

УДК 550.83

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОПОЛЕЙ

Виноградов А. М., Сапожников В. М.

Рассматривается версия элементарного алгоритма интерпретации геополей при решении трудноформализуемых задач. Она вытекает из сложившихся методологических установок, разработок в области геометризации вещественных и энергетических полей, при которых оптимизируется достижение поставленной цели в рамках принятых или конкурирующих концепций.

Ключевые слова: геополе; алгоритм; система; модель; предмет; объект; цель; решение.

В современных условиях в разведочной геофизике для успешной интерпретации данных измерений геополей необходимо совершенствовать применение целевого, системного и комплексного подходов. Наиболее успешно эта проблема решается в промышленной геофизике. Для многих нефтегазовых месторождений с учетом их специфики разработаны технологии решения классификационных задач (целевой подход), позволяющие по комплексу методов ГИС (комплексный подход) применять формализованные способы литологического расчленения разрезов с выделением коллекторов и определением их промысловых характеристик (системный подход).

Ведущую роль играет системный анализ, с помощью которого ранее применявшиеся неформальные сведения переведены в утверждения, допускающие построение алгоритмов выделения геологических границ объектов, определения их литологической принадлежности и необходимых количественных характеристик коллекторских свойств и продуктивности. Системный подход позволяет представить изучаемую среду в виде иерархической структуры объектов, образующих сложную взаимосвязанную систему составных ее частей в геологическом пространстве. И хотя системный подход предполагает применение строгих формализованных способов и процедур, но на определенной стадии внедрения системного анализа допускается использовать суждения, основанные на личном опыте и интуиции интерпретаторов. Та-

кое положение складывалось вначале в промышленной геофизике, когда формировались алгоритмы машинного расчленения разрезов на отдельные пласты с последующей классификацией на основе ручной интерпретации. Возможны и в настоящее время ситуации, в которых из-за отсутствия некоторых качественных измерений (например, диаграмм одного из методов комплекса) в ход идет ручная интерпретация опытного специалиста.

Подобный путь внедрения системного анализа в практику интерпретации геополей в полевой геофизике предстоит пройти в ближайшие годы. И хотя некоторые процедуры (например, выделение аномалий разного порядка) формализованы, алгоритмическая интерпретация планируется пока в перспективе. Прежде всего, необходимо совершенствовать теорию и методологические основы системного анализа применительно к целевым задачам поисково-разведочных работ с поэтапным приближением к желаемому уровню. Настоящую работу следует рассматривать, как попытку авторов внести свой вклад в решение этой проблемы, которая более детально и обстоятельно освещена в [1] и частично в [2–4].

Структура модели интерпретации геополей. Данная модель представляет собой сложную систему из взаимодействующих элементов, совокупность которых можно условно объединить в несколько более мелких подсистем. Но это не просто набор элементов. В простейшем случае два информативных элемента (например, R и P) в своих

соотношения могут определить третий новый информативный элемент (например, V) в пределах одной подсистемы.

Для раскрытия смысла формируемой модели будем ориентироваться на целевые задачи поисков и разведки рудных залежей по данным гравиметрии и скважинной электро-разведки методом заряда. Например, сопоставив измеренное и определенное нормальное поле, получим аномальное поле. Часто оно в совокупности с измеренным и нормальным полем рассматривается как предмет исследований со своей подсистемой. При наличии данных нескольких методов подсистема предмета исследований включает сведения о соответствующих полях и аномалиях и может быть обозначена как $v(\bar{v})$. Подсистема, построенная из простых элементов, представляет категорию определенного содержания. Рассматриваемая структура процедуры моде-

ли интерпретации включает пять подсистем, которые называются по центральным категориям, определяющим их главные качества (рис. 1).

Помимо предметного начала цели $v(\bar{v})$ в левый структурный блок входит подсистема $A(\bar{v})$, объединяющая объекты исследований. Они могут быть представлены в виде выделенных с помощью управляющих операторов $P(\bar{z})$ контура аномалий от крупных неоднородностей геологического пространства, которые необходимо охарактеризовать физическими и геометрическими параметрами.

Аномальное поле является основой для декомпозиции с формированием иерархической структуры системы аномалий как на изучаемой площади, так и по уровням соотношений (конфигурации, знаку, интенсивности и другим признакам). При интерпретации обычно рассматривается система аномалий

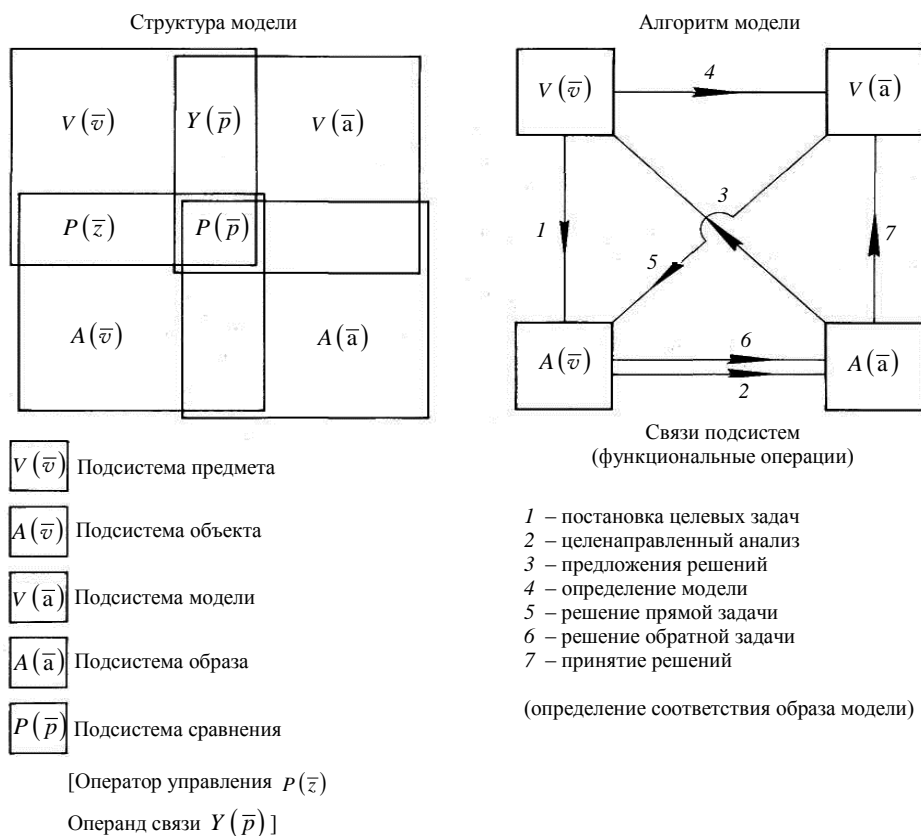


Рис. 1. Элементарная модель интерпретации геополей

в виде древовидной структуры, при которой всю совокупность аномалий можно разделить на две цепи (протяженные и локальные). Каждая из них в свою очередь имеет как минимум три подцепи (положительные, отрица-

тельные и знакопеременные) с последующим разделением по интенсивности (например, на сильные и слабые) и т. д. Задача системного анализа заключается в том, чтобы очертить границы проявления аномалий с их класси-

фикацией на несколько (например, 12) типов.

Интерпретация всегда ориентирована на выделение геологических объектов, типичных для изучаемых массивов. В рудных районах к ним относятся геологические тела различного генезиса, не затронутые околорудными процессами (тела магматических, осадочных и метаморфических пород), зоны тектонических нарушений и околорудных изменений, рудные ореолы и залежи. Эту совокупность геологических образований можно рассматривать как систему (подсистему) аномальных объектов (элементов подсистемы), способных возмущать геополя.

Необходимо иметь графические модели упомянутых объектов простейшей формы (уступ, пласт, сфероид и т. п.). Соответствующие им аномальные поля в профильном или площадном вариантах должны быть известны по результатам решения прямой задачи. Сформированная подсистема моделей, обозначаемая как $v(\bar{a})$, является обучающей выборкой при интерпретации выделенных аномалий. Примеры аномалиеобразующих объектов приведены в ряде монографий [5–7]. Элементы подсистемы $v(\bar{a})$ могут формироваться в процессе интерпретации, например способом подбора.

Центральное положение в структурной модели интерпретации отводится сопоставлению теоретических моделей аномальных объектов с выделенными аномалиями и геологическими образованиями, рассматриваемыми как неоднородности изучаемой среды. Подсистема сравнения $P(\bar{p})$ обеспечивает формирование подсистемы образов аномалиеобразующих объектов $A(\bar{a})$, отвечающих целевым установкам интерпретации. Правый блок структурной модели интерпретации отвечает за формирование образов объектов по характеристикам свойств вещества и полей. Так, при специализации по физическим свойствам этот блок соответствует содержанию физико-геологической модели, аппроксимирующей геологические объекты. Левый блок отвечает за изображение геологического пространства, раскрывает его организацию и упорядоченность. Он выражает формальный или неформальный поиск соответствия наблюдаемых полей избранной геологической концепции, а правый блок закрепляет его в принятом формализованном решении. Взаи-

модействие подсистем в структурной модели интерпретации отражает алгоритм этого процесса (рис. 1).

Алгоритм системной интерпретации геополей. Элементарный алгоритм системной интерпретации включает следующие составляющие: $v(\bar{v})$ – предметное начало цели; $A(\bar{v})$ – объекты исследований; $v(\bar{a})$ – выражение предмета исследований через пространственные модели с набором характеристик свойств; $A(\bar{a})$ – выражение образа предмета через характеристики, полученные при интерпретации геополей; $P(\bar{p})$ – сравнение последних подсистем посредством функциональных операций, доведенных до методик применения. Рассмотрим предметно работу алгоритма.

Постановка целевых задач (1). Отражает конкретное познание предмета и сущность исследований, раскрывая средства и ожидаемые результаты, а также связь между ними. Ставится одна задача или же последовательный набор задач с указанием или без указания приоритета последовательности решений (например, выявление рудных тел по данным гравиметрии на основе анализа карт остаточных аномалий или оконтуривание заряженной рудной залежи с последующим картированием геологических тел в околорудном пространстве с выделением образований с признаками оруденения по электроразведочным аномалиям).

Целенаправленный анализ (2). Отвечает операции достижения цели. Результат может быть описан характеристиками контуров рассматриваемых аномалий геополей в сравнительном сопоставлении или функциональной связи с характеристиками геологических тел (например, на гравиметровых картах среди остаточных положительных аномалий, превышающих тройную среднеквадратическую погрешность наблюдений поля, выделяются такие, которые по форме и размерам согласно целевой установке могут рассматриваться как перспективные на связь с рудными телами; или выделение аномального поля заряженной залежи, а также за его пределами контуров аномалий различного типа, которые можно связывать с относительно крупными геологическими образованиями различной протяженности и относительной электропроводности с признаками теоретических моде-

лей геологических тел).

Предложение решений (3). Фиксируется уровень решения поставленной задачи по определению типов аномалиеобразующих геологических тел (решена, не решена, требует уточнения), результат выражается средствами подсистем $A(\bar{v})$, $v(\bar{a})$ (например, рассмотреть те контуры гравиметровых аномалий, которые в условных границах согласуются с целевой установкой поставленной задачи поисков рудных тел, отвечающих минимально заданным их параметрам; или определить характерные точки аномальных полей заряженного тела и других разнотипных неоднородностей в околорудном пространстве для классификации объектов по относительной электропроводности и установления их границ).

Определение модели (4). Этой функциональной операцией, по сути синхронной с операцией 1, производится воплощение геологической модели в специализированную по изучаемым свойствам модель $v(\bar{a})$. При этом 1 исходит из общеметодологических установок, а 4 согласуется с конкретной ситуацией решения поставленной задачи, связывая предпосылки решения (анализ свойств) со средствами решения и возможностями описания геологической модели характеристиками ее свойств (например, для гравиметрии – установление резкой границы оруденений при определенной избыточной плотности рудных тел, максимально возможные их размеры по вертикали и горизонтали, глубина до верхней кромки, информативность априорной модели рудных тел по принципам аналогии; или для скважинной электроразведки – представление заряженного тела сфероидом или параллелепипедом с идеальной электропроводностью. Представление границы ореола околорудных изменений – контактом между объектами с различной электропроводностью, тектонических нарушений и даек – пластами с повышенной и пониженной электропроводностями соответственно и т. п.).

Решение прямой задачи (5). Эта функциональная операция связывает специализированные по свойствам геологические модели с соответствующим геополем. Предполагается связывать вероятностную геологическую модель с геополем, применяя способы качественного и количественного анализа и сравне-

ния изучаемых и теоретических аномальных полей, регламентируя их соответствие целевыми установками. Могут применяться ранее установленные теоретические модели или же формируемые в процессе интерпретации (способ подбора).

Решение обратной задачи (6). Этой функциональной операцией анализируемые аномалии связываются с образом предмета исследований $A(\bar{a})$ (например, рассчитывается масса образа геологической модели рудных тел по данным гравиметрии или устанавливаются признаки в электрическом поле границ геологических тел с аномальными электрическими свойствами).

Принятие решения (7). Эта функциональная операция проводится в итеративном режиме с применением средств решения обратной задачи и может содержать в себе альтернативные решения. Принимаемые модели образов геологических тел должны согласовываться с их теоретическими моделями и предметом исследований. Если пространственные характеристики модели и образа предмета исследований совмещаются с некоторой заранее заданной точностью, то можно говорить о принятии объективного решения (например, аномальный по плотности объект отвечает требуемым целевым характеристикам рудного тела или, напротив, его параметры не позволяют признать его промышленно ценным рудным телом; аналогичное положение может возникнуть при поисках руды при электроразведке с определением структуры рудного поля).

Элементарному представлению процесса интерпретации геополей можно придать следующее символическое и графическое (рис. 1) изображение:

$$[v(\bar{v}) \ 1 \ A(\bar{v}) \ 2, \ 6 \ A(\bar{a}) \ 3 \ v(\bar{v})] \\ 4 [v(\bar{a}) \ 5 \ A(\bar{v}) \ 2, \ 6 \ A(\bar{a}) \ 7 \ v(\bar{a})].$$

Появление процедуры 6 после 7 отражает итерационный процесс интерпретации и в конечном итоге процедура 7 является завершающей.

Пример интерпретации. Покажем применение рассмотренного алгоритма на примере интерпретации электрического поля заряда, помещенного в пересечение скважиной I сульфидной залежи на поисково-разведоч-

ном участке (Приполярный Урал). Исходное наблюдаемое поле в виде плана изолиний потенциала приведено на рис. 2. Для планшета имелись измерения вертикальной составляющей магнитного поля ΔZ . Целевыми задачами интерпретации являлись получение геометрических данных о пересеченной скважиной медноколчеданной залежи и выявление на исследуемой площади других геологических тел.

Наиболее информативна интерпретация по аномальному полю. Для его определения необходимо вначале вычислить нормальное поле погруженного точечного источника тока (заряда). Наиболее просто формализуется процедура, основанная на применении статистического способа для модели вмещающей двухслойной среды (наносы и коренные породы). По нескольким (в примере по шести) радиальным профилям с началом в эпицентре

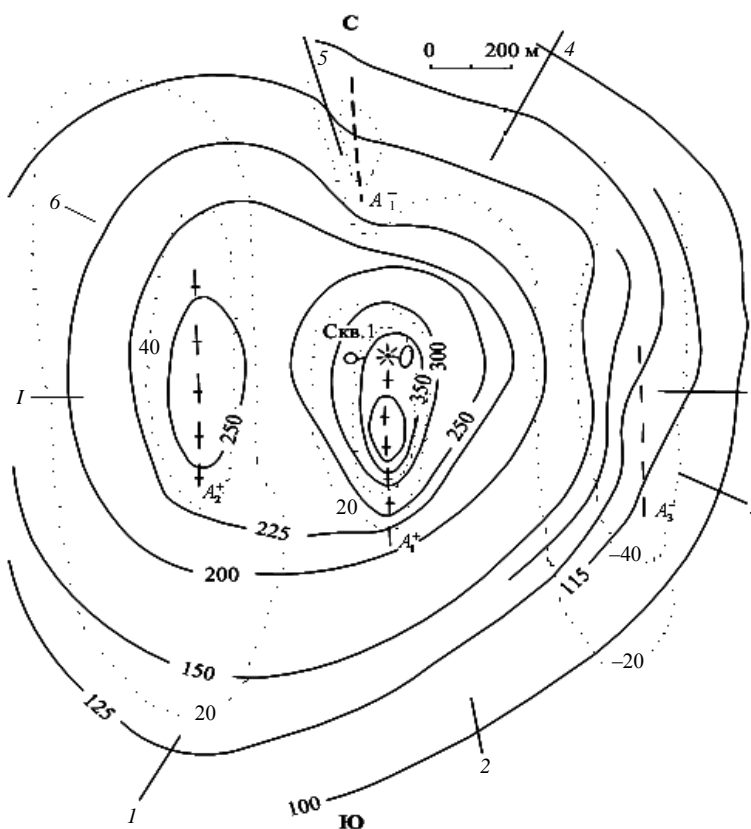


Рис. 2. План изолиний потенциала (сплошные линии) и его аномальной составляющей (пунктир), мВ, поля заряда, выполненного в пределах рудного оконтуривания скв. 1:
 A^+ , A^- – оси положительных (крестообразные линии) и отрицательных (штриховые линии) аномалий; 1–6 – радиальные профили; O – эпицентр заряда; 1–1 – линия геологического разреза

заряда O представляются кривые измеренного потенциала как зависимости от расстояния r до эпицентра и в упрощенном варианте находится их среднее значение. Осредняющая зависимость и рассматривается как функция нормального потенциала $U_{cp} = U_0(r)$. Пример определения нормального поля приведен на рис. 3, а. Процедура определения нормального, а затем аномального поля U_a может быть выполнена аналитически по простейшей программе. Измеренное, нормальное и аномальное электрическое поле (рис. 2) в со-

вокупности с измерениями магнитного поля рассматриваются как подсистема предмета исследований для решения целевых задач. Анализируются планы измеренного и аномального поля, а также графики этих характеристик по отдельным профилям.

Целенаправленный анализ полей заключался в определении контура аномалий и их типизации для индивидуальной интерпретации с учетом наложения возмущений от нескольких объектов. Наиболее надежно задача решается по аномальному электрическому

полю, хотя признаки влияния отдельных неоднородностей заметны и на плане изолиний измеренного потенциала (рис. 2). По изолиниям потенциала этих составляющих поля видно, что отчетливо проявляются 4 аномальных объекта ($A_1 - A_4$). Оси связанных с ними аномалий имеют меридиональное простира-

ние и частично показаны на рис. 2. График аномального потенциала по центральному широтному профилю $I-I$, на котором аномалии имеют наибольшую интенсивность, приведен на рис. 3, б.

Локальная положительная аномалия A_1^+ отражает влияние самого заряженного тела.

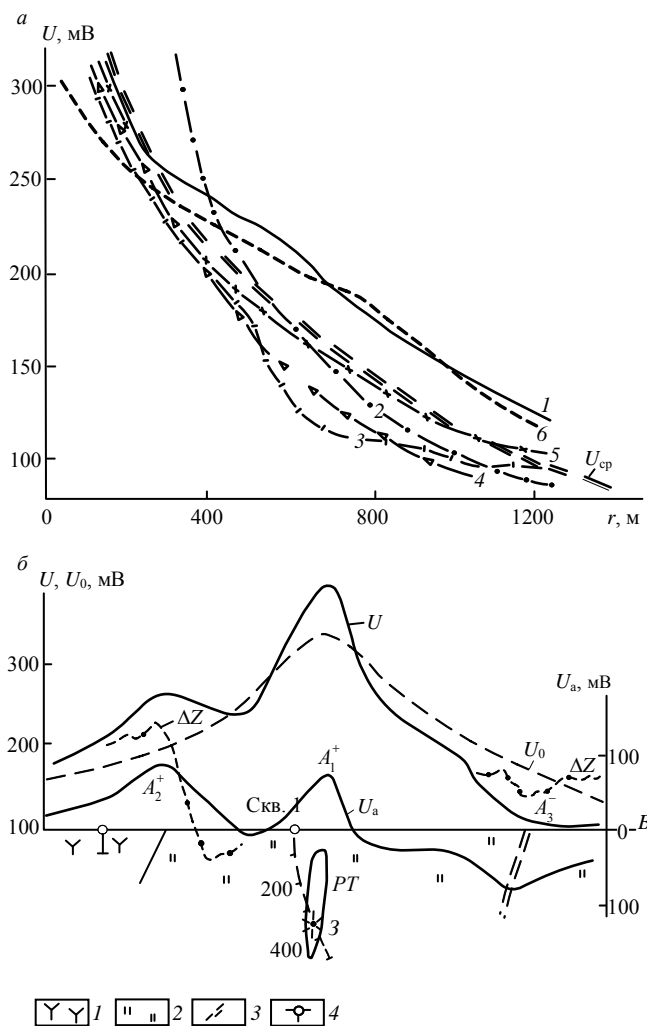


Рис. 3. Результаты обработки и интерпретации поля заряда в скважину 1 (исходные данные на рис. 2):

a – графики потенциала по системе радиальных профилей и осредняющая их кривая U_{cp} ; b – графики измеренного U , нормального U_0 и аномального U_a потенциала; фрагменты измерений магнитного поля ΔZ и геологический разрез по профилю $I-I$; 1 – субвулканические липарито-дациты; 2 – гидротермально измененные породы; 3 – разрывное нарушение; 4 – скважины; PT – рудное тело

Аномалии A_2^+ и A_3^- относятся к протяженным и на аномальном поле заметны по всей длине планшета съемки. Оси соответствуют участкам наиболее интенсивного проявления аномалий. Локальная аномалия A_4^- находится на северном продолжении аномалии A_1^+ .

Предложение решений относительно интерпретации отмеченных аномалий основано

на обращении к типовым аномалиям для моделей различных геометрически правильных тел с аномальными электрическими свойствами (заряженные в различные точки проводники разнообразной формы, контакты, пласты, незаряженные проводники и т. п.) [7]. Типовые аномалии изучены путем решения прямой задачи аналитическими способами

или путем физического моделирования.

Принятие решения относительно аномалии A_1^+ сводится к получению информации о пространственном положении заряженного тела. По виду аномального поля с локальными экстремумами на линии меридиана тело имеет субвертикальное падение и меридиональное простирание со склонением на север (южный экстремум имеет значения выше, чем северный). Экстремумы соответствуют проекциям выклинок рудной залежи, длина ее около 600 м. Большая часть рудного вещества расположена выше заряда (об этом свидетельствует положительное аномальное поле над эпицентром заряда (см. рис. 3, б).

Аномалия A_2^+ связывается с влиянием контакта (с наклоном на запад) среды более высокого удельного сопротивления, чем среда с заряженным телом. Превышение приблизительно в 6 раз (согласно теории оно равно $(1 + K)/(1 - K)$), а над контактом $K = U_a / U_0$). По всем признакам этот контакт является границей субмеридиональной зоны гидротермально измененных пород, встреченных скважиной 1, с субвулканическим массивом (данные картировочной скважины). Это решение подкрепляется аномалией магнитного поля, типичной для контакта. Над осветленными околорудными породами с признаками выщелачивания темноцветных минералов наблюдается отрицательная ветвь аномалии ΔZ .

Аналогичным образом принимаются решения относительно аномалий A_3^- и A_4^- . Первая из них связывается с протяженным тектоническим нарушением пластообразной формы (подтверждается отрицательной аномалией ΔZ), а вторая – с началом зоны повышенной электро-

проводности, изолированной от заряженного тела и уходящей на север за пределы планшета съемки. Впоследствии в пределах A_4^- установлена повышенная сульфидизация пород.

Таким образом, в интерпретации геополей сложились методологические установки, в систематике которых применяются качественные и количественные способы с теоретическими основами, заложенными в методах сравнения и аналогии, в решениях уравнений математической физики, в статистических обобщениях и в вероятностных сопоставлениях структуры геополей и вещественных неоднородностей. Последние объекты отражаются в априорных и апостериорных концептуальных моделях при решении прямых и обратных задач с двувальтернативной и многоальтернативной постановками и решениями.

При описании моделей полей и вещественных неоднородностей по отдельным свойствам, комплексам и комбинациям свойств целесообразно использовать однотипные геометрические характеристики, определяющие пространственное положение и структуру геологических тел и соответствующих им контуров полей. Весь же процесс геологической интерпретации следует привести в системно-единообразный вид, отраженный алгоритмом интерпретации геополей, применение которого реализуется в организации процесса формализованного решения частных задач и структурировании изучаемой геологической системы. Ближайшей проблемой является разработка машинных способов определения по аномальным геопольям границ геологических объектов, нарушающих условно однородную вмещающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов А. М. Система изучения геополей при поисках колчеданных месторождений на Южном Урале: автореф. дис. ...д-ра геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГИ, 1992. 42 с.
2. Виноградов А. М. О признаках упорядоченности геополей при изучении структуры геологических тел // Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 10. С. 45–53.
3. Виноградов А. М. К методике оценки информативности геологических тел // Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 5. С. 90–98.
4. Виноградов А. М., Сапожников В. М. О методологических установках интерпретации геополей // Изв. УГГУ. 2013. № 2 (30). С. 5–14.
5. Виноградов А. М. Геополья и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН. 2004. 185 с.
6. Сапожников В. М. Комплексование геофизических полей: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 76 с.
7. Электроразведка рудных полей методом заряда / М. В. Семенов [и др.]. Л.: Недра, 1984. 216 с.

Поступила в редакцию 4 декабря 2013 г.

Виноградов Альберт Михайлович – профессор кафедры геофизики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Сапожников Вадим Михайлович – профессор кафедры геофизики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: elrswm@ursmu.ru