

## О природе магнитных аномалий над телами рудных габброидов Коростенского плутона (Украинский щит)

© М. С. Зейгельман, Т. А. Михеева, Н. В. Панченко, 2011

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 19 февраля 2009 г.

Представлено членом редколлегии М. И. Орлюком

Розглянуто методику та результати інтерпретації магнітних аномалій над тілами рудних габброїдів Коростенського плутону. Описано методику інтерпретації на прикладі двох об'єктів, збагачених фосфатно-титановою рудною мінералізацією. Побудовано моделі магнітоактивних джерел, наведено їх геологічне тлумачення. Сформовано низку висновків щодо зональної структури габброїдів, особливостей їхньої намагніченості, структури магнітних аномалій та їх можливих джерел.

The technique and results of interpretation of magnetic anomalies above the bodies of ore gabbroides of the Korosten pluton are considered. The technique of interpretation is shown by the example of two objects enriched with phosphate-titanium mineralization. Models of magnetoactive sources have been constructed, their geological interpretation has been given. Some considerations concerning zonal structure of gabbroides, special features of their magnetization, structure of magnetic anomalies and their possible sources has been formulated.

**1. Постановка задачи; выбор подходов к ее решению.** В пределах Коростенского и Корсунь-Новомиргородского плутонов и их обрамления выявлен ряд коренных месторождений и проявлений апатит-ильменитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд, которые пространственно и генетически связаны с телами габброидов [Егоров и др., 1989; Кривдик та ін., 2008; Проскурин, 1984; Борисенко и др., 1979; Тарасенко, Панских, 1982; Тарасенко, 1988]. В последнее время, в связи с истощением запасов рассыпных и остаточных (в коре выветривания) месторождений ильменита, усилился интерес к промышленной разработке коренных титаноносных залежей, которая может быть рентабельной при их комплексном использовании — извлечении ряда сопутствующих титану элементов [Галецкий та ін., 2007; Галецкий, Ремезова, 2007]. При поисках новых коренных залежей и уточнении характера распределения рудной минерализации в уже выявленных особую внимания заслуживают вопросы количественной ин-

терпретации и истолкования гравитационных и магнитных аномалий над телами рудных габброидов.

Интерпретация магнитных аномалий над телами и массивами габброидов, в особенности теми, которые вмещают рудную минерализацию, представляет собой достаточно сложную задачу. Над такими объектами зачастую наблюдаются сложно построенные сообщества (ансамбли) аномалий, которым свойственны резко дифференцированный характер, многокомпонентный состав, присутствие возмущений положительного и отрицательного знака, быстрая изменчивость величины и направления намагниченности в различных участках тел габброидов. При интерпретации таких аномалий осложнения возникают уже на этапе их предварительного (качественного) истолкования, не говоря уже о построении моделей магнитоактивных источников. В то же время решение таких задач представляет значительный интерес для практики — формирования суждений относительно: внутрен-

ней структуры тел габброидов, характера их постмагматического изменения, особенностей распределения рудной минерализации, информативности магнитных аномалий при поисках титаноносных залежей и т. д.

Исходя из практического опыта, представляется перспективным идти по пути выделения типовых интерпретационных ситуаций и разработки адаптированных к ним приемов и технологии решения обратных задач. Ранее уже рассматривались особенности и результаты интерпретации магнитных аномалий над линейно вытянутым телом габбро-диабазов, которое в геологической литературе именуется Звиздаль-Залесской дайкой [Зейгельман, 1981]. К сожалению, тогда не удалось (из-за отсутствия достаточного объема априорных данных) сформировать достаточно представительные модели магнитоактивных источников. В настоящей статье рассматривается другая, не менее сложная и интересная (в познавательном смысле) ситуация, с которой пришлось встретиться в ходе интерпретации магнитных аномалий над Стремигородским и Кропивенским телами рудных габброидов. Последние, согласно воззрениям геологов, относятся к классу малых интрузий, внедрившихся на заключительных этапах становления Коростенского плутона [Кривдик та ін., 2008].

Над указанными объектами наблюдаются весьма своеобразные и сложные по структуре магнитные аномалии, которые исключают возможность использования упрощенных подходов к их количественной интерпретации. Поскольку эти объекты обогащены густо-вкрапленным оруденением ильменита и апатита, они детально изучены поисково-разведочным бурением, в ходе которого проведены многочисленные измерения магнитных свойств керна скважин. Изложенное позволяет рассматривать Стремигородское и Кропивенское тела рудных габброидов совместно с наблюдаемыми над ними аномалиями гравитационного и магнитного полей как удобные эталонные объекты, на примере которых представляется возможность отработать для такого типа геологических образований методику построения моделей магнитоактивных источников.

Особенностью тел габброидов, выделяющей их среди других геологических образований, является резко выраженная неоднородность их намагниченности [Глевасская, Кравченко, 1979; Михайлова, Глевасская, 1965]. Согласно

данным измерений магнитных свойств керна скважин, пробуренных в габброидах Стремигородского и Кропивенского участков, величина намагниченности в расположенных рядом (соседних) точках скважин может отличаться в десять и более раз. В связи с неоднородностью намагниченности следует различать два следующих понятия. Первое — это совокупность (множество) векторов намагниченности, характеризующих элементарные объемы возмущающего тела (локальная неоднородность намагниченности). Для суждения о локальной неоднородности можно использовать данные измерения магнитных свойств керна скважин. Второе понятие — это эффективная намагниченность крупных блоков (сегментов) тела, которая характеризует их в целом; векторы эффективной намагниченности определяются в процессе интерпретации магнитных аномалий (решения обратных задач).

Для обеспечения устойчивости решения обратных задач при построении моделей магнитоактивных источников обычно приходится абстрагироваться от локальных изменений намагниченности внутри сегментов (блоков); каждый из них характеризуется некоторой средней величиной — вектором эффективной намагниченности. Последние приходится определять в ходе решения обратных задач — они входят в число искомым (свободно варьируемых) параметров модели; возникает необходимость решения нелинейных обратных задач. Одним из ключевых моментов, предопределяющих успех количественной интерпретации, становится удачный выбор подходящей качественной структуры модели — выделение в составе тел габброидов блоков с более или менее однотипным, в том числе и по геологической природе, характером намагниченности.

В качестве исходных данных для количественной интерпретации использовались: планы изодинам аномального магнитного и гравитационного полей М 1 : 10 000; план-схемы и разрезы геологического строения тел рудных габброидов; данные измерений магнитных и плотностных свойств пород, измеренные на образцах керна буровых скважин. Указанные материалы были заимствованы из отчетов производственных организаций и литературных источников. В ходе интерпретации гравитационных и магнитных аномалий Стремигородского и Кропивенского участков использовались алгоритмы автоматизированного подбора на ЭВМ [Булах и др., 1986]; были

построены модели магнитоактивных источников и плотностные модели (по полю  $\Delta g$ ). В настоящей статье основное внимание акцентируется на моделях магнитоактивных источников; особенности процесса построения моделей и использованные для этого методические приемы рассмотрим на конкретных примерах.

**2. Стремигородский участок. 2.1. Характеристика геолого-геофизической обстановки.** Участок расположен в южной части Чеповичского массива габбро-анортозитов (Коростенский pluton). Объектом изучения явля-

лось тело габброидов, содержащее апатит-ильменитовое оруденение. В плане, на уровне эрозионного среза, тело имеет форму овала (диаметр порядка 900 м), несколько вытянутого в юго-восточном направлении (рис. 1). На глубину прослежено скважинами до 1400 м. В разрезе форма тела воронкообразная; с глубиной, вероятно, переходящая в дайку; контакты с вмещающими габбро-анортозитами резкие, падение крутое. Мощность рыхлых отложений не превышает 40 м.

Тело габброидов характеризует четко выраженное концентрически-зональное строение:

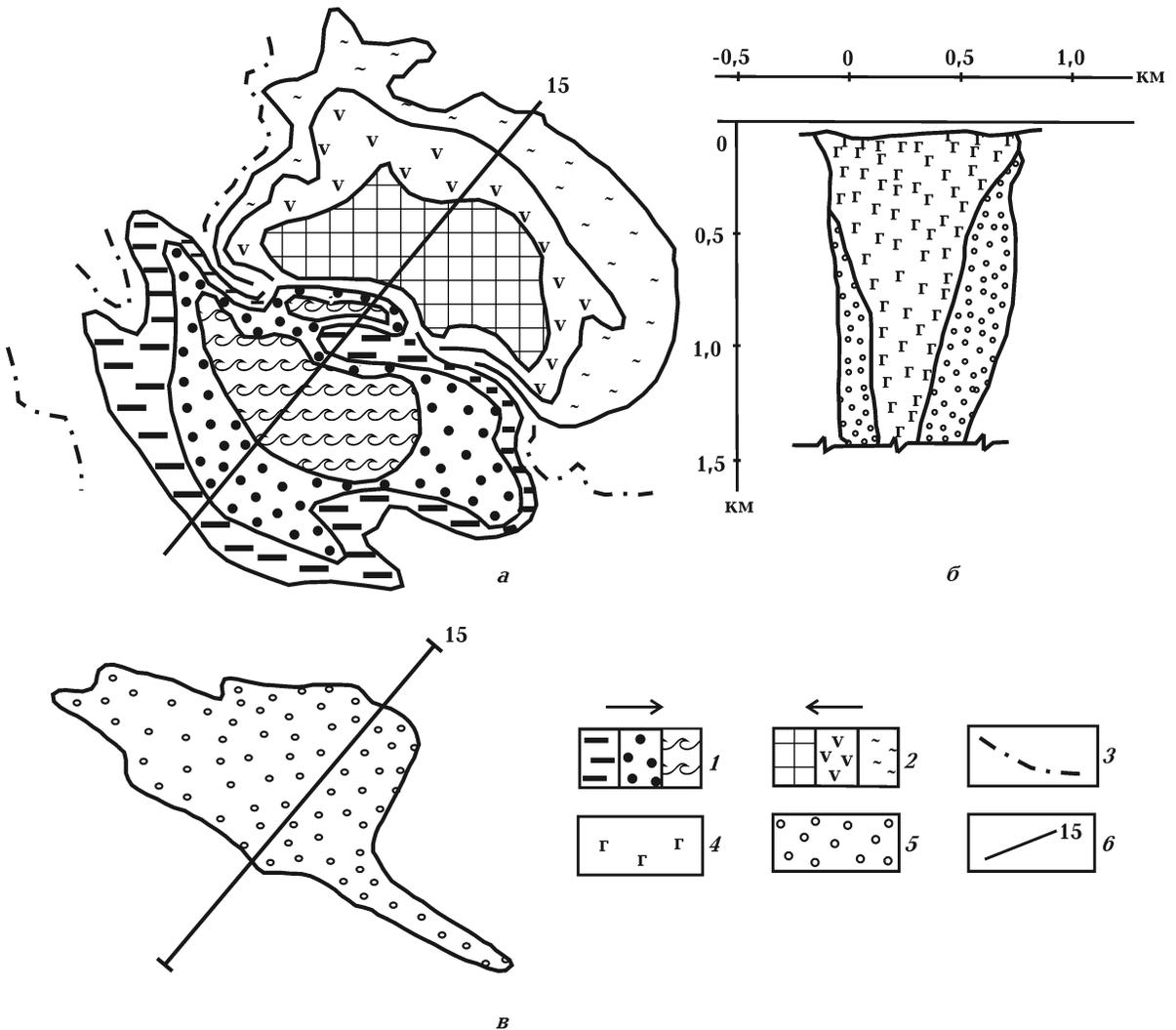


Рис. 1. Стремигородский участок: *а* — схема структуры магнитных аномалий; *б*, *в* — контуры тела габброидов (*б* — вертикальное сечение (вдоль профиля 15), *в* — план (на уровне эрозионного среза)); 1, 2 — обширные положительный (1) и отрицательный (2) максимумы поля  $\Delta Z$  (стрелками обозначено направление возрастания положительных и отрицательных значений напряженности поля); 3 — нулевая изодинама поля  $\Delta Z$ ; 4, 5 — тело габброидов (4 — меланократовые габброиды, 5 — лейкократовая оторочка); 6 — положение профиля интерпретации.

от периферии к центру и от глубинных горизонтов к поверхности увеличивается меланократовость пород — лейкократовые габброиды последовательно сменяются мезократовыми (оливин-пироксеновые габбро, трактолиты) и далее меланократовыми (меланотрактолиты, плагиоклазовые перидотиты). В этом же направлении возрастает содержание темноцветных и рудных минералов. Более подробные сведения о строении тела габброидов, составе слагающих его пород, характере распределения рудной минерализации приведены в литературе [Проскурин, 1984; Борисенко и др., 1979; Тарасенко, Панских, 1982].

Над телом габброидов наблюдаются контрастные аномалии магнитного поля. Среди окружающих габбро-анортозитов его выделяет группа (ансамбль) аномалий, которая замкнута в пределах овальной (близкой к изометричной) области; в первую очередь здесь обращают на себя внимание интенсивный максимум (до 15 000 нТл) и сопряженный с ним минимум поля (до 9000 нТл) (рис. 1, а). В структуре аномалий четко проявляются элементы центрально-симметричной (кольцевой) зональности. На северо-западном и юго-восточном флангах тела форма изоаномал  $\Delta Z$  осложнена рядом линейных выступов-отростков, ориентированных в северо-западном направлении.

**2.2. Особенности процесса построения моделей.** Для построения моделей был выбран профиль 15 (см. рис. 1), который отображает наиболее существенные особенности поведения магнитных аномалий, обусловленные крупными сегментами тела габброидов и который, по возможности, наименее искажен воздействием локальных неоднородностей магнитного поля. Одной из примечательных особенностей магнитных аномалий на этом профиле является присутствие двух интенсивных, сопряженных друг с другом положительного максимума и отрицательного минимума, которые сдвинуты относительно эпипцентра тела габброидов к его краевым зонам (рис. 2). Если бы отсутствовали априорные геологические данные, то можно было бы предположить, что наблюдаемые аномалии обусловлены группой соседствующих друг с другом намагниченных тел, тогда как данные бурения не оставляют сомнения, что они принадлежат одному и тому же телу габброидов и представляют одну сложно построенную аномалию.

Ввиду необычного характера подбираемой аномалии существенные осложнения возник-

ли при выборе подходящей качественной структуры модели — начального приближения для автоматизированного подбора. Для наблюдаемой аномалии не удалось найти аналог среди известных в литературе теоретических моделей. Не привела к успеху попытка подобрать поле на основе модели, представленной одно-

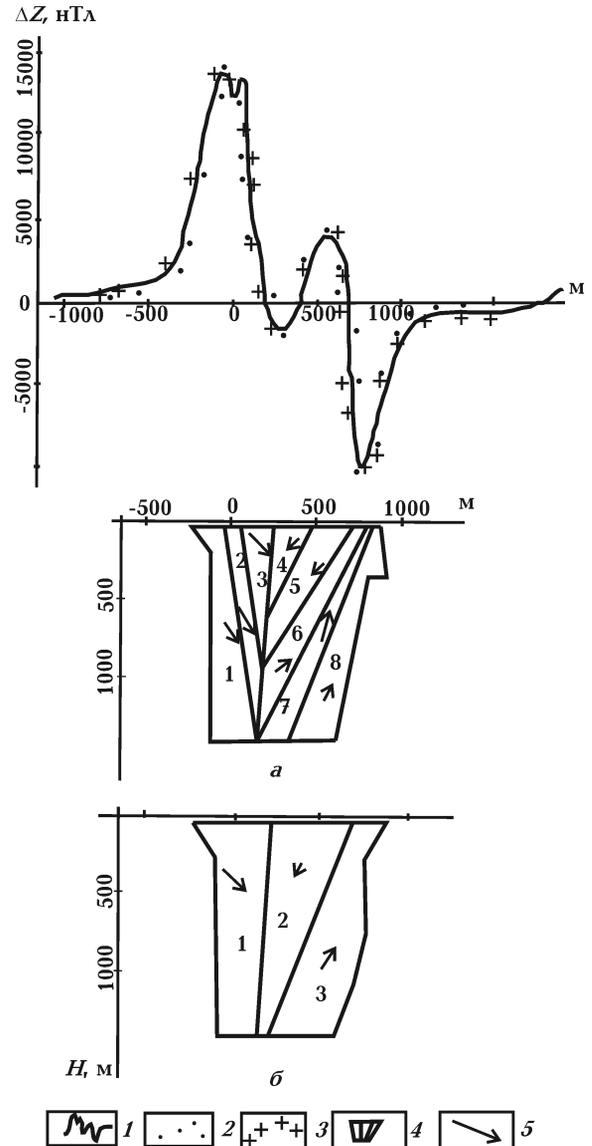


Рис. 2. Стремигородский участок, результаты интерпретации магнитной аномалии (профиль 15). Модель распределения магнитоактивных источников: а — вариант 8, б — вариант 10; 1 — наблюдаемая аномалия  $\Delta Z$ ; 2, 3 — аномалии, рассчитанные от подобранных вариантов модели (2 — вариант 8, 3 — вариант 10); 4 — контуры сегментов модели; 5 — направление векторов эффективной намагниченности.

связным контуром. В процессе поиска подходящей структуры был опробован ряд подходов: декомпозиция поля на несколько элементарных аномалий, соответствующих известным классам теоретических моделей; синтез структуры по частям и т. д. Однако все это не привело к положительным результатам.

Стало очевидным, что основным особенностям наблюдаемого поля можно удовлетворить только на основе использования сложной многосвязной модели, которая составлена из набора сегментов (односвязных контуров) и отображает, помимо внешней конфигурации объекта, также и особенности его внутренней структуры. При поиске подходящей структуры весьма полезной оказалась схема зональности, построенная по данным каротажа скважин (производственный отчет Житомирской экспедиции; авторы Ровинский, Гринин, 1981). Именно эта схема в качестве априорной информации послужила той отправной точкой, которая помогла авторам сформировать подходящую структуру модели и на ее основе подобрать распределение источников, удовлетворяющее основным особенностям наблюдаемой аномалии.

Для автоматизированного подбора магнитоактивных источников было сформировано начальное приближение в виде аппроксимирующей конструкции, составленное из набора сегментов (блоков), отличающихся намагниченностью. Многолетний опыт авторов по построению моделей магнитоактивных тел [Зейгельман, 1981 и др.] свидетельствует о серьезных методических трудностях и сильной неустойчивости, которые возникают при совместном подборе геометрии и намагниченности многосвязных моделей<sup>1</sup>. Для уменьшения неоднозначности задача автоматизированного подбора ставилась в следующей (квазилинейной) постановке: при подборе (по данным бурения и плотностных моделей) закреплялось положение внешнего контура тела; в процессе расчетов определялись значения компонент намагниченности сегментов и положение их внутренних границ.

Задача построения моделей решалась на основе ее декомпозиции на две частные под-

задачи (процедуры): определение величины и направления векторов эффективной намагниченности сегментов модели; корректировка положения границ сегментов. Она решалась в режиме последовательных приближений. На первом этапе построения модели, удовлетворительное качество подбора наблюдаемого поля было достигнуто на базе аппроксимирующей конструкции, составленной из восьми сегментов (см. рис. 2). При анализе таких вариантов наметилась возможность упрощения геометрии модели — уменьшения числа сегментов: были заданы соответствующие начальные приближения, представленная конструкцией из трех сегментов, которые обеспечили качество подбора с точностью, не намного уступающей вариантам из восьми сегментов.

Представленные на рис. 2 варианты модели, несмотря на различное число сегментов, отображают одни и те же особенности распределения магнитоактивных источников. Характер расположения сегментов и направления векторов намагниченности в них подчеркивает концентрически-зональное строение тела рудных габброидов, создается впечатление о наличии элементов расслоенности ("псевдослоистости") внутри объекта, конформной расположению боковых контактов тела габброидов.

На моделях показаны векторы эффективной намагниченности, характеризующие каждый из сегментов. У левого (юго-западного) края тела располагаются сегменты с прямой полярностью намагниченности (согласуется с направлением современного геомагнитного поля Земли), у правого (северо-восточного) края — с обратной. В краевых (периферийных) сегментах векторы намагниченности имеют крутое падение, в центральной части модели — более пологое. Интенсивность (модуль) векторов намагниченности в краевых сегментах соизмерима с данными замеров на образцах керна буровых скважин, в центральной же части модели она занижена примерно в два раза. Значения компонент  $I_x$ ,  $I_z$  векторов эффективной намагниченности приведены в табл. 1.

**3. Кропивенский участок. 3.1. Характеристика геолого-геофизической обстановки.** Участок расположен в пределах Володарск-Волынского массива габбро-анортозитов (Коростенский плутон). Объектом изучения было тело габброидов, обогащенное минерализацией ильменита и апатита. Геологичес-

<sup>1</sup> Затруднения, которые возникают при совместном поиске физических и геометрических параметров намагниченного тела, отмечались в работе [Завойский, Неижсал, 1979], где предложен декомпозиционно-итерационный метод решения обратной задачи.

**Т а б л и ц а 1.** Стремигородское тело рудных габброидов, профиль 15; значения компонент  $I_x$ ,  $I_z$  векторов эффективной намагниченности сегментов модели, А/м (см. рис. 2)

Номер варианта модели	Компонента	Номера сегментов модели							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Вариант 8	$I_x$	16,8	20,63	26,2	-12,4	-12,0	15,9	9,7	11,5
	$I_z$	23,1	34,0	24,6	9,2	10,6	-14,9	-32,0	-16,0
Вариант 13	$I_x$	25,8	-10,1	17,9	—	—	—	—	—
	$I_z$	25,0	10,8	-20,2	—	—	—	—	—

кое строение и физические свойства пород участка изучены при бурении скважин глубиной 100—300 м [Егорова и др., 1992]. В плане тело имеет овальную форму (рис. 3), поперечное сечение (на уровне эрозионного среза) порядка 1200 м. Падение контактов пологое, центроклинальное; в вертикальных сечениях форма тела близка к чашеобразной; глубина погружения подошвы до 0,3 км. Мощность рыхлых отложений порядка 10—25 м.

Тело габброидов имеет зональное строение. Схематически эту зональность можно охарактеризовать следующим образом: у поверхности эрозионного среза преобладают наиболее меланократовые разности — перидотиты и габбро-перидотиты, по латерали к центру тела и на глубину они переходят в меланократовые габбро и далее в габбро мезо- и лейкократовое. Такой характер зональности осложняется за счет частого переслаивания мелано-, мезо- и лейкократовых разностей, и их асимметричного расположения в плане — перидотиты и габбро-перидотиты тяготеют к юго-западному сегменту тела, а лейкократовые габбро — к его северо-западному и северо-восточному краям. Контакты тела габброидов с вмещающими анортозитами резкие, интрузивные. Оруденение вкрапленное, представлено ильменитом, титаномagnetитом и апатитом. Наиболее обогащена рудной минерализацией центральная часть тела. Более подробная характеристика геологической обстановки приведена в работе [Галецкий, Ремезова, 2007].

В магнитном поле телу габброидов соответствует сложно построенный ансамбль аномалий положительного и отрицательного знака, замкнутый в пределах овальной структуры (рис. 3, а). По морфологии среди этих аномалий можно выделить два типа. Первый пред-

ставлен аномалиями с широкими уплощенными вершинами, которые в плане накрывают крупные части тела: юго-западную (положительная аномалия интенсивностью до 2000 нТл) и северо-восточную (аномалия отрицательного знака с примерно той же интенсивностью). Ко второму типу можно отнести многочисленные локальные положительные (до 1200 нТл) и отрицательные (до 2000 нТл) аномалии с узкими крутыми вершинами, которые обусловлены источниками небольшой горизонтальной мощности. Магнитные характеристики пород участка рассмотрены в работе [Егорова и др., 1992]. Повышенной магнитной восприимчивостью и остаточной намагниченностью обладают меланократовые габброиды (перидотиты, габбро-перидотиты).

**3.2. Особенности процесса построения моделей.** В качестве базового для расчетов был выбран профиль III (см. рис. 3), достаточно представительный в отношении аномалий первого типа, связанных с крупными сегментами тела, и в то же время в меньшей степени осложненный помехами от локальных источников. В соответствии с опытом решения аналогичной задачи на Стремигородском участке для расчетов была задана концентрически-зональная структура модели — в виде сложной (многосвязной) аппроксимирующей конструкции, составленной из набора блоков-сегментов (односвязных контуров). Положение внешних границ возмущающего тела закреплялось по данным бурения и ранее построенных плотностных моделей. Процесс поиска подходящих вариантов модели был организован в соответствии с технологией, описанной выше для Стремигородского участка. В результате были получены варианты решений, обеспечивающие хорошее приближение наблюдаемого поля по все-

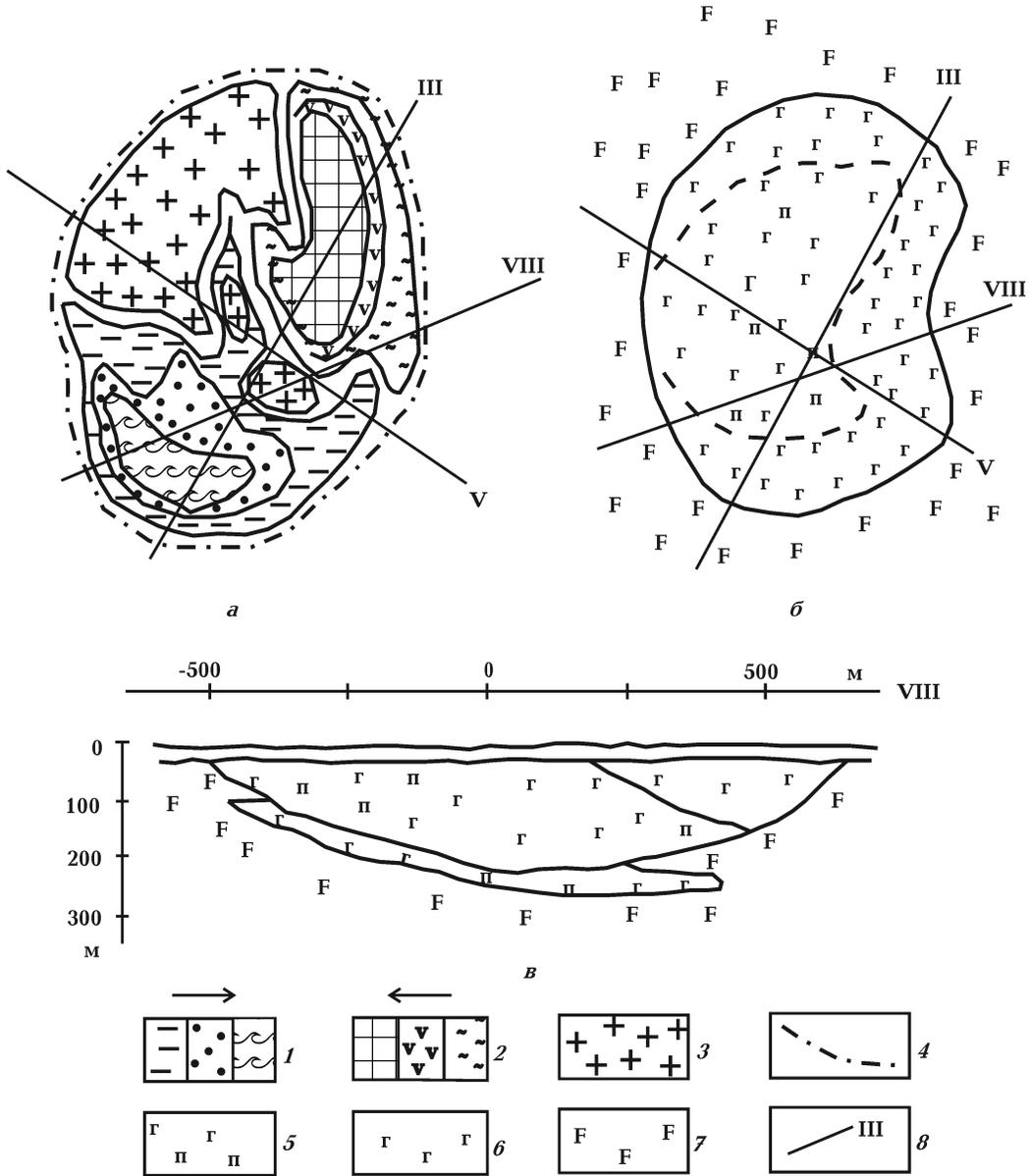


Рис. 3. Кропивенский участок: *a* — схема структуры магнитных аномалий; *б, в* — контуры тела габброидов (*б* — план (на уровне эрозионного среза), *в* — вертикальное сечение); 1, 2 — обширные положительный (1) и отрицательный (2) максимумы поля  $\Delta Z$  (стрелками обозначено направление возрастания положительных и отрицательных значений напряженности поля); 3 — области расположения локальных аномалий; 4 — границы расположения аномалий, обусловленных телом габброидов; 5 — перидотиты, габбро-перидотиты; 6 — габбро; 7 — анортозиты, габбро-анортозиты; 8 — положение профиля интерпретации.

му периметру аномалии, включая и ее фланги; два из них представлены на рис. 4. Значения  $I_x, I_z$  векторов эффективной намагниченности приведены в табл. 2.

Найденные в процессе автоматизированного подбора варианты распределения магнитоактивных источников следует рассматривать как допустимые решения обратной задачи. Из-за

проявления практической эквивалентности эти варианты отличаются друг от друга в деталях, но при этом отображают одни и те же принципиальные особенности внутреннего строения тел габброидов (концентрически-зональная структура, близкое к горизонтальному направление векторов намагниченности и т. д.). Нет необходимости рассматривать эти особеннос-

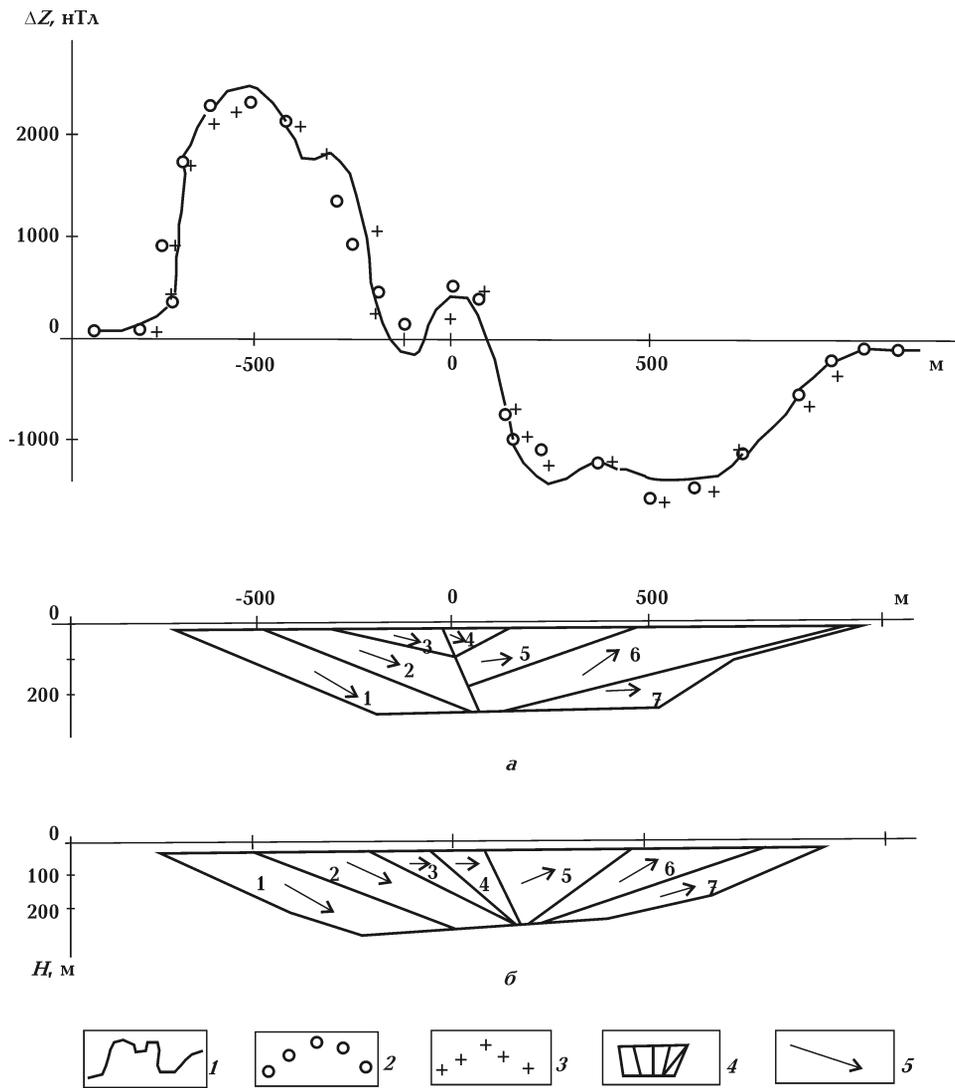


Рис. 4. Кропивенский участок, результаты интерпретации магнитной аномалии (профиль III). Модель распределения магнитоактивных источников: а — вариант 10, б — вариант 13; 1 — наблюдаемая аномалия  $\Delta Z$ ; 2, 3 — аномалии, рассчитанные от подобранных вариантов модели (2 — вариант 10, 3 — вариант 13); 4 — контуры сегментов модели; 5 — направление векторов эффективной намагниченности.

**Т а б л и ц а 2. Кропивенское тело рудных габброидов, профиль III; значения компонент  $I_x$ ,  $I_z$  векторов эффективной намагниченности сегментов модели, А/м (см. рис. 4)**

Номер варианта модели	Компонента	Номера сегментов модели						
		1	2	3	4	5	6	7
Вариант 10	$I_x$	8,6	8,0	4,3	2,9	7,4	6,9	4,7
	$I_z$	5,1	3,2	-1,0	1,3	-0,5	-4,3	-0,2
Вариант 13	$I_x$	9,3	8,7	3,2	3,3	7,1	7,3	4,4
	$I_z$	4,5	4,0	0,3	0,3	-2,6	-4,8	-0,6

ти детально, поскольку для них справедливы замечания, изложенные выше для Стремигородского участка, естественно, с поправкой на чашеобразную форму Кропивенского тела.

**4. Результаты интерпретации, их геологическое истолкование. 4.1. Зональная структура моделей.** Одной из наиболее примечательных особенностей построенных моделей магнитоактивных источников является их зональная структура. Построенные модели дают сугубо приближенное, схематизированное, но в то же время наглядное представление о принципиальных особенностях зональности габброидов. Несмотря на различие формы двух рассматриваемых тел габброидов (Стремигородского и Кропивенского), их зональные структуры подобны друг другу. В этом плане следует отметить: веерообразное расхождение зон от подошвы тел к их поверхности; симметричное расположение зон (сегментов модели) относительно осевой линии в центральной части объектов и т. д. (см. рис. 2, 4). Такой тип зональности будем называть V-образным; обычно он свойственен синформным структурам.

Характер зональной структуры и особенности ее проявления в телах рудных габброидов рассмотрен в литературе [Проскурин, 1984; Борисенко и др., 1979; Тарасенко, Панских, 1982]. В большинстве опубликованных работ образование зональной структуры трактуется как обусловленное процессами кристаллизационной дифференциации (фракционирования) магматического расплава<sup>2</sup>.

Характер зональной структуры в значительной мере зависит от формы тел габброидов, что находит отображение в расположении границ сегментов модели и соответствующей направленности векторов эффективной намагниченности. Для Стремигородского тела — в соответствии с его воронкоподобной формой — векторы имеют крутые углы падения; для Кропивенского они более пологие, конформные его чашеобразной конфигурации. Такая согласованность едва ли является случайной, она свидетельствует в пользу представлений о значительной роли пульсирующих тектонических напряжений (вибрационной тектоники [Галецкий, Ремезова, 2007]) в процессе формирова-

ния зональной структуры. Характер распределения тектонических напряжений в значительной мере определяется конфигурацией камеры, в которой проходила кристаллизационная дифференциация магматического расплава. В процессе действия пульсирующих напряжений возникла соответствующая форме магматической камеры зональная структура и взаимосвязанная с ней система ослабленных поверхностей, которые определили расположение направлений "легкого" намагничивания — преобладающую ориентацию векторов остаточной намагниченности. Габброиды приобрели свойства магнитоанизотропной среды, что и нашло отображение в моделях магнитоактивных источников [Завойский, 1980; Блох, 1987].

**4.2. Особенности намагниченности.** Магнитное состояние габброидов, как и других намагниченных образований, характеризуют две векторные величины: индуктивная ( $J_i$ ) и остаточная ( $J_n$ ) намагниченности, а также их соотношение — фактор  $Q = J_n / J_i$ . Векторы эффективной намагниченности, показанные на построенных моделях (см. рис. 2, 4), и их компоненты  $I_x, I_z$  (см. табл. 1 и 2) представляют векторную сумму индуктивной и остаточной компонент. Определить отдельно эти компоненты только по данным интерпретации магнитных аномалий не представляется возможным. Габброиды интрузий Стемигородского и Кропивенского участков резко выделяются среди других массивов и тел основных пород, выявленных в пределах северо-западной части Украинского щита, высокими значениями индуктивной и остаточной намагниченности [Глевасская, Кравченко, 1979; Михайлова, Глевасская, 1965]. Их естественная намагниченность превалирует над индуктивной, что отражается в повышенных значениях фактора  $Q$ . Отсюда очевидно, что векторы намагниченности, показанные на моделях (см. рис. 2, 4), и их компоненты  $I_x, I_z$  характеризуют в первую очередь поведение остаточной компоненты.

Согласно построенным моделям в телах габброидов присутствуют, в пределах одного и того же объекта, участки с прямой и обратной полярностью намагниченности. Наиболее рельефно эта особенность проявляется в краевых сегментах моделей, на левом фланге которых (у юго-западного края объектов) векторы имеют прямую полярность, на правом (у северо-восточного края) — обратную (см. рис. 2, 4). Расположение векторов эффективной намагниченности в вертикальных сечениях

<sup>2</sup> Возможные гипотезы происхождения родоначальной магмы, из которой сформировались интрузии габброидов и связанное с ними фосфатно-титановое оруденение, представлены в работе [Тарасенко, Панских, 1982].

объектов, для которых построены модели, носит закономерный характер: они расположены таким образом, что обеспечивается замкнутость основной части магнитного потока внутри тел габброидов. При этом направление потока согласуется с направленностью современного геомагнитного поля, несмотря на то, что рассматриваемые интрузии габброидов по времени своего образования относятся к протерозойской эре, для которой согласно палеомагнитным данным была свойственна существенно иная направленность геомагнитного поля. Такая согласованность с современным геомагнитным полем характерна и для других намагниченных геологических образований Украинского щита. Природа этого явления обсуждается в работе [Марковский, Щербаков, 1994 и др.], где развивается концепция о равновесном характере намагниченности континентальной коры.

Представляется, что замыкание (стягивание) магнитного потока внутри двух рассматриваемых штокообразных тел, которые отличаются друг от друга своей геометрической формой, нельзя относить к числу случайных явлений; оно, по всей вероятности, обусловлено принципом наименьшего действия — минимума затрат энергии на намагничивание объекта и поддержание вокруг него (во внешнем пространстве) магнитного поля. Стягивание потока внутрь тела не является прерогативой всех интенсивно намагниченных геологических образований; например, это не характерно для тел железистых кварцитов. Замыканию потока внутри штокообразных интрузий, вероятно, способствовали, во-первых, их концентрически-зональная структура, во-вторых, соответствующий состав и структура магнитных минералов, их способность легко менять направление своей намагниченности на противоположное. Обычно таким свойством обладают магнитные минералы, в составе которых содержатся примеси оксидов титана [Михайлова, Глевасская, 1965 и др.].

Здесь уместно отметить, что высокая интенсивность магнитных аномалий, наблюдаемых над Стремигородским и Кропивенским телами, связана с тем, что они представляют магнитоактивные объекты, у которых горизонтальная мощность во много раз превосходит глубину залегания их верхней кромки: интрузии рудных габброидов вскрыты эрозией и выходят к поверхности кристаллических пород. Таким объектам свойственен очень высокий, приближающийся к максимально воз-

можному, коэффициент взаимосвязи между величиной намагниченности возмущающих источников и интенсивностью порождаемых ими аномалий: коэффициент взаимосвязи составляет величину порядка 5,0—5,5.

Следует отметить различный характер намагниченности периферийных и центральных частей интрузий габброидов: в краевых сегментах векторы эффективной намагниченности имеют более крутые углы падения и по модулю в два раза превышают векторы центральной области. Этому соответствует и необычный характер поведения магнитных аномалий — наиболее интенсивные возмущения поля наблюдаются не над центром интрузий габброидов, а сдвинуты в сторону их периферии. Отметим также, что значения намагниченности, измеренные на образцах керна скважин в центральной и периферийной частях тел габброидов, оказались сопоставимыми по своей величине.

В соответствии с изложенным остается предположить, что пониженные значения эффективной намагниченности в центральных сегментах построенных моделей обусловлены существенной нестабильностью (разбросом) направлений элементарных векторов намагниченности, характеризующих локальные участки габброидов. Одна из возможных причин такой нестабильности — присутствие в центральной части тел габброидов нескольких генераций магнитных минералов, которые обладают различно направленной намагниченностью и поэтому взаимно компенсируют друг друга. Можно также предположить существование особого термодинамического режима, в условиях которого кристаллизовались такие минералы. Иными словами речь идет о связи пониженной намагниченности с процессами рудогенеза в центральной части тел габброидов. Для более конкретных суждений по этому вопросу необходимы специальные петромагнитные исследования.

**4.3. Структура магнитных аномалий; их возможная природа.** В ходе анализа структуры магнитных аномалий, наблюдаемых над телами рудных габброидов, выяснилось, что они представляют собой результат интерференции нескольких отличающихся по морфологии и геологической природе составляющих (компонент) аномального поля<sup>3</sup>. В первом при-

<sup>3</sup>Анализировались планы изодинам М 1 : 10 000 и графики аномалий, построенные для соответствующим образом выбранных профилей.

ближении можно выделить четыре типа таких компонент. Особого внимания заслуживает компонента, которая представлена интенсивным максимумом и сопряженными с ним интенсивным минимумом поля, которые смещены от центра объектов к их периферии (см. рис. 1—4). Такую составляющую будем называть зональной компонентой, поскольку своим происхождением она в значительной мере обязана зональной структуре габброидов. Ареал распространения этой компоненты охватывает тело габброидов в целом; по своей интенсивности она существенным образом превосходит все остальные составляющие аномально поля и в значительной мере определяет характер построенных моделей магнитоактивных источников (см. рис. 2, 4).

Особенности поведения (морфологии) зональной компоненты определяются, в первую очередь, следующими факторами: V-образной зональной структурой тел габброидов; присутствием участков с прямой и обратной полярностью намагниченности, которые закономерно расположены относительно друг друга. В результате над рассматриваемыми объектами наблюдаются аномалии, которые по своей морфологии обнаруживают элементы сходства (аналогии) с теоретическими аномалиями над субгоризонтально намагниченными объектами большой горизонтальной мощности, в частности, горизонтально расположенным тонким пластом, у которого размеры по горизонтали существенно превалируют над глубиной залегания верхней кромки.

Поскольку в рассматриваемых интрузиях габброидов густовкрапленное оруденение сконцентрировано в их центральной части (разд. 3. 1, 3. 2), а зональная компонента отображает влияние тела габброидов в целом, то нет оснований предполагать, что ее источники непосредственно связаны с рудной минерализацией. Достаточно обоснованной представляется версия, согласно которой природа зональной компоненты связана с тонкодисперсной вкрапленностью магнетита и гематита в породообразующих силикатах. В соответствии с данными литературных источников [Глевасская, Кравченко, 1979; Михайлова, Глевасская, 1965; Тарасенко, Панских, 1982], такая вкрапленность сформировалась в меланократовых породообразующих минералах габброидов в процессе их постмагматического изменения (по оливинам и пироксенам развита вкрапленность магнетита, по плагиоклазам — гематита).

В рамках представленной версии находят объяснение большая интенсивность зональных аномалий и широкий ареал развития, который ассоциируется с крупными сегментами тел габброидов. В этом плане следует отметить: распространенность породообразующих силикатов и соответственно развитой в них вкрапленности магнитных минералов по всему объему тел габброидов; свойственные тонкодисперсной вкрапленности стабильность и высокие значения естественной остаточной намагниченности (для нее предполагается псевдооднородная структура).

Ко второму типу составляющих аномально поля можно отнести своеобразную аномалию локального характера, которая расположена над центральной частью тел габброидов и четко выделяется на фоне зональной компоненты. На графиках аномалий (см. рис. 2, 4) она представлена сопряженными друг с другом минимумом и максимумом поля, которые по интенсивности и ареалу распространения существенно уступают зональной компоненте. Для краткости назовем эту составляющую аномалией-2. По интенсивности и ареалу распространения она существенно уступает зональной компоненте. На Стремигородском участке амплитуда максимума—минимума этой составляющей порядка  $\pm 1000$  нТл, на Кропивенском  $\pm 200$  нТл. Ареал распространения по горизонтали (вдоль интерпретационного профиля) на Стремигородском участке порядка 400—500 м, на Кропивенском 300—400 м.

Отметим также противоположную, относительно зональной компоненты, последовательность расположения максимума и минимума аномалии-2. У зональной компоненты минимум расположен у правого (северного) фланга графиков аномалий, а у аномалии-2, наоборот, у левого (южного). Соответственно у центральных сегментов модели Стремигородского участка полярность векторов эффективной намагниченности обратная по отношению к периферии; достаточно наглядно это видно на примере трехсегментного варианта модели (см. рис. 2).

Расположение аномалий-2 в эпицентре тел габброидов, совмещенность ареала их распространения с наиболее меланократовой частью тел габброидов, обогащенной густовкрапленной рудной минерализацией, дает основание предполагать, что источники этих аномалий непосредственно связаны с ильменит-апатитовым оруденением. Согласно литературным источникам [Кудинова, 1976; Михай-

лова, Глевасская, 1965], в условиях Коростенского плутона ильменит не обладает свойствами ферромагнетика. Главные носители магнитных свойств рудной минерализации рассматриваемого типа — титаномagnetит и магнетит, которые сопутствуют ильмениту.

Третий тип составляющих аномального поля представлен обособленными, без сопровождающих максимумов (минимумов), локальными аномалиями, которые будем называть аномалиями-3. Мозаика таких аномалий развита в центральной части и северо-западном сегменте Кропивенского тела габброидов (см. разд. 2. 1); преобладают аномалии отрицательного знака. Характер взаимоотношения аномалий-3 с зональной компонентой дает основание относить источники аномалий-3 к более поздним, чем у зональной компоненты, генерациям магнитных минералов. Природа таких источников пока что остается невыясненной.

Четвертый тип составляющих аномального магнитного поля аномалиями можно называть лишь условно; он представлен плавными (без четко выраженных максимумов-минимумов) возмущениями магнитного поля, которые наблюдаются в экзоконтактах интрузий рудных габброидов. В большинстве случаев интенсивность таких возмущений поля не превышает 100—200 нТл. Они имеют форму ореолов, окаймляющих тела габброидов со стороны их экзоконтактов. На Стремигородском участке ширина ореолов варьирует в пределах 300—500 м. Согласно публикациям [Тарасенко, Панских, 1982], в экзоконтактах интрузий рудных габброидов установлены вторичные метасоматические изменения вмещающих пород (анортозитов, габбро-анортозитов), оливин и пироксен которых замещаются магнетит-галькхлоритовым агрегатом. Это дает основание связывать происхождение ореолов окаймления с метасоматически измененными вмещающими породами.

В качестве уточнения отметим, что графики аномалий (см. рис. 2, 4) и построенные на их основе модели магнитоактивных источников реально отображают характер воздействия двух компонент наблюдаемого аномального поля: зональной и аномалии-2. Что касается третьей и четвертой составляющих поля, то они не могут существенным образом повлиять на результаты проведенной количественной интерпретации: третья компонента из-за соответствующего выбора положения интерпретационных профилей (вне зоны действия таких аномалий); четвертая составляющая — из-

за ее незначительной (по сравнению с зональной компонентой) интенсивностью возмущений поля.

Как отмечалось, над штокообразными телами рудных габброидов наблюдаются значительные по интенсивности и весьма своеобразные по морфологическому облику ансамбли магнитных аномалий, которые выделяют такие геологические образования среди других, отличных по форме и генезису тел и массивов габброидов, выявленных в пределах северо-западной части Украинского щита. Естественно, возникает вопрос о причинах столь необычного поведения магнитного поля. Среди множества факторов, которые могли повлиять на характер аномалий, в первую очередь отметим особую структурно-тектоническую позицию Кропивенской и Стремигородской интрузий — их расположение в узлах сопряжения разнонаправленных ослабленных тектонических зон. Указанное положение следует из результатов анализа разномасштабных карт магнитного и гравитационного полей.

Тектоническим узлам свойственна повышенная раздробленность (делимость) земной коры. В периоды активизации они функционируют в качестве вертикальных ("стволовых") каналов тепло- и массопереноса между глубинными горизонтами и верхними этажами земной коры. Эти структуры являются проводниками магматических расплавов и флюидно-газовых эманаций [Чистова, Кутинов, 1997; Орлюк, Бакаржиева, 2006]. Расположение в тектонически ослабленных узлах предопределило штокообразный характер интрузий габброидов и, как следствие, овальную, близкую к изометричной форму ансамблей магнитных аномалий. Благодаря активному геодинамическому режиму — неоднократно изменению (пульсациям) поля тектонических напряжений, сфокусированных в тектонических узлах, в габброидах сформировалась зональная структура, конформная контактам штокообразных тел; особую активность приобрели процессы постмагматического изменения пород.

Таким образом, в эволюции рудных габброидов как магнитоактивных образований намечается следующая цепочка взаимосвязанных явлений: структурно-тектоническая позиция штокообразных интрузий (их пространственная и генетическая связь с тектонически ослабленными узлами); пульсирующий характер тектонических напряжений, формирование зональной структуры габброидов; ак-

тивный подток флюидно-газовых эманаций, изменение породообразующих железомagneзиальных силикатов (оливина, пироксена), образование, в процессе их замещения вторичными ассоциациями минералов, тонкодисперсной вкрапленности магнетита; большая интенсивность наблюдаемых магнитных аномалий и их своеобразный характер.

#### **4.4. Основные итоги интерпретации кратко сводятся к следующему.**

1. Проведена интерпретация магнитных аномалий над телами рудных габброидов Коростенского плутона (Стремигородский и Кропивенский участки). Построенные модели магнитоактивных источников, удовлетворяющие наблюдаемым аномалиям (их зональной компоненте) и априорным геолого-геофизическим данным, носят неординарный характер (авторам неизвестны аналоги в опубликованной литературе). Они могут рассматриваться как новый класс моделей для интерпретации магнитных аномалий над телами рудных габброидов, обогащенных фосфорно-титановым оруденением;

2. В процессе интерпретации магнитных аномалий выяснилось, что они представляют собой результат суперпозиции нескольких, отличающихся по геологической природе компонент поля. Среди таких компонент доминирует составляющая (зональная компонента), которая отображает влияние тел габброидов в целом; ей свойственны наиболее интенсивные возмущения магнитного поля. Она предопределяет характер построенных моделей. Имеются веские основания связывать происхождение зональной компоненты с тонкодисперсной вкрапленностью магнетита (гематита?) в породообразующих силикатах, замещенных в процессе постмагматических изменений вторичными ассоциациями минералов.

3. На фоне зональной компоненты проявляются аномалии локального характера, для некоторых из них можно предполагать связь

с густовкрапленным оруденением (носители магнитных свойств — титаномагнетит, магнетит, которые сопутствуют ильмениту). По своей интенсивности локальные аномалии значительно уступают зональной компоненте.

4. Источники наиболее высокоамплитудной (зональной) компоненты магнитных аномалий непосредственно не связаны с рудной минерализацией; они могут быть ассоциированы с вкрапленностью магнетита в замещенных породообразующих минералах.

Основываясь на опыте интерпретации магнитных аномалий Стремигородской и Кропивенской штокообразных интрузий, а также данных литературных источников [Егоров и др., 1989; Кудинова, 1976; Тарасенко, 1988 и др.], отметим несколько соображений, относящихся к вопросу информативности магнитного поля при поисках месторождений ильменит-титаномагнетит-апатитовых руд. Интенсивность магнитных аномалий не может служить ведущим критерием при прогнозе и поиске богатых (с высокими содержаниями оксида титана) залежей. Соответствующая информация носит косвенный, опосредствованный характер, завуалирована интенсивными возмущениями поля, обусловленными источниками нерудного типа и неоднородностями строения габброидов. Основное внимание при истолковании магнитных полей следует обращать на особенности морфологии аномалий средней интенсивности (от 200 до 2000 нТл) и их соотношение друг с другом. В связи с этим особую актуальность приобретают: разработка методики распознавания "рудных" аномалий и их выделение из наблюдаемых полей; поиск объектов нетрадиционного (отличного от штокообразных рудных габброидов) типа.

*Авторы выражают благодарность g-ру геол. мин. наук М. И. Орлюку за полезные замечания, которые способствовали улучшению содержания статьи.*

### **Список литературы**

Блох Ю. И. Решение прямой задачи магниторазведки для трехмерных анизотропных геологических объектов с учетом размагничивания // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 12. — С. 49—55.

Борисенко Л. Ф., Делицын Л. М., Проскурин Г. П., Крупенькина Н. С. Рудные габброиды Чепов-

вичского анортозитового массива (Украинский кристаллический щит) // Геология рудных месторождений. — 1979. — 21, № 4. — С. 16—27.

Буха Е. Г., Зейгельман М. С., Корчагин И. Н. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: Программно-алгоритмическое обеспечение и методические реко-

- мендации. — Киев, 1986. — 235 с. — Деп. в ВИНТИ, № 8363.
- Галецький Л., Ремезова О., Шевцов О. Метал форум Україна-2007 // Геолог України. — 2007. — № 3. — С. 7—12.
- Галецький Л., Ремезова О. Титанові руди України // Геолог України. — 2007. — № 3. — С. 51—61.
- Глевасская А.М., Кравченко С.Н. Минералогическое обоснование намагниченности пород габбро-анортозитового комплекса сложного Коростенского плутона (Украинский щит) // Геофиз. журн. — 1979. — 1, № 2. — С. 72—78.
- Егоров В. М., Швайбаров С. К., Егорова Т. П., Заворотько А.Н. Гравитационное моделирование рудных габброидов Коростенского плутона // Геофиз. журн. — 1989. — 11, № 6. — С. 74—81.
- Егорова Т.П., Курганова Л.И., Старостенко В.И. Объемное плотностное моделирование Кропивенского рудного тела: опыт применения методики с быстрым преобразованием Фурье // Геофиз. журн. — 1992. — 14, № 1. — С. 48—52.
- Завойский В. Н. Вычисление магнитных аномалий от анизотропных тел в задачах магниторазведки // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1980. — № 1. — С. 76—85.
- Завойский В.Н., Неижсал Ю.Е. Декомпозиционно-итерационный метод решения обратной задачи магниторазведки // Геофиз. журн. — 1979. — 2, № 2. — С. 57—65.
- Зейгельман М. С. К интерпретации гравитационных и магнитных аномалий Звиздаль-Залесской зоны // Теория и методика интерпретации гравимагнитных полей. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 295—302.
- Кривдик С.Г., Дубина О.В., Гуравський Т.В. Деякі мінералогічні та петрологічні особливості рудоносних (фосфор, титан) габброїдів анортозит-рапаківігранітних плутонів Українського щита // Мінерал. журн. — 2008. — 30, № 4. — С. 41—57.
- Кудинова Л.А. Окисные железотитановые минералы габбро-анортозитовой формации Коростенского плутона: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Киев, 1976. — 31 с.
- Марковский В.С., Щербаков В.П. Естественная намагниченность ферримагнитных минералов в РТ-условиях литосферы // Петромагнитная модель литосферы. — Киев: Наук. думка, 1994. — С. 40—54.
- Михайлова Н.П., Глевасская А.М. Намагниченность основных и ультраосновных пород Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 1965. — 149 с.
- Орлюк М. И., Бакаржиева М. И. Геомагнитные критерии и численное 3D магнитное моделирование перспективных на алмазоносность структур // Геофиз. журн. — 2006. — 28, № 5. — С. 30—39.
- Проскурин Г.П. Объемная зональность апатит-ильменитового оруденения в габброидах Коростенского плутона // Вертикальная зональность магматогенных рудных месторождений. — Москва: Наука, 1984. — С. 44—67.
- Тарасенко В.С., Панских Е.А. Новый генетический тип апатит-ильменитовых руд в габбро-анортозитовых массивах Коростенского плутона (Украинский щит) // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1982. — № 11. — С. 100—110.
- Тарасенко В. С. Критерии локального прогнозирования фосфатно-титановых руд в габбро-анортозитовых массивах Украинского щита // Геол. журн. — 1988. — № 6. — С. 33—43.
- Чистова З.Б., Кутинов Ю.Г. Иерархический ряд проявлений кимберлитового магматизма и их отражение в геолого-геофизических материалах // Геофизика. — 1997. — № 3. — С. 62—66.