



УДК (550.831.05+550.838.05):550.8.012/.013

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИХ ПЛОТНОСТНЫХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В КЛАССЕ СЛОЖНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ПРИ РЕШЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

О. Г. Садур\*

Разработана методика конструирования геолого-геофизических моделей на основе выявления их плотностных и магнитных характеристик в классе сложного распределения масс. Показана ее высокая эффективность при решении различных геологических задач.

**Ключевые слова:** гравиразведка, магниторазведка, методика, моделирование, прямая задача, обратная задача.

## MODELLING OF GEOLOGICAL ENVIRONMENTS BASED ON CALCULATION OF THEIR DENSITY AND MAGNETIZATION IN CLASS OF COMPLEX MASS DISTRIBUTION FOR VARIOUS GEOLOGICAL PROBLEMS

O. G. Sadour

Geologic-geophysical modelling technique based on calculation of their density and magnetization in class of complex mass distribution for various geological problems is developed. Its high efficiency of solving various geological problems is demonstrated.

**Key words:** gravitational exploration, magnetic exploration, technique, modelling, direct problem, inverse problem.

Моделирование геологических сред реализуется на основе вычисления их плотностных и магнитных характеристик методами подбора путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в опережающем или сопровождающем режимах. В опережающем режиме самостоятельно выясняются положение плотностных и/или магнитных границ, распределение полей плотности и/или намагниченности; в сопровождающем – их плотностные и магнитные характеристики в рамках известных границ, в частности сейсмических. Выявляются области, соответствующие интрузивным образованиям и тектоническим элементам, определяется вещественный состав пород на основании их скоростных, плотностных и магнитных характеристик.

Моделирование проводится по авторской методике, базирующейся на определении неоднородных плотностных и магнитных характеристик горных пород в их естественном залегании и на количественной оценке их геометрических параметров в двух- или трехмерном варианте, т. е. на основе решения трехмерных прямых и обратных задач для класса сложного распределения масс [1–3].

От задач рудного типа данная отличается тем, что задаваемые объемы тесно прилегают друг к другу, полностью заполняя исследуемое пространство, и моделируют сплошную геологическую среду, как и в задачах структурного типа.

Однако в отличие от структурных в задаче сложного распределения масс нет слоев, протягивающихся вдоль всего геологического разреза. Подобный смешанный класс значительно лучше соответствует вполне определенным наблюдаемым полям, особенно при наличии тесной связи формирования моделей с геологическим содержанием, как на начальном этапе, так и в процессе подбора моделей. Методика достаточно широко апробирована на территории Сибири и Урала при региональных, съемочных и поисково-разведочных работах на железорудных, хромитовых, полиметаллических, золоторудных, фосфоритовых, апатитовых и углеводородных месторождениях, т. е. и в сильно, и в слабо выраженных потенциальных полях.

Модель геологического разреза (одного или нескольких) формируется из блоков, имитирующих геологические тела. Блоки, в свою очередь, аппроксимируются системой прямоугольных параллелепипедов ограниченного размера. Обычно при этом привлекают всю априорную геолого-геофизическую информацию. Размеры блоков задаются исходя из формы геологических тел и их физических свойств, образующих эти тела. Именно предполагаемая неоднородность физических свойств на всем протяжении разреза служит основанием для перехода от структурной задачи к задаче сложного распределения. Кроме того, неоднородность может предполагаться и по глубине. Таким образом, сплошная среда разбивается некоторым количеством вертикальных

\* ФГУП «СНИИГГиМС» (Новосибирск)



и горизонтальных линий. Вертикальные линии постоянны в математическом смысле (представлены константой), горизонтальные – кусочно-постоянные, их число в вертикальных столбцах может быть различным.

Отметим еще один аспект задания блоков: минимизацию количества блоков в геолого-геофизической модели. Имеется возможность алгоритмически объединять некоторые блоки таким образом, чтобы по физическим свойствам они соответствовали одному телу. Для этой же цели часть модели можно задавать с точными параметрами, опираясь, например, на данные буровых или горных выработок.

Расчетная часть методики базируется на решении трехмерных прямых и обратных задач магнито- и гравиразведки с помощью авторской программы Geolab-20.

На первом этапе моделирования ставится задача очень грубого соответствия модели предполагаемого геологического разреза на основе сопоставления модельных и наблюдаемых полей. Возможно, что уже на этом этапе потребуются внести коррективы в изначальную модель разреза. Далее осуществляется детализация на основе подбора верхних кромок блоков и подбора неоднородности плотности/намагниченности в каждом блоке. В соответствии с этим конструкция модели в программе состоит из трех типов вспомогательных моделей: блоковой, детальной и модели ошибок.

### **Блоковая модель**

Она представляет собой сплошные среды, разбитые на серию блоков, в пределах которых на основе градиентных методов подбора осуществляются последовательные приближения геометрических параметров блоков, а также определяются их плотностные и магнитные характеристики. Под блоком понимается сложно построенное геометрическое тело, составленное из совокупности объемных элементарных тел, квази-однородное по расчетной намагниченности или плотности. Конструкция блоков такова, что они полностью заполняют все исследуемое пространство, т. е. образуют сплошные среды. В рамках рассматриваемой модели первоначально определяются плотностные и/или магнитные характеристики каждого блока. Учитывая свойство эквивалентности в обратных задачах при определении плотности/намагниченности каждого блока, подбор осуществлялся на основе изменения формы блоков в каждом разрезе с таким расчетом, чтобы плотностные/магнитные характеристики, аппроксимирующие однотипные породы, не выходили за границы петрофизических. Изменение формы блоков в данной модели осуществляется в трех вариантах:

– определение размеров по простираению с одновременным подбором плотности/намагниченности;

– определение положения плоской границы блока с одновременным подбором плотности (намагниченности);

– определение формы верхней или нижней границы блока с заданной плотностью (намагниченностью).

Основной недостаток модели – несколько упрощенный подход к ее конструкции, а именно: однородность петрофизических характеристик каждого блока. (В природе нет однородно намагниченных и однородно плотностных объектов.) Это в значительной степени сужает область самостоятельного использования модели, особенно в приповерхностной части разреза.

### **Детальная модель**

Учитывая недостатки блоковой модели, в которой намагниченность/плотность каждого блока принимается постоянной, мы разработали эвристический алгоритм, с помощью которого можно рассчитать изменение плотности в каждом блоке по вертикали и по латерали. Алгоритм существенно отличается от известных тем, что он не определяется заранее заданной функциональной зависимостью, а целиком зависит лишь от изменчивости гравитационного/магнитного поля. В результате подбора вычисленные поля совпадают с наблюдаемыми практически полностью (до второго – третьего знака после запятой). Если вычисленную плотность/намагниченность графически представить в виде изолиний, то они как в структурно-морфологическом, так и в тектоническом плане позволяют по-новому судить об особенностях геологического разреза. Недостатком этой вспомогательной модели является наличие практической и теоретической эквивалентности при отсутствии знаний о форме объектов, участвующих в формировании аномального гравитационного (магнитного) поля.

### **Модель ошибок**

Качество подбора для каждой вспомогательной модели определяется моделью ошибок, которая представляет собой поле абсолютных (относительных) погрешностей исследуемых параметров моделей, независимо подобранных по наблюдаемому и модельному полям. Всего существуют три модели ошибок: две для блоковой модели (подбора границ блоков и подбора плотностных и/или магнитных характеристик каждого блока) и одна для детальной (подбора плотностных и/или магнитных характеристик каждого параллелепипеда). Качество модели ошибок зависит от значения среднеквадратической ошибки и наличия знакопеременных ошибок. При систематической ошибке подбор моделей осуществляется заново с использованием блоковой, а затем детальной модели.

Таким образом, параметры результативных моделей определяются исходя из следующих требований:



1. В модели отображена вся существенная информация о моделируемых объектах.

2. Модельные поля в высокой степени соответствовали наблюдаемым потенциальным (с точностью до второго – третьего знака после запятой).

3. Неоднозначность решения обратной задачи сведена к минимуму.

Объем априорной информации обуславливает количество вариантов решения обратной задачи и ее фундаментальные характеристики – единственность и устойчивость. Эти характеристики, в свою очередь, определяются множеством  $\epsilon$ -эквивалентных решений, пределы которых сужаются путем ввода априорной информации, а качество решения обратной задачи – степенью близости модельных и наблюдаемых полей. В некоторых случаях даже незначительное изменение параметров наблюдаемых потенциальных полей приводит к существенным изменениям аномалиеобразующих объектов. Но опыт решения практических задач свидетельствует о том, что неустойчивость неодинакова для всех определяемых параметров: наиболее устойчиво находятся плотность/намагниченность и морфология объектов, расположенных в непосредственной близости к точке наблюдения.

Количество  $\epsilon$ -эквивалентных решений уменьшается при совместном использовании скважинных, наземных и повысотных полей. Это соответствует теории единственности для гармонической функции, так как для выявления закономерности напряженности потенциального поля необходимо знать ее значения в области трехмерного существования поля [4]. Таким образом, использование объемных гравимагнитных полей позволяет пространственно локализовать выделенные блоки, уточнить их геометрию, выявить в них локальные плотностные и магнитные неоднородности.

В разработанной нами методике приняты следующие допущения:

1) интерпретируемый разрез должен быть прямолинейным, при одновременной интерпретации нескольких разрезов должна соблюдаться их параллельность;

2) геологическая среда – совокупность объектов, имеющих неоднородные плотностные и магнитные характеристики, количественная оценка которых и является целевой задачей интерпретации;

3) каждый блок аппроксимируется набором элементарных тел правильной геометрической формы, параметры которых определяются с помощью решения обратных задач;

4) наблюдаемые потенциальные поля рассматриваются как сумма полезного сигнала и регионального фона;

5) конструирование модели осуществляется в строгой последовательности: от обобщенной

модели до детальной; степень детальности модели в целом обусловлена масштабом и точностью съемки, отдельных ее элементов – их удаленностью от точек измерения поля.

В целом моделирование происходит по следующей технологической схеме:

– построение первоначальной «нулевой» модели;

– разбиение первоначальной модели на блоки и наделение этих блоков физическими свойствами в интервалах предполагаемого класса существования пород в интерпретируемом разрезе; *в рамках блоковой модели*

- определение плотности и намагниченности с закрепленными геометрическими параметрами и ручная корректировка геометрических параметров и физических свойств;

- определение физических свойств блоков с одновременным подбором верхних и плоских нижних границ каждого блока;

- определение формы верхних границ каждого блока с заданными физическими свойствами при закрепленных нижних границах;

- определение формы нижней границы модели при заданных значениях физических свойств каждого блока;

- определение размеров по простираению для каждого блока;

*в рамках детальной модели*

- определение физических свойств каждого элемента, аппроксимирующего блоки;

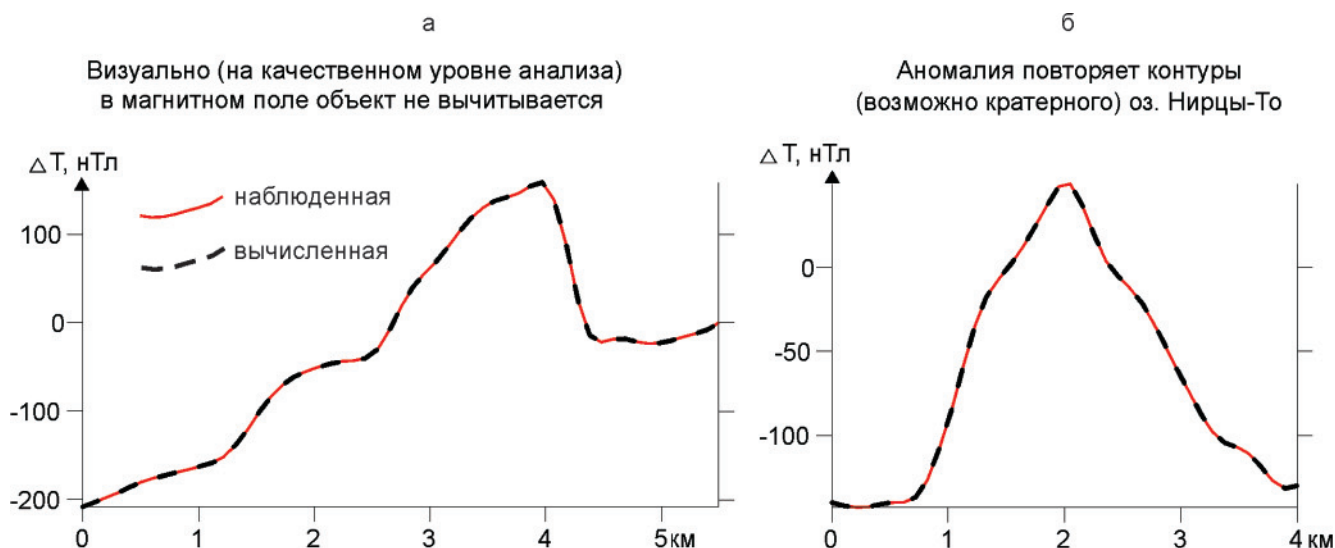
- построение моделей распределения плотности и намагниченности в плоскости интерпретируемых разрезов на основе программ Surfer и Geosim;

- построение геолого-геофизической модели каждого разреза.

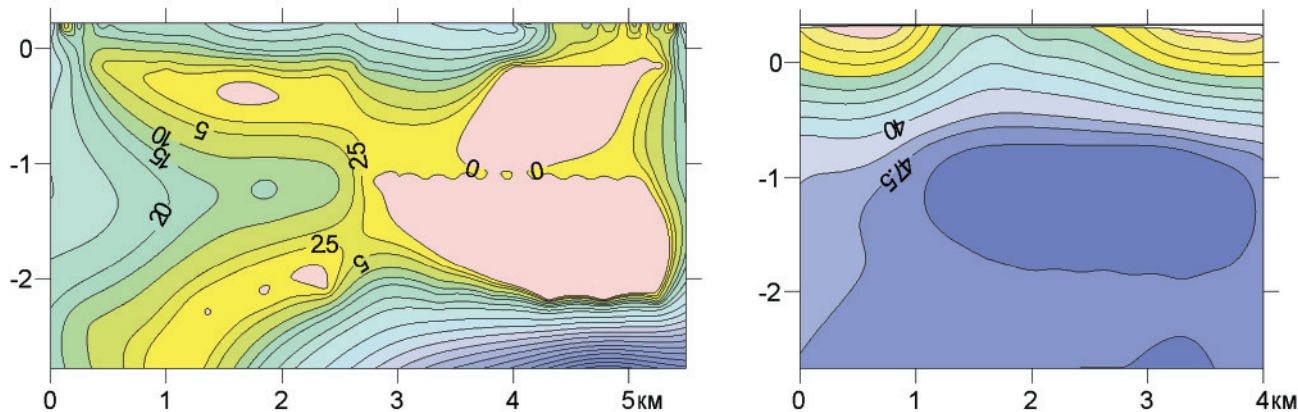
Наличие априорных сведений об изучаемом объекте позволяет наложить ряд ограничений на ход решения обратной задачи, как, например, задание интервалов для каждого блока, в пределах которых реализуется режим подбора расчетных физических свойств; задание интервалов ограничения подбора верхних и нижних кромок блоков. При этом режим подбора формы и глубины границ осуществляется таким образом, что каждая нижняя граница вышележащего слоя одновременно является верхней границей нижележащего.

Помимо этого, в зависимости от информативности априорных сведений технологический процесс расчета может быть изменен: например, задание физических свойств на основе массовых измерений по образцам и скважинам для конкретных геологических комплексов; оценка физических свойств блоков с известной геометрической формой по наблюдаемым потенциальным полям; оценка формы объекта при известных физических свойствах и т. д.

Необходимые условия решения обратной задачи следующие:

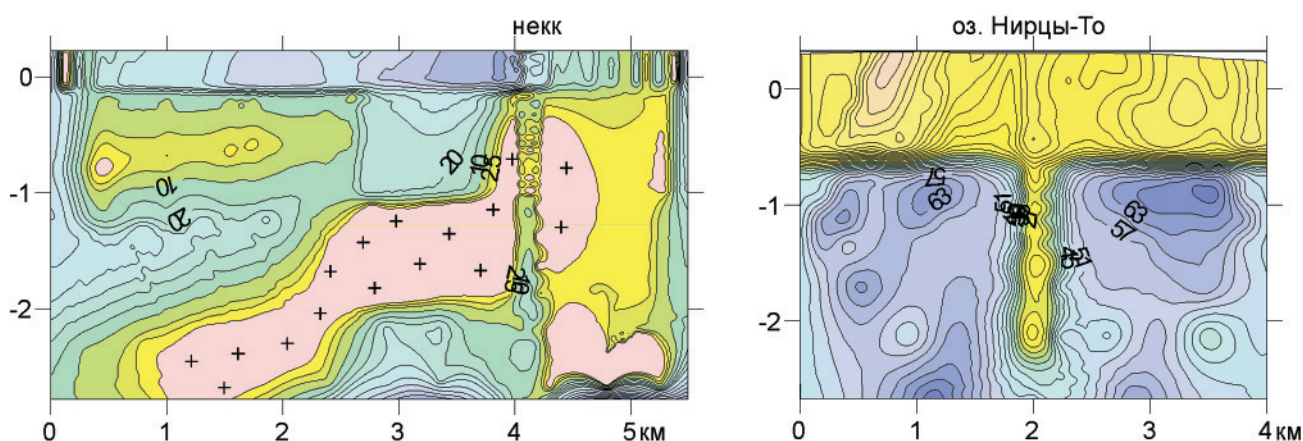


Кажущаяся расчетная намагнитченность



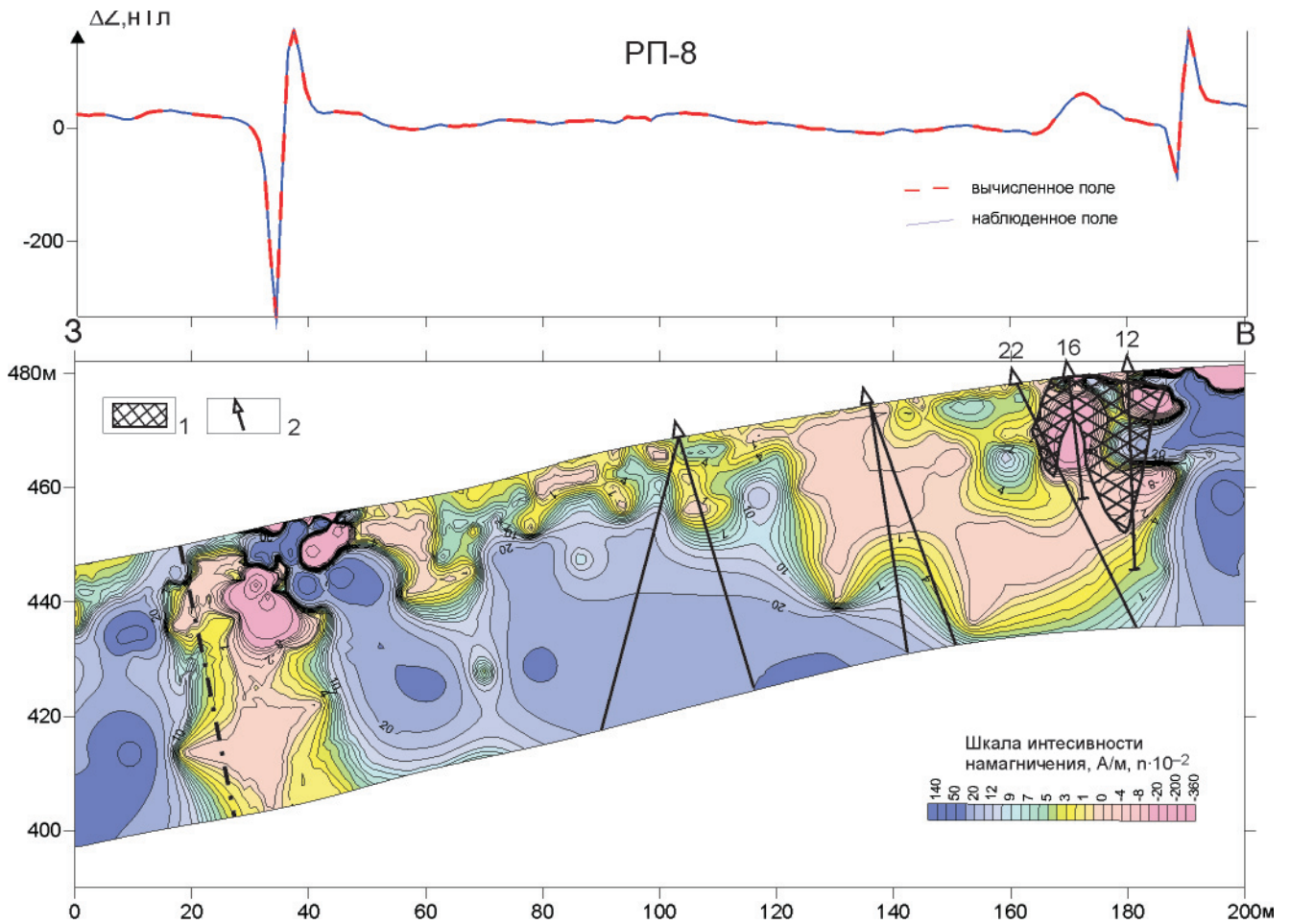
Вариант решения обратной задачи традиционным способом (без использования фильтра). В поле кажущейся расчетной намагнитченности трубчатые тела не выделяются

Истинная расчетная намагнитченность



Авторский вариант решения задачи (с введением фильтра). Вводятся поправки за взаимное влияние магнитных объектов, коэффициент размагничивания (форма тела) и внутренние магнитные поля. Четко выделяются трубчатые тела: а) некк (ПК4), рвуций гранитоидный массив; б) трубчатое тело (ПК2) в поле силурийско-девонских отложений.

**Рис. 1.** Определение морфологии объектов трубчатого типа по результатам моделирования: а – Устьхэяхинской палеовулканической структуры (некк); б – аномалии над оз. Нирцы-То, Полярный Урал



**Рис. 2.** Распределение расчетной намагниченности в плоскости РП-8 (Сунгайское марганцевое месторождение)  
1 – рудное тело; 2 – скважины

– достижение заданной величины среднеквадратического расхождения между наблюдаемыми и теоретическими полями;

– близость результативных параметров модели, полученных при повторном решении обратной задачи по теоретическому полю, первоначально найденным характеристикам;

– соответствие модели концепции о геологическом строении исследуемой территории.

Таким образом, использование методики моделирования есть сложный многовариантный процесс постепенного перехода от общего к частному, лишь частично основанный на выполнении сложных вычислительных операций. В большей степени методика математического моделирования базируется на интуиции и опыте исследователя.

Основные достоинства используемой программы заключается в следующем:

– программа Geolab работает как в двухмерном (профильном), так и в трехмерном режимах с полями  $T_a$ ,  $\Delta T$ ,  $Z$ ,  $H$ ,  $X$ ,  $\Delta G$  и их градиентами;

– расчеты производятся раздельно или одновременно по аэромагнитным, аэрогравитационным, наземным и скважинным полям;

– учитывается изменение высот полета, рельеф местности и кривизна скважин;

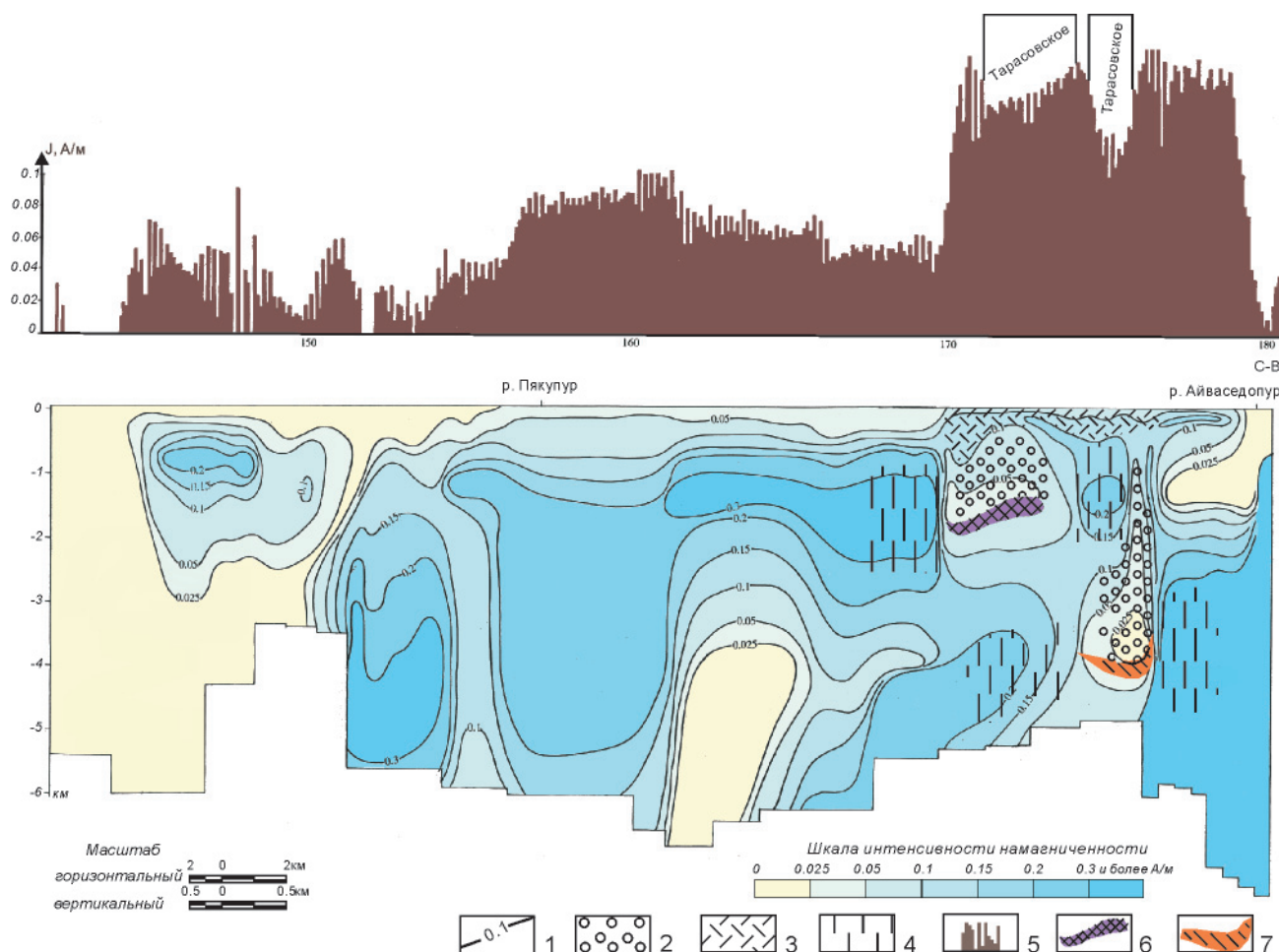
– рассчитываются массивы больших размерностей, ограниченные возможностями только ЭВМ;

– вводится класс сложного распределения масс, позволяющий решать задачи как рудного, так структурного типа.

В качестве иллюстрации возможностей моделирования приведем несколько примеров.

Рис. 1 иллюстрирует выявление тел трубчатого типа на Полярном Урале по материалам аэромагнитной съемки м-ба 1:25 000. В верхней части рисунка на основе решения обратных задач трубчатые тела не выделяются. Однако после введения поправок за взаимное влияние магнитных объектов, коэффициента размагничивания и внутренних магнитных полей они определяются достаточно уверенно: на рис. 1, а – это некк, рвущий гранитоидный массив, на рис. 1, б – трубчатое тело в поле силурийско-девонских отложений.

На рис. 2 приведены результаты моделирования по профилю 8 Сунгайского месторождения (Салаир) на основе детальной наземной магнитной съемки с шагом 1 м. По физическим свойствам здесь, помимо марганцевых руд, немагнитны кварцитовые сланцы. Скв. 12, 16 и 22 вскрыто рудное тело, которое на магнитной модели совпадает с областью пониженных значений расчетной намагниченности.



**Рис. 3.** Прогноз залежей углеводородов на геотраверсе 20 по структуре намагниченности осадочного чехла (Тарасовское месторождение и прилегающие участки)

1 – изолинии вычисленной намагниченности, А/м; зоны: 2 – восстановления, 3 – окисления, 4 – субвертикальных неоднородностей; 5 – расчетная намагниченность, А/м; залежи Тарасовского месторождения по данным моделирования; 6 – известная газонефтяная (по данным моделирования), 7 – прогнозируемая углеводородная залежь

На рис. 3 показан пример использования моделирования при поисках углеводородов на геотраверсе 20 (Западная Сибирь). Известное газонефтяное месторождение вскрыто скважинами в инт. 980–2500 м, что по данным моделирования практически совпадает с локальной областью пониженной расчетной намагниченности. Эта область соответствует не самой залежи, а ее взаимодействию с вышележащими породами [5], а кроме нее на глубине более 4 км выделяется новая залежь.

Таким образом, использование методики моделирования, особенно в комплексе с другими геолого-геофизическими методами, позволит значительно повысить эффективность геолого-разведочных работ при картировании, поисках и разведке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Возможности** моделирования полей плотности и намагниченности при геокартировании, поисковых и разведочных работах [Текст] / О. Г. Садур, С. С. Долгушин, В. В. Марков,

О. Г. Селезнева // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры : Матер. X науч.-практ. конф. – Т. 2. – Ханты-Мансийск, 2007. – С. 243–249.

2. **Глубинная** модель габбро-монцодиорит-сиеногранитовой формации [Текст] / В. Л. Хомичев, С. С. Долгушин, О. Г. Садур, В. В. Марков. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2003. – С. 27–37.

3. **Исаев, Г. Д.** Геофлюидодинамический анализ геоплотностной и геомагнитной моделей вдоль участка регионального профиля МОГТ № 106 юга Уренгойского вала [Текст] / Г. Д. Исаев, О. Г. Садур, В. Н. Бородкин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2003. – № 4–5. – С. 98–105.

4. **Сретенский, Л. Н.** Теория ньютоновского потенциала [Текст] / Л. Н. Сретенский. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1946. – 294 с.

5. **Физические** свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) : Справочник геофизика [Текст] / Под ред. Н. Б. Дортман. – М. : Недра, 1984. – С. 368–375.