

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПАЛЕОМАГНЕТИЗМА ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

К. М. Константинов, А. Н. Кузьменок, И. П. Кашетина



**Константин Михайлович Константинов,**  
кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела опытно-методических геолого-геофизических исследований Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия (НИГП) АК «АЛРОСА» ЗАО, советник РАЕН.



**Александра Николаевна Кузьменок,**  
геофизик 2 категории комплексной геофизической партии Амагинской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА» ЗАО.



**Инна Петровна Кашетина,**  
старший научный сотрудник отдела опытно-методических геолого-геофизических исследований НИГП АК «АЛРОСА» ЗАО.

Основной задачей науки является получение информации об окружающем нас мире и использование её во благо развития общества. Одним из таких источников информации является магнитное поле Земли, изучение которого позволяет понять строение и формирование её недр для прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых. Кратко, на примерах изучения горных пород Восточной Сибири, рассмотрим, как с помощью известных постулатов и методик геомагнетизма можно решать эти достаточно сложные задачи.

С незапамятных времен мореплаватели и землепроходцы для ориентации в пространстве использовали «указатели пути», сделанные из чёрного камня. Поскольку этот камень в изобилии встречался в стране Магнезии, он получил название магнит. Из-за способности магнита притягивать куски железа древние философы Платон и Аристотель считали его одушевлённым предметом. Астрологи уверяли, что магнит имеет космическое (метеорное) происхождение и по этой причине всегда указывает на путеводную Полярную звезду. Лишь в 1600 г. английский физик Уильям Гилберт опубликовал свой трактат «О магнитах», в котором доказал, что планета Земля обладает собственным магнитным полем. Геомагнитное поле часто изображают как поле диполя (оно похоже на поле, которое создавалось бы помещённым в центре Земли гигантским полосовым магнитом). Магнитное поле Земли может быть представлено силовыми линиями. Эти линии искривлены, большая их часть выходит из Земли у Южного полюса и входит у Северного. Касательная (вектор) к силовой линии определяет направление ( $D$  – склонение,  $J$  – наклонение) магнитной силы, а густота силовых линий – напряжённость поля  $H$ .

Практически все горные породы в той или иной степени содержат магнитные минералы (магнетит, гематит, пирротин и др.), которые при диагенезе ориентировались вдоль действующего в то время магнитного поля. На этом эффекте в середине прошлого века возникло новое направление исторической геофизики – палеомагнитология – учение о магнитном поле прошлых геологических эпох, запись которого сохранилась в векторе естественной остаточной намагниченности ( $I_n$ ) [1]. Свойство горных пород сохранять геологическую информацию подобно жёсткому магнитному носителю называется палеомагнетизмом («ископаемый», или прошлый магнетизм).

При изучении палеомагнетизма датированных геологических объектов разных материков возникла парадоксальная ситуация: оказалось, что северный магнитный полюс «расползается» в глубь времён по траекториям, соответствующим тому или другому блоку [2], то есть магнитное поле на протяжении всего геологического этапа развития Земли не является дипольным, а то, что мы наблюдаем последние 400 лет, относится к исключениям. Выходом из создавшейся ситуации послужил первый принцип палеомагнитологии: «Гипотеза центрального осевого диполя» – геомагнитное поле, осреднённое за промежуток времени порядка 0,1 млн. лет (кроме эпох геомагнитных инверсий и других аномалий), является полем центрального осевого диполя, помещённого в центр Земли и ориентированного по её оси вращения. В соответствии с этим основополагающим принципом, движение магнитного полюса является кажущимся, а движение материков (литосферных плит) – реальным. В настоящее время данная гипотеза получила статус постулата, поскольку опирается на неопровержимые

данные, охватывающие периоды в сотни миллионов лет (инверсии магнитного поля, зарегистрированные океанической корой, и древних стратиграфических образований и др.). Палеомагнитные реконструкции материков хорошо согласуются с геологическими (существование суперконтинента Пангея в период 300 – 180 млн лет назад), палеонтологическими (развитие и миграция живых организмов), климатическими (пёстро- и сероцветные седименты, тиллиты, бокситы, эвапориты, угли) и другими данными [3 – 5].

Вторым принципом палеомагнитологии является «Гипотеза фиксации», по которой утверждается, что горные породы при своём становлении намагничиваются по направлению магнитного поля времени и места их образования. Данная гипотеза не нуждается в особых доказательствах, поскольку согласно физико-математической модели магнитного поля шара наклонение магнитной стрелки  $J$  (меняется от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ ) связано с географической широтой  $\varphi$  простой формулой:

$$\varphi = \arctg(\frac{1}{2}tgJ).$$

Третий принцип палеомагнитологии – «Гипотеза сохранения» – говорит о том, что приобретённая первичная намагниченность сохраняется до настоящего времени и принципиально может быть выделена из суммарной многокомпонентной естественной остаточной намагниченности. Гипотеза предполагает, что вектор  $I_n$  может содержать ряд остаточных намагниченностей, приобретённых горными породами за всё время своего существования. Поэтому при компонентном анализе естественной остаточной намагниченности горных пород мы можем столкнуться с несколькими её разновидностями, которые классифицируются: по генезису – ориентационная  $I_{n0}$ , термоостаточная  $I_{nt}$ , вязкая  $I_{nv}$  и др.; по отношению к складчатости – до- $I_{na}$ , син- $I_{ns}$  или постскладчатая  $I_{np}$ ; по времени образования – первичная  $I_n^0$  и метасинхронная  $I_n^m$  [1]. Например,  $I_n^0$  может быть ориентационной или термоостаточной и, одновременно, доскладчатой.  $I_n^m$  может возникнуть химическим путём или под действием динамических нагрузок (Виллари-эффект) до, в процессе или после складкообразования и т.п. Таким образом, современная магнитная «память» горных пород может одновременно содержать некоторое множество палеомагнитных векторов (компонент):

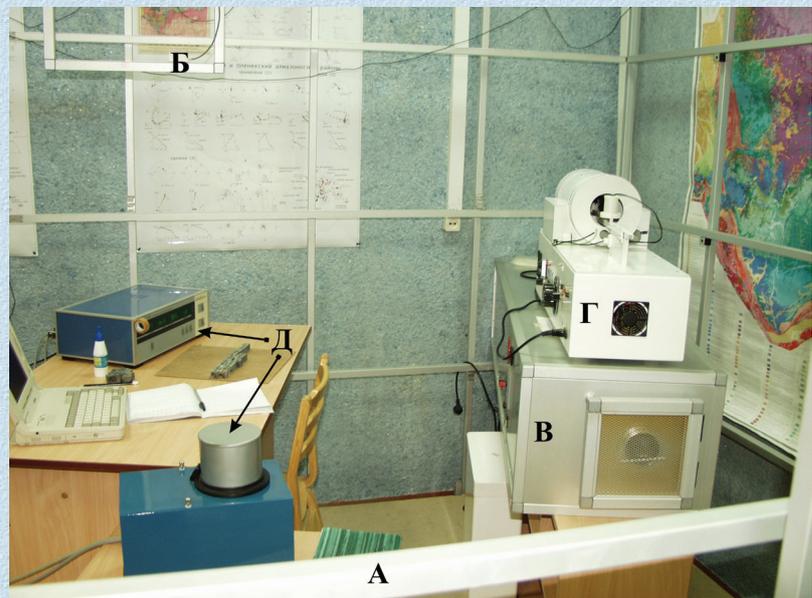
$$I_n = I_n^0 + I_n^m + \dots + I_n^N,$$

которые несут определённую информацию о сформировавшихся их геологических процессах.

Любая из вышеперечисленных компонент может быть выделена из сум-

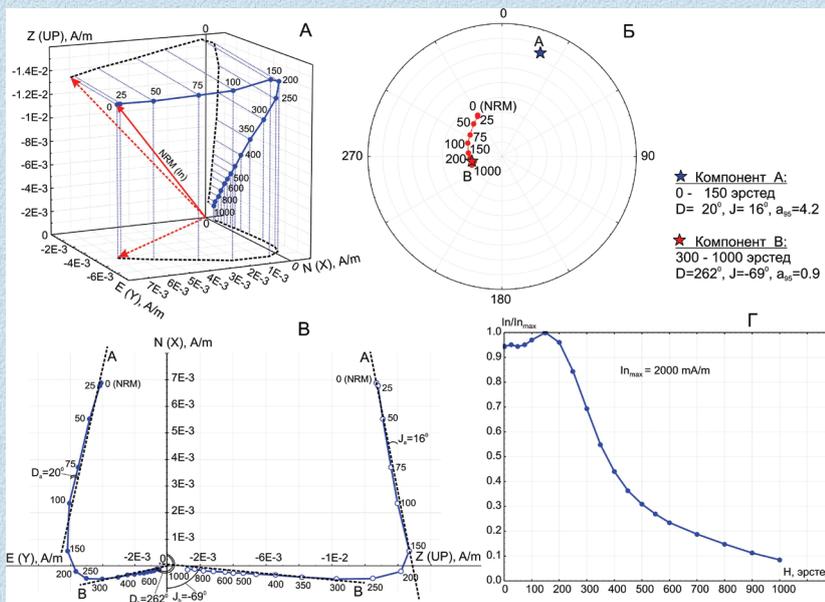
марной многокомпонентной естественной остаточной намагниченности горных пород в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой (рис. 1) [1]. Считается, что  $I_n^0$  является самой магнито-жесткой (высококоэрцитивной и высокотемпературной) компонентой по отношению к другим её видам. Не исключено, что магнитная запись горных пород о событиях далёкого прошлого может быть забита или полностью стёрта другими видами намагниченности, связанными с более поздними физико-химическими или геологическими процессами. Компоненты вектора  $I_n$ , которые претендуют на последующее получение палеомагнитного результата (т.е. могут оказаться синхронным изучаемому геологическому событию прошлого), принято обозначать как характеристические ( $I_n^{ch}$ ) [6]. Доказательство природы той или иной  $I_n^{ch}$  основывается на комплексе специальных тестов (складки, обжига, галек, обращения).

По выделенным группировкам векторов  $I_n^{ch}$  (рис. 2, Б) рассчитываются виртуальные палеомагнитные полюсы. Осреднённые для определённой геологической эпохи они образуют траекторию кажущейся миграции палеомагнитного полюса. Подобная траектория является удобной формой компактного представления палеомагнитных данных по каждому литосферному блоку и составляет количественную основу для решения широкого круга научных и прикладных геолого-геофизических задач. Например, на её основе восстановлены палеогеографические положения Сибирской платформы в фанерозое. За это время она переместилась при-



**Рис. 1. Палеомагнитный комплекс Амакинской геологоразведочной экспедиции АК «АПРОСА» (г. Айхал).**

**А – комната «магнитного вакуума»; Б – феррозонд обратной связи; В – установка по размагничиванию температурой MMTD80 (Magnetic Measurements LTD, Канада); Г – установка по размагничиванию переменным магнитным полем AF-DEMAGNETIZER (Molspin LTD, Великобритания); Д – магнитометр GR-5a (AGICO, Чехия).**



**Рис. 2. Компонентный анализ вектора естественной остаточной намагниченности (NRM,  $I_n$ ) долеритов Алакитского силла по результатам размагничивания переменным магнитным полем  $\dot{H}$ . А – аксонометрическое изображение  $I_n$ . Б – стереографическая проекция: красные (синие) фигурки – проекции вектора  $I_n$  на отрицательную (положительную) полушару; цифры – величина  $\dot{H}$ ; звёздочки – компоненты  $I_n$ , соответственно, низкокоэрцитивная (вязкая  $I_{nv}$ ) А и высококоэрцитивная (возможно первичная  $I_n^0$ ) В. В – диаграмма Зийдверельда: закрашенные и прозрачные кружочки – проекции  $I_n$  на плоскости, соответственно,  $HOY$  и  $HOZ$ ; цифры – величина  $\dot{H}$ ; пунктирные линии – направления компонент А и В. Г – график размагничивания  $I_n$  от  $\dot{H}$ , нормированный по  $I_n(\max)$ .**

мерно на  $150^\circ$  из низких экваториальных широт Южного полушария в северные полярные широты, а её юго-восточный (в современных географических координатах) край являлся фронтальным. Благодаря палеомагнитным данным проведён анализ геодинамических реконструкций развития Восточной Сибири и размещения в её пределах экзогенных месторождений [4, 5].

С помощью сопоставления палеомагнитных полюсов, полученных по немым геологическим процессам (магматизм, тектогенез и т.п.), решаются вопросы определения их возраста и корреляции. Например, палеомагнитное (полюсное) датирование кимберлитов и траппов Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) устанавливает время их внедрения в интервале от 420 до 230 млн лет [7], что не противоречит геологическим и геохронологическим данным [8]. Возможно, процессы кимберлитово- и траппообразования связаны с прохождением Сибирской платформы над горячими точками [9].

Особенно актуальными становятся петромагнитные данные при поисках грави- и магниторазведкой коренных месторождений алмазов на закрытых траппами территориях Якутской алмазоносной провинции (4 – 5-е геотипы). Сложность поведения современной намагниченности в пермотриасовых траппах восточного борта Тунгусской синеклизы определяют следующие обстоятельства:

1) многостадийность траппового магматизма во времени и его гипсометрическая приуроченность (в схеме развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы выделяют три фазы: I – интрузивную  $\gamma\beta P_2$ , II – вулканно-субвулканическую  $\beta_0-\gamma\beta P_2-T_1$  и III – интрузивную  $\gamma\beta T_1$  [10];

2) многообразии форм проявления, изменчивости химического и петрографического составов, в результате чего траппы образуют несколько самостоятельных петромагнитных групп [11];

3) высокоширотные палеогеографическое и современное положения Сибирской платформы;

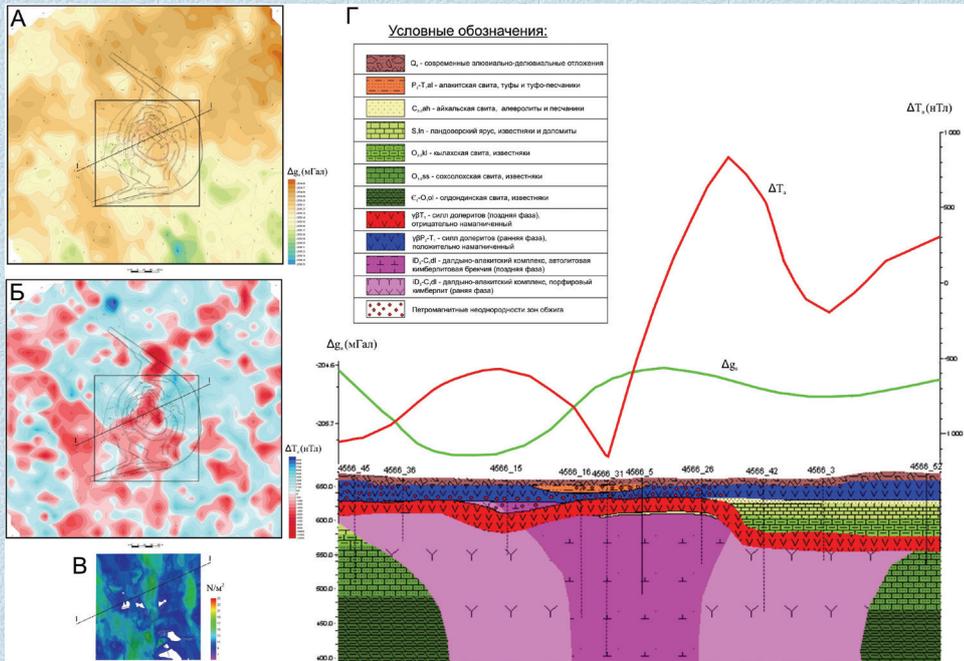
4) инверсии магнитного поля Земли в момент формирования векторов первичной  $I_n^0$ .

За последнее время получены уникальные материалы по петромагнетизму траппов. Во-первых, распределение векторов  $I_n$ , суммарной намагниченности  $I = I_n + I_i$  (где вектор индуктивной намагниченности  $I_i = \alpha \cdot H$ ;  $\alpha$  – магнитная восприимчивость) и коэффициента Кенигсбергера ( $Q = I_n/I_i$ ) не хаотично, а подчиняется строгим статистическим закономерностям, знание которых помогает решению обратной задачи магниторазведки по разработке петромагнитных моделей кимберлитовых трубок и разделению магнитных полей в пределах траппонасыщенных площадей [12].

Во-вторых, установлены два типа петромагнитных неоднородностей – таксонов, не имеющих геологической природы [13]. К первому типу принадлежат долериты третьей фазы  $\gamma\beta T_1$ . Своему существованию они обязаны вязкой намагниченности  $I_{nv}$  – перемагничивание обратно намагниченных траппов за время «жизни» (250 млн лет) современным положительным магнитным полем Земли. Ко второму типу относятся эндоконтактные зоны траппов ранних фаз внедрения, испытавших перемагничивание со стороны долеритов третьей фазы без геологических (зоны закалки, ксенолиты), петрохимических, минералогических и других видимых изменений. Различия от исходных параметров устанавливаются только на уровне доменного строения титаномагнетитов [14]. Основную роль в формировании петромагнитных неоднородностей второго типа играет метакоррозивная намагниченность  $I_n^m$ .

Петромагнитные неоднородности траппов в магнитном отношении являются «прозрачными» для обнаружения под ними кимберлитовых трубок, так как вектора  $I$  имеют субгоризонтальные наклоны  $\pm 10^\circ$  [13]. В зонах повышенной трещиноватости терригенно-карбонатного цоколя, окружающего кимберлитовую

трубку, возможны переходы долеритов третьей фазы на более высокие горизонты. Это, во-первых, отразится на увеличении гравитационного поля, а во-вторых, вызовет сильные отрицательные магнитные аномалии за счёт петромагнитных неоднородностей двух типов (рис. 3) [14].



**Рис. 3. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов на трубке «Комсомольская» (Западная Якутия). Карты аномальных полей: гравитационного (А) и магнитного (Б); В – распределение параметра плотности трещин (N) на 1 м<sup>2</sup> (показано распределение изолиний, начиная с величины 10,0 трещин/м<sup>2</sup>); Г – геолого-геофизический разрез по линии I-I.**

В настоящее время продолжают исследования по расширению круга прикладных геолого-геофизических задач, решаемых с помощью петромагнетизма горных пород.

**Список литературы**

1. Храмов, А. Н. Палеомагнитология / А. Н. Храмов, Г. И. Гончаров. – Л. : Недра, 1982. – 312 с.
2. Храмов, А. Н. Стандартные ряды палеомагнитных полюсов для плит северной Евразии : связь с проблемами палеогеодинамики территории СССР / А. Н. Храмов. – Л. : ВНИГРИ, 1991. – 125 с.
3. Вегенер, А. Происхождение материков и океанов / А. Вегенер. – Л. : Наука, 1984. – 277 с.
4. Кравчинский, А. Я. Палеомагнетизм и палеогеографическая эволюция континентов / А. Я. Кравчинский. – Новосибирск : Наука, 1979. – 264 с.
5. Scotese, C. R. Revised World maps and introduction / C. R. Scotese, W. S. McKerrow // Paleozoic Paleogeography and Biogeography // Memoir № 12, Published by the Geological Society. – London. – 1990. – P. 1–21.

6. Zijdeveld, J. D. A. Demagnetization of rocks, analysis of results / J. D. A. Zijdeveld // Methods in paleomagnetism. – Amsterdam, 1967. – P. 254–286.

7. Константинов, К. М. Возраст естественной остаточной намагниченности кимберлитов Якутской алмазносной провинции / К. М. Константинов // Наука и образование. – 2010. – № 1 (57). – С. 47–54.

8. Брахфогель, Ф. Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы / Ф. Ф. Брахфогель. – Якутск : СО АН СССР, 1984. – 128 с.

9. Kuzmin, M. I. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province / M. I. Kuzmin, V. V. Yarmolyuk, V. A. Kravchinsky // Earth-Science Reviews. – 2010. – 102. – P. 29–59.

10. Томшин, М. Д. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы / М. Д. Томшин, М. И. Лелюх и др. // Отечественная геология. – 2001. – № 5. – С. 19–24.

11. Мишенин, С. Г. Петромагнетизм трапповых пород северо-востока Тунгусской синеклизы / С. Г. Мишенин // Дисс. на соиск. уч. ст. к.г.-м.н. – Казань, 2002. – 192 с.

12. Константинов, К. М. Распределение векторов естественной намагниченности пермотриасовых траппов Далдыно-Алакитского алмазносного района / К. М. Константинов, С. Г. Мишенин и др. // Геофизика. – 2004. – № 1. – С. 49–53.

13. Константинов, К. М. Петрофизическая модель кимберлитовой трубки «Комсомольская» / К. М. Константинов, Н. В. Иванюшин и др. // Геофизика. – 2004. – № 6. – С. 50–53.

14. Константинов, К. М. Петромагнитные неоднородности зон обжига пермотриасовых траппов месторождения трубки «Комсомольская» (Якутская алмазносная провинция) / К. М. Константинов, А. С. Гладков // Доклады АН. – 2009. – Т. 427, № 2. – С. 245–252.