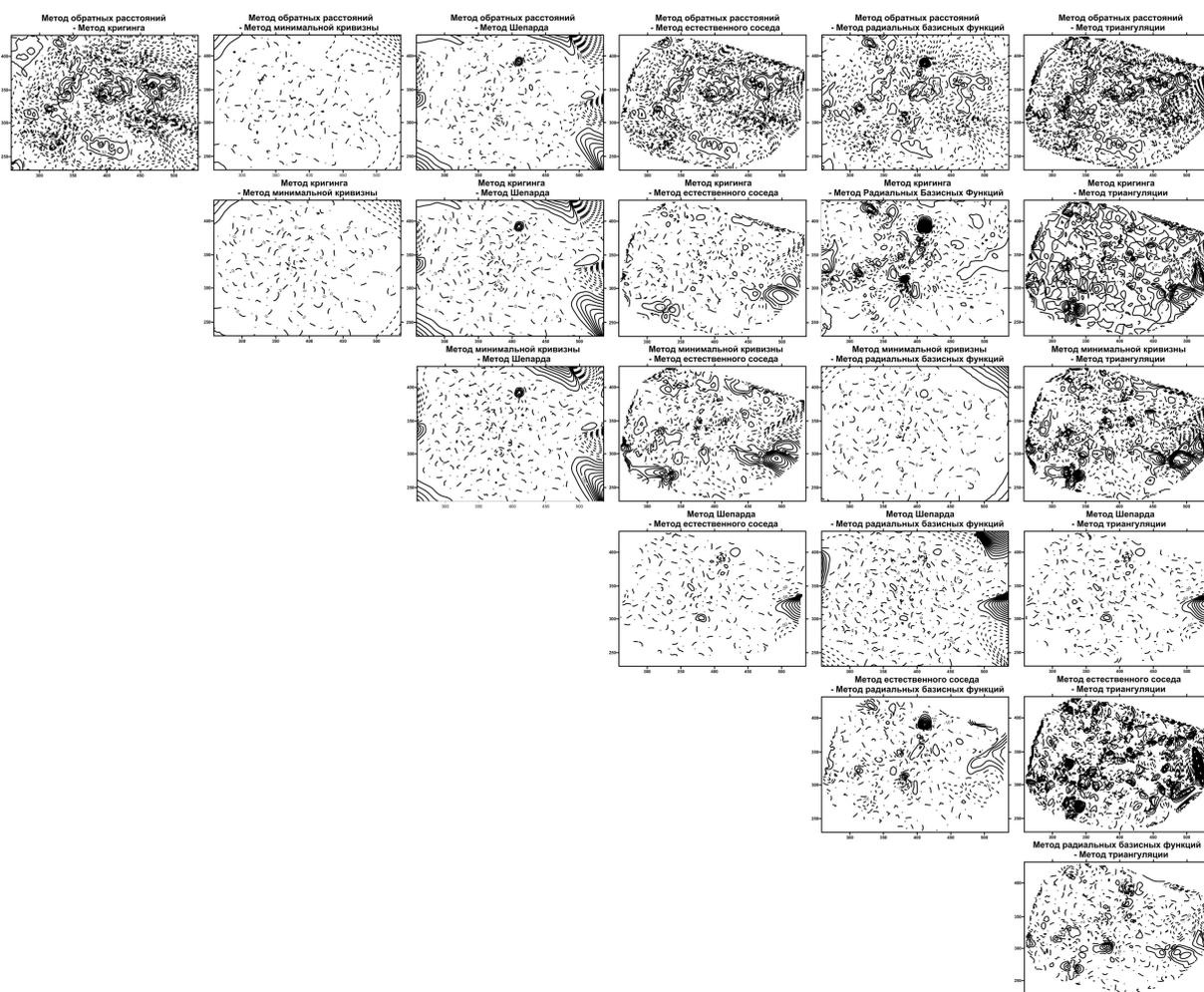


Рис. 15. Карты разностей значений магнитного поля, полученных при интерполяции различными методами.

При обработке больших массивов данных немаловажным является как быстродействие, так и ресурсоемкость применяемых методов. Проведенный анализ быстродействия различных методов интерполяции показал, что метод триангуляции является самым быстродействующим (табл. 2). Следующими по быстродействию являются метод Шепарда и метод минимальной кривизны.

Таким образом, из методов, выбранных по первому критерию, наиболее оптимальными по быстродействию является метод Шепарда.

На конечном этапе методы сравнивались по величине среднеквадратической ошибки. Для этого использовались данные, полученные на двух реальных опорных профилях измерений, обработанных для увязки съемок (рис. 16). Полученные на них значения ( $\Delta T$ )а сравнили со значениями в

тех же точках снятых с карт, полученных различными способами интерполяции (рис. 17-18, табл. 3).

Таблица 2. Продолжительность обработки данных, рассмотренных методов интерполяции

	Модельные примеры полей			Материалы съёмки	
	Изометрическое в 625 точках	Субмеридианальное простираие в 561 точке	Субширотное простираие в 561 точке	Купола в 320 точках	Грифона Иванова в 181 точке
Метод обратных расстояний	0,31 с	0,16 с	0,14 с	0,2 с	0,02 с
Метод кригинга	1,6 с	0,93 с	0,91 с	1,55 с	0,05 с
Метод минимальной кривизны	0,07 с	0,02 с	0,02 с	0,32 с	0,17 с
Метод Шепарда	0,03 с	0,04 с	0,04 с	0,02 с	0,02 с
Метод естественного соседа	0,15 с	0,09 с	0,09 с	0,11 с	0,07 с
Метод радиальных базисных функций	1,83 с	1,06 с	1,05 с	4,85 с	0,05 с
Метод триангуляции	0,01 с	0,01 с	0,01 с	0,01 с	0,01 с

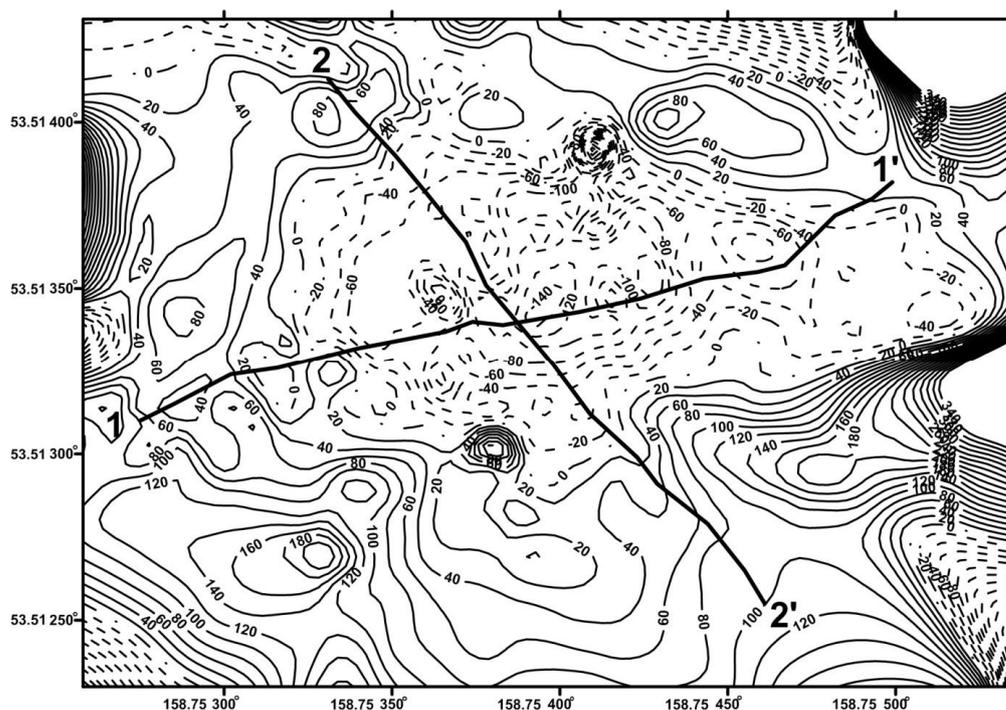


Рис. 16. Исследуемые профили.

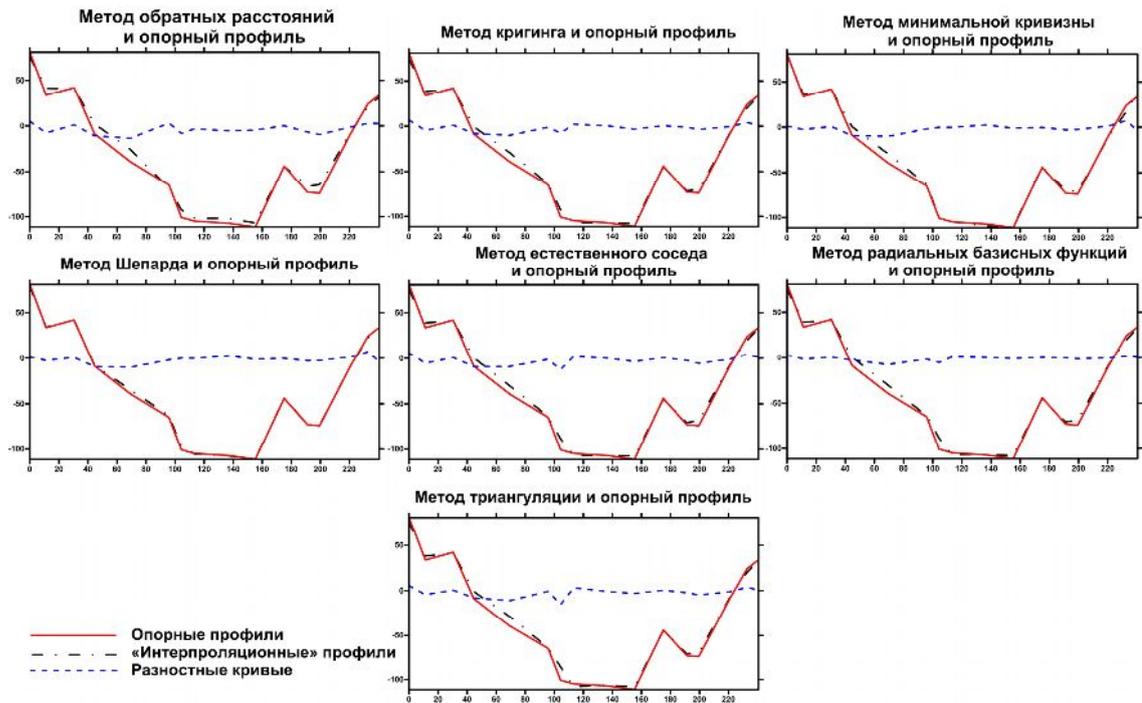


Рис. 17. Профиль 1-1'. Графики аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а построенные по исходным данным и по значениям снятым с карт, построенных различными методами интерполяции.

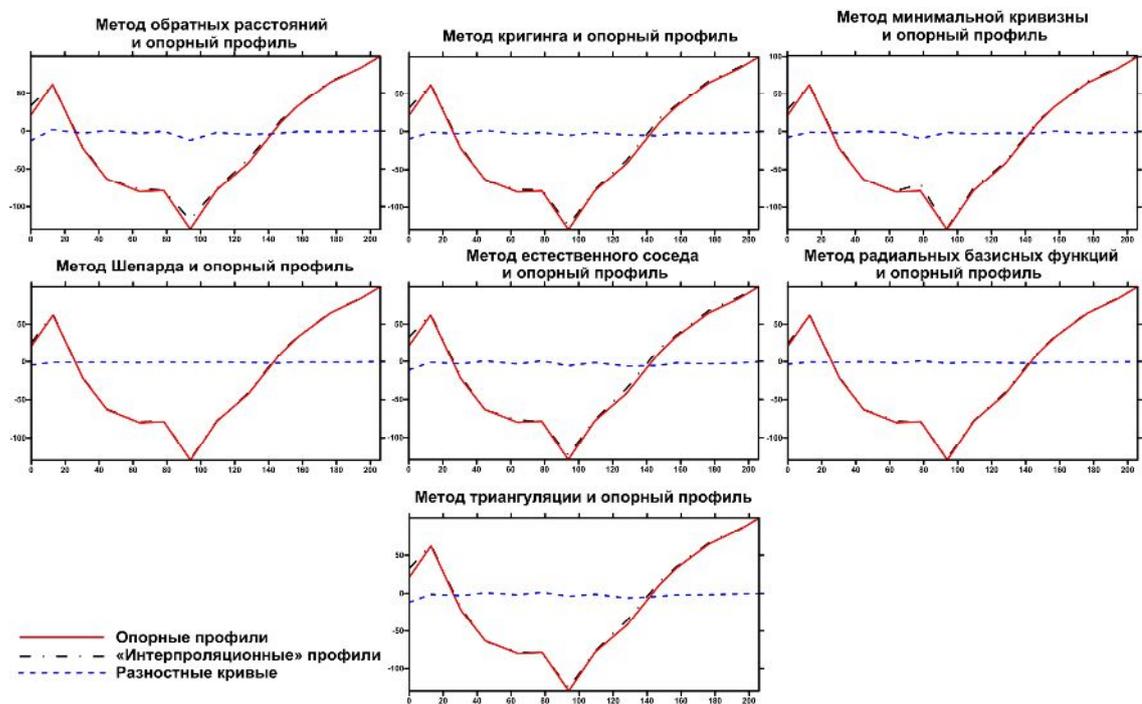


Рис. 18. Профиль 2-2'. Графики аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а построенные по исходным данным и по значениям снятым с карт, построенных различными методами интерполяции.

Анализ показал, что наименьшая среднеквадратическая ошибка достигается при использовании карт, построенных методами Шепарда и ради-

альных базисных функций. Наиболее заметно отклонение в экстремальных точках, и, соответственно, чем больше интенсивность аномалии, тем больше становится и это отклонение.

Таблица 3. Среднеквадратическая ошибка рассмотренных методов интерполяции

	Профиль 1-1'	Профиль 2-2'
Метод обратных расстояний	4,57	2,8
Метод Кригинга	3,28	2,7
Метод минимальной кривизны	3,01	2,5
Метод Шепарда	1,27	1,1
Метод естественного соседа	3,81	2,4
Метод радиальных базисных функций	1,87	1,1
Метод триангуляции	4,02	1,9

В результате проведенных работ сделан вывод о том, что наиболее оптимальным по трем выбранным критериям является метод Шепарда, и с его помощью построена карта ( $\Delta T$ )а для термальных площадок «Котел» и «Грифон Иванова» (рис. 19).

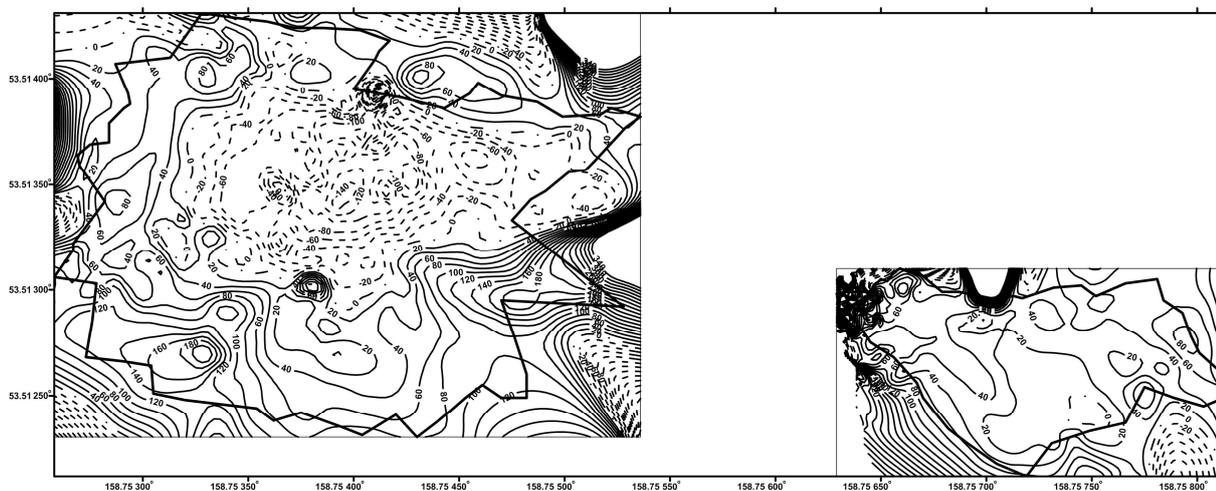


Рис. 19. Карта аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а.

### Выводы

Результаты выполненных исследований показали, что наиболее оптимальным для построения карт аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )а по трем рассмотренным критериям является метод Шепарда, который использует для расчетов квадраты расстояний. Данная особенность, на наш

взгляд, позволяет использовать его и для визуализации гравитационных и электрических полей, интенсивность которых обычно уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника.

В виду возникновения ошибок при интерполяции данных различными методами, интерпретацию данных следует проводить непосредственно по исходным профилям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Блох Ю.И.* Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие. М., 2009. 232 с. (<http://sigma3d.com/content/view/24/2/>).
2. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Геофизические исследования подводного вулкана 6.1 (Курильская островная дуга) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С 32-35.
3. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.* История геомагнитных исследований подводных вулканов Курильской островной дуги // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Камчатской вулканологической станции / Отв. ред. академик Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 6-10. ([http://www.kscnet.ru/ivs/slsecret/75-KVS/Material\\_conferenc/art2.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/slsecret/75-KVS/Material_conferenc/art2.pdf)).
4. *Долгаль А.С., Бычков С.Г., Антипин В.В.* Повышение точности определения поправки за влияние рельефа при гравиметрической съемке // Геофизика, 2003. №6. С. 44-50.
5. *Зеливянская О.Е., Чуприна О.В.* Влияние объема информации на качество графического представления материалов // Сборник научных трудов. Серия «Нефть и газ», Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказского технического университета, 2002. Вып 2. С. 45-49.
6. *Логачев А.А., Захаров В.П.* Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. 351 с.
7. *Масуренков Ю.П., Комкова Л. А.* Геодинамика и рудообразование в купольно-кольцевой структуре вулканического пояса. М.: Наука, 1978. 274 с.
8. *Петров А.В., Юдин Д.Б.* Обработка данных методами вероятностно-статистического подхода в компьютерной технологии «КОСКАД ПРОФИЛЬ» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 222-224.
9. *Рашидов В.А.* Геомагнитные исследования при изучении подводных вулканов островных дуг и окраинных морей западной части Тихого океана. Автореф. дисс. канд. тех. наук. Петропавловск-камчатский, 2010. 27 с.
10. *Рашидов В.А., Мельникова А.В.* Геомагнитные исследования термальной площадки «Котел» (Налычевская гидротермальная система, Камчатка) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара имени Д.Г.Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 254-256.

11. Фирстов П.П., Рашидов В.А., Мельникова А.В., Андреев В.И., Шульженкова В.Н. Комплексные геофизические исследования в Природном парке «Налычево» (Камчатка) в 2010 году // Вулканизм и связанные с ним процессы традиционная региональная научная конференция, посвященная Дню Вулканолога. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский. 30 марта – 1 апреля. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 86. ([http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/documents/tezis\\_2011.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/documents/tezis_2011.pdf)).
12. Kowalczyk K., Rapinski J., Mroz M. Analysis of vertical movements modeling through various interpolation techniques. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 7, No. 4 (160), 399–409, 2010.
13. Nikolova N., Vassilev S. Mapping precipitation variability using different interpolation methods. Conferens on Water Observation System and Decision Support. 2006. ([http://balwois.mpl.ird.fr/balwois/administration/full\\_paper/ffp-631.pdf](http://balwois.mpl.ird.fr/balwois/administration/full_paper/ffp-631.pdf)).
14. Yang C.-S., Kao S.-P., Lee F.-B., Hung P.-S. Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. XXth ISPRS Congress 12-13 July 2004 Istanbul, Turkey Proceeding of Commission II 778-785

TO A QUESTION OF PLOTTING THE ANOMALOUS MAGNETIC FIELD MAPS ( $\Delta T$ ) IN TWO THERMAL AREAS OF NALYCHEVSKAYA HYDROTHERMAL SYSTEM

*Melnikova A.V.*

*Kamchatka state university by Vitus Bering*

On basis of original materials, got at field research of two thermal areas of Nalychevskaya hydrothermal system (South-Eastern Kamchatka) – «Kotel» and «Grifon Ivanova» the particularities of interpolation magnetic fields are considered by the instrumentality of program Surfer 9.0, which enable to reduce the results of the survey to regular network with 12 methods. As a result of research, in our opinion, the best for the reduction was the Shepard's Method.

*Keywords: maps, anomalous magnetic field, interpolation*