

УДК 550.8.053

© К.М. Ермохин

К.М. Ермохин

СЛОЖНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ И СПОСОБ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Вопросам интерпретации данных магниторазведки посвящено большое количество работ. При этом некоторые существенные моменты обычно упускаются либо просто замалчиваются. В частности, для пород с высокой магнитной проницаемостью ($\mu \gg 1$) проф. Ю.И. Блохом разработан математический аппарат решения прямой задачи с учетом эффекта размагничивания [2], но при решении задач интерпретации он не применяется, хотя такие породы – не редкость (например, на Курской магнитной аномалии или Гремяхинском месторождении на Кольском п-ве). И это не случайно, т.к. в этом случае ОЗ (обратная задача) становится существенно нелинейной и требует на несколько порядков больших вычислительных ресурсов.

Общеизвестно, что намагниченность горных пород в общем случае состоит из двух слагаемых $I = I_i + I_n$, где I_i – индуцированная намагниченность (направленная по современному магнитному полю Земли), I_n – остаточная (направленная по древнему полю в процессе формирования массивов горных пород). «Отношение $I_n / I_i = Q$ называется фактором Кенигсбергера. Q меняется от сотых долей до 100 и более единиц. Это свидетельствует о том, что глубинные магнитные аномалии, наблюдаемые на поверхности Земли, обусловлены в большинстве случаев величиной I_n , а не I_i . Для термоостаточной намагниченности фактор Q , как правило, больше единицы» [6]. Изучение изменения направления и величины вектора намагниченности горных пород в массивах различного возраста является предметом исследования палеомагнетизма и лежит в основе расчетов современной теории мобилизма.

Таким образом, пренебречь остаточной намагниченностью, считая все объекты намагниченными по современному полю, можно лишь при малоглубинных исследованиях верхней части геологического разреза (и то не всегда). При больших глубинах это противоречит палеомагнитным данным.

Из вышесказанного следует, что решение ОЗ магниторазведки (определение пространственного распределения намагниченности) при глубинных исследованиях не может быть корректным без

информации об остаточной намагниченности. Но получить данные о ней без специализированного бурения невозможно, а значит, сама постановка такой задачи чаще всего практически невыполнима.

Кроме того, при решении ОЗ встречается устойчивое заблуждение, что на больших глубинах при высоких температурах (выше точки Кюри) магнетизм отсутствует, а потому в этой зоне не может быть аномально намагниченных областей. Приведем цитату из Физической энциклопедии [7]: «...Fe, Co и Ni в кристаллическом состоянии ниже определенной температуры (точка Кюри) обладают ферромагнитными свойствами, выше точки Кюри они парамагнитны». Вообще, согласно определению, точка Кюри – температура фазового перехода в парамагнитное состояние. Парамагнетики обладают положительной магнитной восприимчивостью и способны намагничиваться под действием внешнего магнитного поля, которое есть всегда. Парамагнетизм присущ веществам в любом агрегатном состоянии (даже в плазменном), т.е. индуцированная намагниченность присутствует на любых глубинах.

Более того, некоторые металлы (такие, например, как Ti, Zr, W, Mo) в момент фазового перехода при нагревании увеличивают (иногда даже скачком) свою магнитную восприимчивость. Этот вывод подтверждают экспериментальные исследования [10], где на примере Ti (рис. 1) отмечается повышение магнитной восприимчивости. Этими экспериментами установлено, что «...с увеличением температуры магнитная восприимчивость металлов возрастает». Кроме этого отмечается повышение магнитной восприимчивости при наличии примесей, что ближе к природному состоянию расплавов залежей металлов на большой глубине.

Скачок восприимчивости при температуре 882 °С для Ti связан с тем, что металл претерпевает полиморфное превращение, изменяя свою структуру.

Отметим, что по содержанию в земной коре железо занимает 4-е место – 4,65%. Содержание никеля – 0,0058%, кобальта – 0,0036%. Железо входит в состав всех магматических пород, кроме того, что ядро Земли (по существующим на данный

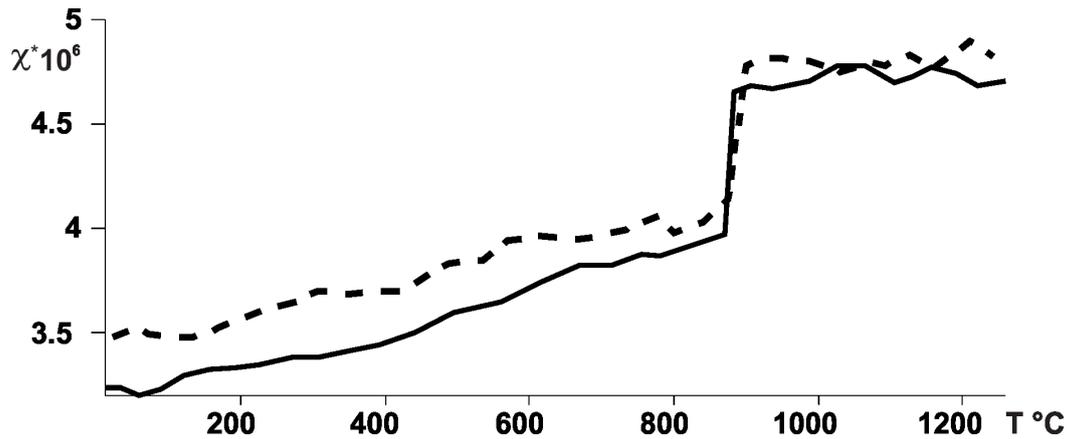


Рис. 1. Зависимость магнитной восприимчивости титана от температуры (жирная линия – чистота Ti = 99,99%, пунктирная линия – чистота Ti = 99,85%)

Fig. 1. Dependence of the magnetic susceptibility of titanium on temperature (bold line – purity Ti = 99,99%, dotted line – purity Ti = 99,85%)

момент теориям) состоит в основном из него. Наиболее высокие содержания Ni и Co отмечаются в ультраосновных горных породах [6].

Таким образом, на больших глубинах может быть большая концентрация парамагнитных веществ, что говорит о существенном влиянии магнетизма глубинных пород на измерения, проведенные с поверхности, особенно для региональных исследований. Учет глубинного намагничивания путем снятия глобального тренда неоднозначен и к истинному решению не приводит.

Единственный (пока) метод корректной интерпретации данных магниторазведки – аналитическое продолжение магнитного поля с профилей измерений в нижнее полупространство. Различные подходы продолжения геофизических полей разработаны благодаря работам С.В. Шалаева, Б.А. Андреева и В.Н. Страхова. К сожалению, все они продолжают поле **только до верхней особой точки**, так как при приближении к ней наблюдается явление распада поля, признанное самими авторами [8]. Это свидетельствует о катастрофической неустойчивости применяемых подходов и является препятствием для практического применения метода. Причина распада поля состоит в несоответствии описания изучаемых полей линейными математическими моделями: представление полей в виде рядов или интегралов типа Коши порождает существенную некорректность, которая объясняется тем, что поле, имеющее особенности в нижнем полупространстве, принципиально не может адекватно описываться линейной конструкцией. Описанием поля, наиболее близким к реальному, является конструкция типа дробно-рациональной, поскольку наличие особенностей изучаемых функций в нижнем полупространстве имеет адекватное соответствие нулям знаменателя. Значительный вклад в решение

нелинейных задач внесла теория цепных дробей, разработанная в трудах выдающихся ученых, таких как Евклид, Эйлер, Чебышев, Риман, Пуанкаре, Трон, Висковатов и др.

Решение задачи аналитического продолжения **в нижнее полупространство** реализовано в методе АПЦД (Аналитическое Продолжение Цепными Дробями) на базе аппроксимации исследуемых функций цепными дробями. Его основой является алгоритм В.И. Висковатова [11]. Метод АПЦД – комплексная практическая реализация метода особых точек Г.А. Трошкова [9] и полного градиента В.М. Березкина [1] на основе **нелинейной аппроксимации**, который позволяет осуществить продолжение измеренных на поверхности различных геофизических полей (в частности, магнитного) на глубину порядка 1/3 длины профиля. При этом явление распада поля в окрестности особых точек отсутствует [4, 5].

Результаты АПЦД не зависят от **направления намагниченности** (она может существенно меняться в разрезе как по направлению, так и по величине) и не требует априорного его знания.

Геологические помехи слабо влияют на результат аналитического продолжения, т.к. сами создают аналитический сигнал и выделяются в виде мелких объектов, что полностью снимает вопрос борьбы с ними, обсуждаемый в [2].

АПЦД позволяет без какой либо априорной информации локализовать в пространстве источники аномалий магнитного поля, наблюдаемого на поверхности. Объясняется это тем, что особые точки наблюдаемого на поверхности поля, независимо от направления Земного поля, находятся внутри аномальных масс, и именно положение особых точек определяет конфигурацию поля в нижнем полупространстве [9]. В свою очередь, аналитическое продолжение определяет положение

этих точек (полюсов) и их мощность однозначно, согласно соответствующим математическим теоремам [3], без привлечения эвристических приемов и интуитивных аналогий.

АПЦД определяет положение и конфигурацию аномалеобразующих объектов в пространстве без определения их физических свойств (намагниченности или магнитной восприимчивости). При таком подходе существование, единственность и устойчивость решения гарантируются соответствующими математическими теоремами.

В качестве примера на рис. 2 приведен результат аналитического продолжения в нижнее полупространство теоретически рассчитанного поля ΔT изогнутого пласта при вертикальном (А) и горизонтальном (Б) направлении магнитного поля Земли. Результат локализации пласта методом АПЦД не зависит от направления вектора намагничивания.

На рис. 3 решение ОЗ по профилю без АПЦД принципиально невозможно, поскольку вектор намагничивающего поля горизонтален и перпендикулярен плоскости разреза. С точки зрения интерпретатора, он равен нулю (поляризующего поля как бы нет).

На рис. 4 (практический пример) отрицательная магнитная аномалия в горной Шории над магнетитовой залежью на глубине 20 метров. В отобранных образцах руд в ходе бурения установлено наличие отрицательной естественной остаточной намагниченности. Обратно намагниченные образцы обладают Q

больше 1. В результате аналитического продолжения магнитного поля в разрезе под отрицательной аномалией на глубине 20 метров фиксируется сильно намагниченный изогнутый вертикальный пласт.

Недостатками метода АПЦД в настоящее время являются:

- необходимость того, что профиль измерений должен быть максимально прямым (что, впрочем, свойственно и любым другим методам);
- сложность увязки результатов по пересекающимся профилям, т.к. они представляются в условных единицах по отдельным разрезам. Это может быть снято при обобщении метода на 3D случай, но при наличии полной информации по исследуемой площади.

Выводы

1. Недоучет эффектов размагничивания, остаточной намагниченности и глубинных магнитных масс может приводить к недостоверным результатам решения ОЗ.
2. Применение аналитического продолжения позволяет при интерпретации данных магниторазведки обойтись без решения классической ОЗ и привлечения априорных данных, т.е. работает в обход традиционных методов.

Ключевые слова: интерпретация, эффект размагничивания, остаточная намагниченность, глубинные магнитные массы, метод аналитического продолжения.

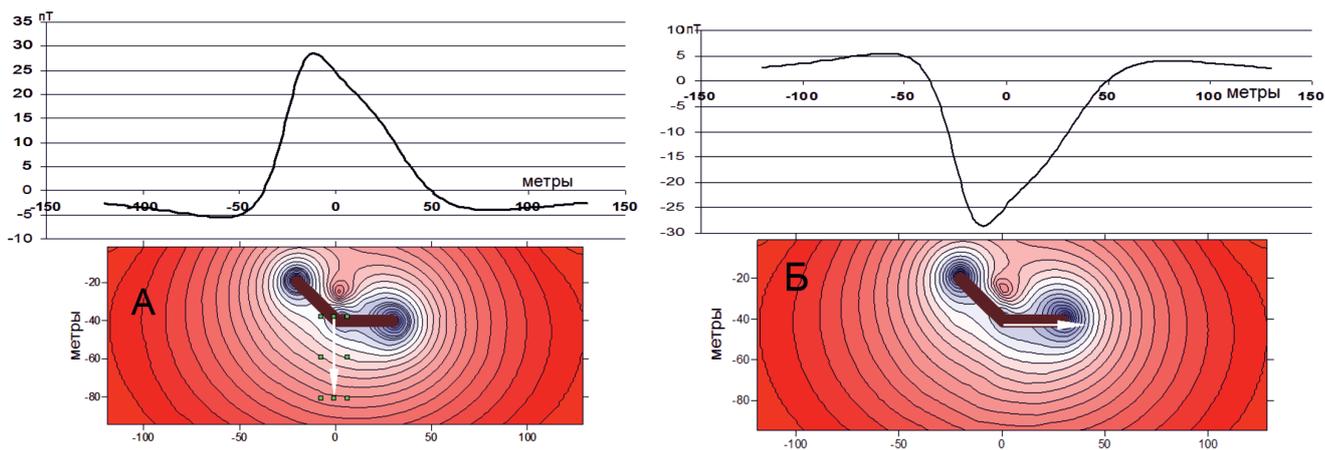


Рис. 2. Распределение модуля намагниченности изогнутого пласта при вертикальном (А) и горизонтальном (Б) намагничении (у.е.) (белые стрелки – направление намагничивающего поля, синий цвет – высокая намагниченность, красный – низкая)

Fig. 2. Distribution of the magnetization module of the curved formation with vertical (A) and horizontal (B) magnetization (white arrows – direction of the magnetizing field, blue color – high magnetization, red – low)

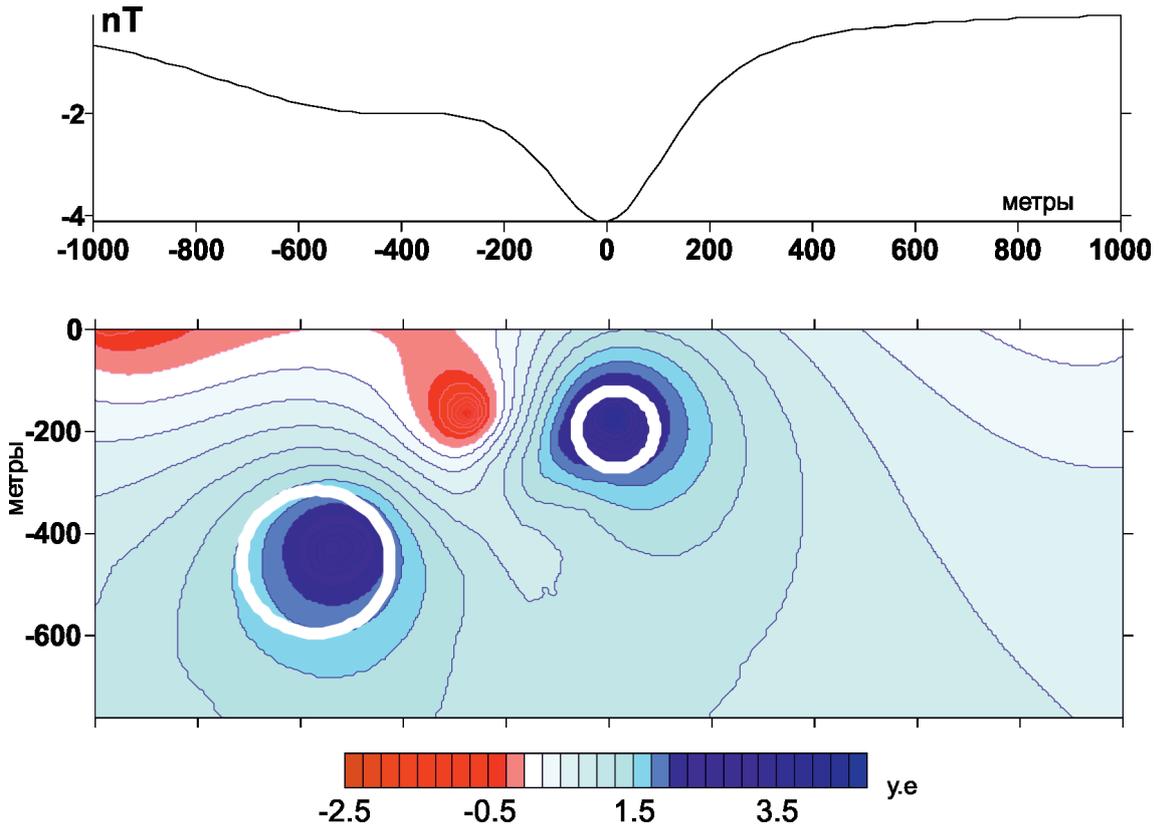


Рис. 3. Результаты аналитического продолжения магнитного поля ΔT от двух сфер на экваторе по широтному профилю ($I = 0, A = 90$)

Fig. 3. The results of the analytic continuation of the magnetic field ΔT of two spheres at the equator along the latitudinal profile ($I = 0, A = 90$)

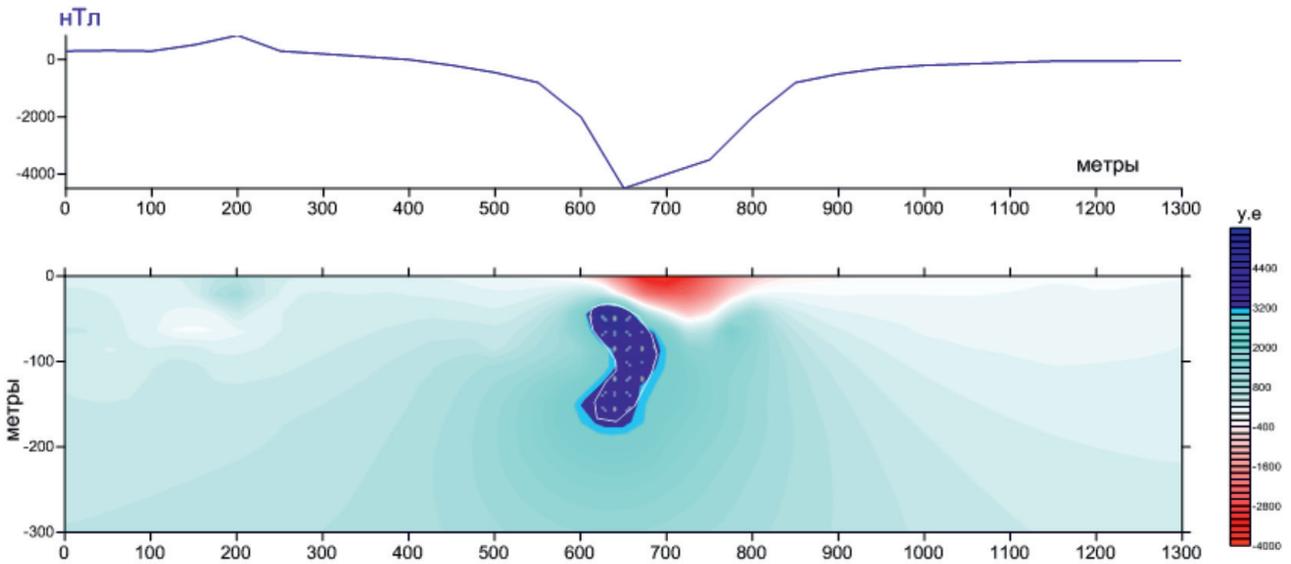


Рис. 4. Выделение методом АПЦД сильно обратно намагниченного объекта по отрицательной аномалии ΔT

Fig. 4. Detection by the CFC method back magnetized object on the negative anomaly ΔT

ЛИТЕРАТУРА

1. Березкин В.М., Киричек М.А., Кунарев А.А. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа. – М. : Недра, 1978. – 223 с.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий : учеб. пособие. – М. : РГГРУ, 2009. – 232 с.
3. Джоунс У., Трон В. Непрерывные дроби. – М. : Мир, 1985. – 414 с.
4. Ермохин К.М. Технология построения разрезов методом аналитического продолжения геофизических полей // Геоинформатика. – 2010. – № 2. – С. 51-60.
5. Ермохин К.М. Аналитическое продолжение гравимагнитных полей через массы // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 104-107.
6. Орленок В.В. Основы геофизики. – Калининград : Янтарный сказ, 2000. – 490 с.
7. Прохоров А.М. Большая физическая энциклопедия : в 5 т. – М. : Советская энциклопедия, 1988.
8. Страхов В.Н. Аналитическое продолжение потенциальных полей. Гравиразведка : справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. – М. : Недра, 1990. – 607 с.
9. Трошков Г.А., Грознова А.А. Математические методы интерпретации магнитных аномалий. – М. : Недра, 1985. – 151 с.
10. Упоров С.А., Фомина Н.С., Сидоров В.Е. Магнитная восприимчивость парамагнитных D-переходных металлов при высоких температурах // Вестник Удмуртского университета. Сер. Физика и химия. – 2007. – № 4. – С. 130-139.
11. Viskovatov B. De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantitees en fraction : Continues // Memoires de l'Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg. – 1805. – No. 1. – P. 226-247.

REFERENCES

1. Beriozkin V.M. et al. Application of geophysical exploration methods for direct prospecting for oil and gas fields, Moscow : Nedra, 1978. 223p.
2. Bloch Yu.I. Interpretation of gravitational and magnetic anomalies. Moscow : RSGPU, 2009. 232 p.
3. Jones W.B., Thron W.J. Continued fractions. Analytic theory and Applications. Moscow : Mir, 1985. 414 p.
4. Ermokhin K.M. Technology of constructing sections by the method of analytical continuation of geophysical fields // Geoinformatica. Moscow, 2010. 2. P. 51-60.
5. Ermokhin K.M. Analitical continuation of gravity and magnetic fields through the masses. Reports of the Academy of Sciences. 2017. V. 476, No. 1. P. 104-107.
6. Orlenok V.V. Fundamentals of geophysics. Kalininograd : Yantarnyj skaz, 2000. 490 p.
7. Prokhorov A.M. A large physical encyclopedia : in 5 volumes. Moscow : Soviet Entsiklopedia, 1988.
8. Strakhov V.N. Analytic continuation of potential fields. Gravity prospecting: Handbook of Geophysics / E.A. Mudretsova, K.E. Veselov (Ed.). Moscow : Nedra, 1990. 607 p.
9. Troshkov G.A., Groznova A.A. Mathematical methods of interpretation of magnetic anomalies. Moscow : Nedra, 1985. 151 p.
10. Uporov S.A., Fomina N.S., Sidorov V.E. Magnetic susceptibility of paramagnetic D-transition metals at high temperatures // Bulletin of the Udmurt University, Physics. 2007. No. 4. P. 130-139.
11. Viskovatov B. De la methode generale pour reduire toutes sortes des quantitees en fraction continues. Memoires de l'Academie Imperiale des Sciences de St. Petersburg. 1805. No. 1. P. 226-247.