

УДК 550.83

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным

А.А. Яковлева, И.Б. Мовчан, Д.К. Мединская, З.И. Садыкова[✉]

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ s205007@stud.spmi.ru

Аннотация

Актуальность исследования связана с необходимостью развития прикладного алгоритма комплексной интерпретации разнородных геофизических данных на основе унифицированной физической аналогии, ориентированной на решение обратной задачи теории потенциала. Волновая аппроксимация разреза горного массива укладывается в парадигму диссипативного структурирования неравновесных сред и выступает частным случаем означенной аналогии. Задача исследования состоит в адаптации указанного алгоритма к пересчетам как потенциальных, так и непотенциальных геополей. Среди последних наиболее интересны данные нерегламентированного доступа (дистанционная основа, цифровая модель рельефа). Практическая значимость изысканий связана с апробацией семейства алгоритмов в производственных проектах как геолого-поискового, так и инженерного характера. **Цель** исследования сводится к минимизации семейства эквивалентных решений обратной задачи за счет взаимной верификации разнородных моделей аномалеобразующего источника. **Объекты:** развитие алгоритма комплексной количественной интерпретации и пересчеты геополей в глубину при трассировании элементов разрывной тектоники и элементов стратификации. **Методы** исследования сформированы программно-алгоритмической разработкой, в основе которой лежат детерминированные аналитические представления, включающие вычисление интеграла типа Коши, итерационное обращение к решению прямой задачи, спектральные оценки. **Результаты** исследования включают набор параметрических разрезов, выведенных при пересчетах в условиях минимума априорной геологической информации с сопутствующим анализом структуры данных разрезов. Комплексование графических визуализаций аналитического продолжения, особых точек и результатов автоматизированного подбора позволяет с высокой надежностью реконструировать геоструктурный образ в плоскости параметрического разреза. Расширение этих методов посредством волновых аппроксимаций включает применение квазисейсмических полутонных визуализаций, верифицирующих отмеченные реконструкции.

Ключевые слова: Интерпретация, аналитическое продолжение, сингулярность, минимизация функционала, волновая аппроксимация, градиентные фильтры.

Благодарности: Статья посвящается памяти Александра Алексеевича Елисеева, старейшего представителя отечественной геофизической школы, связавшего десятилетия своей жизни с развитием общей концепции и технологии бесконтактного неразрушающего контроля, в частности, применительно к трубопроводной инфраструктуре. Будучи представителем трудового коллектива крупнейшего во времена СССР производственного объединения ВИРГ «Рудгеофизика», Александр Алексеевич Елисеев смог привнести в технологию неразрушающего контроля и в способы количественной интерпретации его данных системный подход, внедрить применение физических аналогий и реализовать предлагаемую авторами данной статьи стройную концепцию комплексирования методов решения обратной задачи теории потенциала.

Для цитирования: Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным / А.А. Яковлева, И.Б. Мовчан, Д.К. Мединская, З.И. Садыкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 198–215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

UDC 550.83

DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

Quantitative interpretations of potential fields: from parametric to geostructural recalculations

A.A. Yakovleva, I.B. Movchan, D.K. Medinskaia, Z.I. Sadykova✉

Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, Russian Federation

✉ s205007@stud.spmi.ru

Abstract

The relevance. Need to develop an applied algorithm for combined interpretation of heterogeneous geophysical data based on unified physical analogy, focused on solving the inverse problem of potential theory. The wave approximation of the cross-section of mining massif fits into the paradigm of dissipative structuring of nonequilibrium media acts as a special case of the above analogy. The task of the study is to adapt this algorithm to recalculations of both potential and non-potential geofields. In the list of nonpotential geofields the remote sensing data and digital terrain model are the most interesting as the data with non-regulated access. Practical significance of the research is associated with the approbation of a family of algorithms in production projects of both geological and engineering nature. **The aim.** To minimize the family of equivalent solutions to the inverse problem by mutual verification of heterogeneous models of the anomaly-forming source. **The objects.** Development of the geofields combined interpretation algorithm and recalculation of geofields in depth for tracing elements of stratification and geological fractures. **The methods.** Formed by software and algorithmic development, which is based on deterministic analytical representations: computation of Cauchy integral, iterative application of direct solution, spectrum estimation. **The results.** Reduced to the set of parametric cross-sections derived with recalculations with minimum a priori geological information with final geological consideration. The combination of visualizations of analytical continuation, singular points and results of automated fitting admits the reconstruction of geostructural model of parametric cross-section with significant reliability. Extension of standard methods of quantitative interpretation by means of wave approximations includes quasi-seismic half-tone visualizations verifying the mentioned reconstructions.

Keywords: Interpretation, analytical continuation, singularity, functional minimization, wave approximation, gradient filters.

Acknowledgements: The article is dedicated to the memory of Alexander A. Eliseev, the oldest representative of the Russian geophysical school. Decades of his life were related to development of a general concept and technology of non-contact non-destructive testing, in particular, in relation to pipeline infrastructure. As a representative of the workforce of the largest industrial association VIRG "Rudgeophysics" in Soviet times, Alexander A. Eliseev was able to introduce a systematic approach to the technology of non-destructive testing and methods of quantitative interpretation of its data, introduce the use of physical analogies and implement the coherent concept proposed by the authors of this article for integrating methods for solving inverse problems of potential theory.

For citation: Yakovleva A.A., Movchan I.B., Medinskaia D.K., Sadykova Z.I. Quantitative interpretations of potential fields: from parametric to geostructural recalculations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 198–215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

Введение

В количественной интерпретации геофизических полей имеет место неадекватное восприятие специалистами-геологами параметрических разрезов, получаемых при решении обратной задачи теории потенциала. В условиях оперирования геологами набором представительных эмпирических классификаций геолого-структурных образов решение обратной задачи не обеспечивается означенными специалистами начальными приближениями: имеет место дефицит или отсутствие данных бурения, геологический объект преимущественно гипотетичен, геологическая основа подчас ограничена

малыми масштабами. На этом фоне пересчет геофизического поля с поверхности наблюдений в объем горного пространства опирается на три подхода:

- 1) подбор наблюдаемого поля посредством решения прямой задачи в условиях детерминированной физико-геологической модели (ФГМ), опирающейся на ансамбль априори сформированных разрезов и сопровождающей доступную для анализа геологическую основу;
- 2) аналитическое продолжение геофизического сигнала с поверхности наблюдений в глубину на основе спектральных узкополосных фильтров с

получением глубинного образа этого сигнала, фиксирующего геологические неоднородности в обобщенной форме;

- 3) оценку генерализованных физико-геометрических характеристик семейства дискретных моделей геологических неоднородностей в объеме горного массива или в плоскости его разреза по первичной и квазинепрерывной функции геофизического сигнала.

Под «физико-геологической моделью» в пункте «А» понимаем «упорядоченную совокупность физических характеристик объекта геолого-геофизического исследования» [1], где достоверность задания определяется полнотой априорной геологической информации. Даже при обеспеченности материалами бурения эти априорные сведения нельзя считать «строгими» представительными из-за их дискретности и обобщения специалистом-геологом на уровне умозрительно-концептуальной интерполяции. Под «обобщенной формой» в пункте «Б» подразумевается графическая визуализация глубинного образа геофизического сигнала в виде его изолиний (в плоскости разреза) или его изоповерхностей (в трехмерной блок-диаграмме) [2–4]. Определение «дискретных моделей» в пункте «В» относит нас к заданию в окрестности отдельных экстремумов геофизического измеренного сигнала тел упрощенной геометрии, аппроксимирующих структурно-вещественные неоднородности геологической среды и классифицируемых в геофизике по двум группам: структурные и рудные модели. В условиях геологического континуума ансамбль данных тел обладает выраженной дискретизацией [5], а в условиях минимума априорной геологической информации [6, 7] выбор геометрии этих тел произволен. Очевидной представляется неразрешимость принципиального несоответствия концептуальных геологических построений и форм визуализации решений в количественной интерпретации на фоне перманентной востребованности обратной задачи в производственных проектах.

Реализуя универсальный в геофизике принцип комплексирования, комбинируем разные подходы к решению обратной задачи теории потенциала [8, 9] в надежде, что в семействе модельных образов, маркирующих детерминированную геологическую неоднородность, проявится выраженная пространственная корреляция. К таковым модельным образам относим:

- сингулярности (малые объемы горного массива, где теряется потенциальный характер исследуемого геофизического сигнала);
- тела простейших форм (диполи, материальные отрезки, особые точки как маркеры угловых точек контуров геологических тел);
- глубинный образ геофизического сигнала, трансформированный набором анизотропных фильтров [10, 11].

Комплексирование перечисленных моделей не должно носить исключительно эмпирический характер, для чего актуальной оказывается разработка универсальной физической аналогии, верифицирующей решение обратной задачи теории потенциала любым из известных методов. Подсказку здесь находим в применимости спектральных преобразований любого пространственного сигнала на фоне противоречия двух фактов:

- спектральные пересчеты в геофизике означают апелляцию к аналогиям из волновой оптики;
- большинство геофизических пространственных сигналов (за исключением сейсмических и электромагнитных) явной волновой природы не имеют.

Данное противоречие разрешено в парадигме О.В. Петрова о волновом структурировании неравновесного геологического пространства. Согласно этой парадигме, геологическая содержательность спектральных преобразований (фильтрации, аналитических продолжений) гетерогенных геополей означает наличие в структуре первичного (геологического) источника закономерных длин волн, реализацию регулярных в пространстве и во времени процессов [12]. Продолжительность этих регулярных (волновых) процессов оказывается много больше продолжительности процессов сейсмического и сейсмологического характера, что проявляется в форме:

- временной регулярности смен режимов трансгрессии и регрессии;
- временной регулярности периодов тектономагматической активизации;
- пространственной регулярности распределения син- и антиформ на поверхности раздела гетерогенных структурно-вещественных комплексов;
- увеличения длины волны ансамбля син- и антиформ при росте глубины залегания означенной поверхности раздела (аналогия со скин-эффектом в волновой оптике);
- полигональных конфигураций пространственно регулярных геоблоковых структур (аналогия со стоячими волнами в неравновесном плоском слое жидкости).

Методической основой при описании указанных эффектов выступает разложение геополей в ряды разного типа, полиномиальные аппроксимации геополей, а также цепные дроби в комбинации с градиентными и интегральными операторами. На их основе авторами развита библиотека алгоритмов, обобщающих апробированные в современной геофизике методы решения обратной задачи. Спектральные функции и способы анализа, в частности функция автокорреляции и методики С.А. Серкерова в обработке геофизических сигналов, адаптированы нами к парадигме О.В. Петрова. Развитие в аэрокосмогеологии и в нефтегазовой отрасли способов глубинного пересчета непотенциальных геополей, таких как поля плотности линеаментов [13–15] и цифровой модели земного рельефа [16, 17], поз-

волило в рамках той же парадигмы О.В. Петрова реализовать спектральные оценки полей, не имеющих строго заданных энергетических характеристик.

Комплексирование стандартных моделей глубинного пересчета

Аналитическое продолжение на глубину H как основа структурно-геологических построений в методах количественной интерпретации связано с

пересчетом потенциального сигнала $F(x)$ в спектр $S(\omega, 0)$ и с окончательным преобразованием этого спектра $S(\omega, H) = S(\omega, 0)P(\omega, H)$ с вовлечением передаточной функции вида:

$$P'(\omega) = 1 + \cos(\omega x / N),$$

где N – число пикетов на профиле, в которых задано потенциальное поле (рис. 1) [18–20].

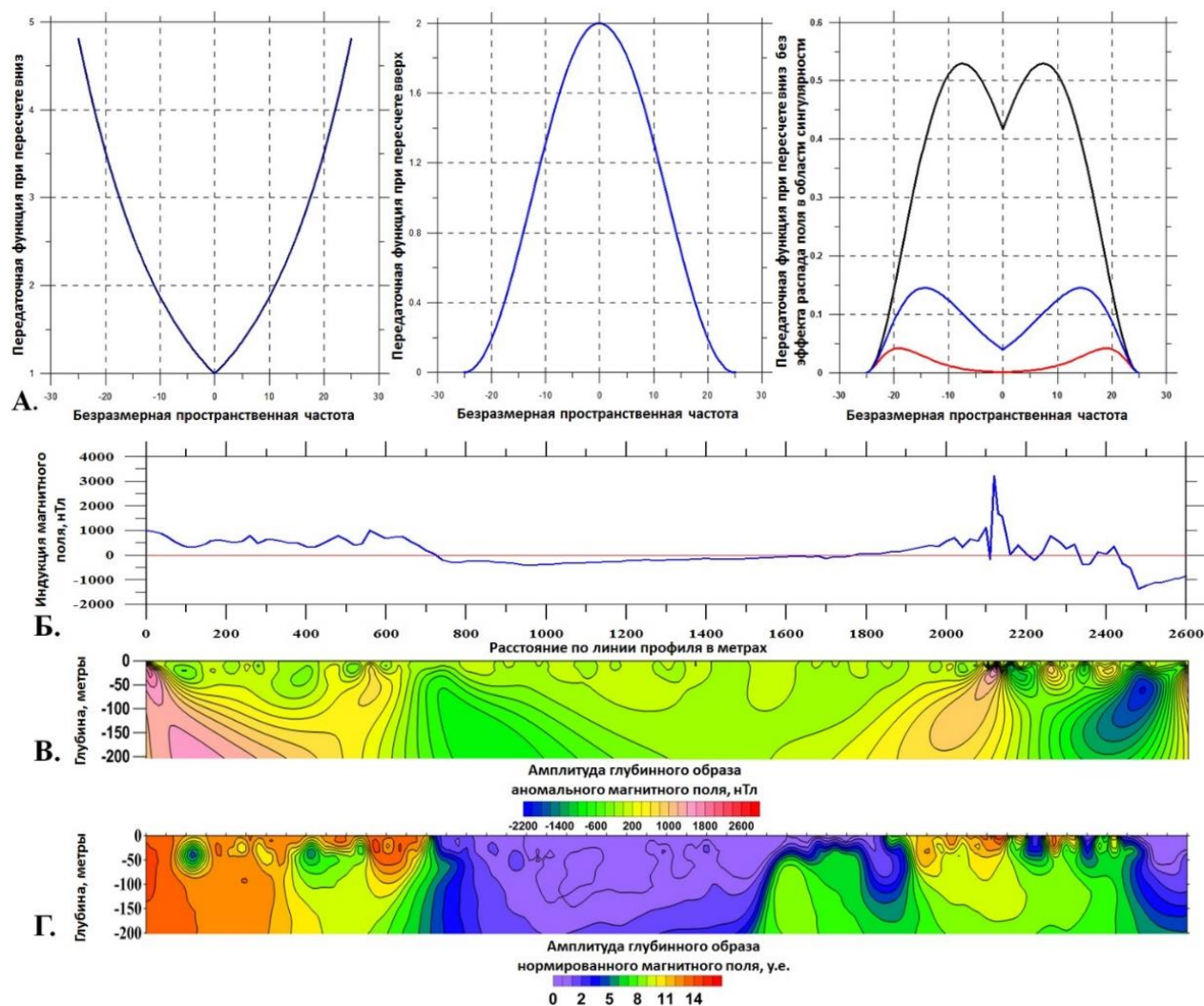


Рис. 1. Стандартная методология аналитического продолжения потенциального геополя в нижнее полупространство, дополненная регуляризующей процедурой выметания сингулярностей: (А) передаточные функции фильтров (слева направо) – аналитического продолжения сигнала на фиксированную глубину, аналитического продолжения сигнала на фиксированную высоту, аналитического продолжения в заданный диапазон глубин; (Б) график аномального магнитного поля вдоль линии профиля; (В) результат пересчета модуля индукции магнитного поля в объем горного массива на основе крайней правой передаточной функции в рис. 1, А [21]; (Г) результат пересчета модуля индукции магнитного поля в объем горного массива на основе метода цепных дробей К.М. Ермохина [22] с применением алгоритма И.Б. Мовчана [21]

Fig. 1. Standard methodology for analytical continuation of a potential geofield into the lower half-space, supplemented by a regularizing procedure for sweeping out singularities: (A) transfer functions of filters (from left to right) – analytical continuation of a signal to a fixed depth, analytical continuation of a signal to a fixed height, analytical continuation to a given depth range; (B) graph of the anomalous magnetic field along the profile; (B) the result of recalculating the magnetic field induction module into the volume of the rock mass based on the rightmost transfer function in Fig. 1, A [21]; (Г) the result of recalculating of the magnetic field induction modulus into the volume of rock mass based on the continued fractions method by K.M. Ermokhin [22] using the algorithm by I.B. Movchan [21]

Задача сводится к конструированию семейства узкополосных фильтров, формирующих в пределах полосы пропускания куполообразную передаточную функцию $P(\omega, H)P'(\omega)$, исключающую δ -образное обнуление Фурье-спектра потенциального поля на границах полосы [23]. По мере роста глубины аналитического продолжения экстремум передаточной функции смещается от высоких частот к низким при окончательной стандартизации разноточных составляющих аналитически пересчитываемого геополья. Как указано во введении, содержательность итоговых параметрических разрезов объясняем волновой природой структурирования объема горного массива, формирующего аномалии во всех геолого-геофизических сигналах, инвариантно к природе сигналов [24]. Измеренные геофизические поля часто характеризуются ограниченной выборкой, в связи с чем аналитическое продолжение предпочтительно реализовывать в предметной плоскости. Измеренный сигнал преобразуем в скалярное поле «нормированного градиента», распределенного в плоскости параметрического разреза [25, 26]:

$$G^n(x, z) = \frac{G(x, z)}{G(x)} = \frac{\sqrt{U_x^2 + U_z^2}}{\left(\sum_{i=0}^m \sqrt{U_{xi}^2 + U_{zi}^2}\right) / m}. \quad (1)$$

Здесь U_x и U_z – первые производные по горизонтальной оси наблюдений x и вертикальной оси глубин z , взятые от наблюдаемого сигнала U , раскладываемого в ряд Фурье, при конечном числе его членов, составленных нечетными функциями:

$$U(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \exp\left(\frac{\pi n z}{L}\right) P_{n,m}, \quad (2)$$

где

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L U(x, 0) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx, \quad P_{n,m} = \left(\frac{\sin(\pi n / N)}{\pi n / N}\right)^m$$

при $m = 2$.

На практике технологию аналитического продолжения геофизического сигнала пытаются применить к подобным пересчетам непотенциальных полей, например, к цифровой модели рельефа (ЦМР) и поля оптической плотности дистанционной основы (ДО). В обоснованиях отталкиваются от функциональной связи рельефа и гравитационного поля в рамках известных поправок, а также модели изостатической компенсации. Переход к ДО осложнен различного рода экзогенными факторами [27], что компенсируется при пересчете трансформацией квазинепрерывного поля оптической плотности ДО в дискретное поле линеаментов. Применяя к ансамблю линеаментов подсчет их плотности в скользящем окне шириной L , этот па-

раметр определяют как показатель проницаемости горного массива к фиксированной глубине $H = L/\sqrt{2}$. Существует альтернатива продолжениям полей (1), (2): метод цепных дробей К.М. Ермохина [28], предлагающий аппроксимацию измеренного геополья $U(x)$ на интервале $a \leq x \leq b$ полиномом Чебышева первого рода:

$$f(x) \approx \sum_{k=0}^{\infty} c_k T_k(x),$$

при $T_k(x) = \cos(k \arccos(x))$, а именно:

$$T_k(x) = \operatorname{Re}[\exp(ik \arccos(z))].$$

Здесь $\exp(ik \arccos(z)) = z - i\sqrt{1 - z^2}$, $z = x + iy$, x – ось измерительного профиля, y – ось глубин. Обозначая $Y^k = \exp(ik \arccos(z))$, имеем $f(x) = \operatorname{Re}(F(Y))$. Аналитический пересчет геополья $f(x)$ в объем горного массива связан с заменой отмеченного ряда цепной дробью общего вида

$$F(Y) \approx \frac{a_0 Y^{k_0}}{1 + (a_1 Y^{k_1}) / [1 + (a_2 Y^{k_2}) / [1 + (a_3 Y^{k_3}) / \dots]]},$$

где a_j – вещественные коэффициенты; k_j – целые положительные числа. В отличие от традиционных глубинных пересчетов, метод цепных дробей даёт параметрические разрезы более дифференцированной структуры, допускающей подсечение нижней кромки геологической неоднородности, определение элементов её залегания и эффективного объема. Во всех рассмотренных вариантах аналитического продолжения квазинепрерывной структуре первичного сигнала ставится в соответствие континуальный образ параметрического разреза.

В случае значимой дискретизации этого сигнала и малой выборки его значений решение обратной задачи может сводиться к определению позиции особых точек (сингулярностей) геополья на основе интеграла типа Коши [29, 30] (рис. 2):

$$g(\sigma) = \int_{\Omega} \frac{U(\tau) d\tau}{(\tau - \tau_0)^\sigma}, \quad (3)$$

$$g(\sigma) \approx 2\pi M (\tau_k - \tau_0)^{-(\sigma+s)} \sigma^s \left(1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_j}{\sigma^j}\right),$$

где $U(\tau)$ – результат аналитического продолжения в область Λ , представляющую собой пересечение геологического полупространства и круговой палетки с радиусом $R = |\tau - \tau_0|$ и геометрическим центром в точке $\tau_0 = x_0 - ih$. Здесь x_0 – проекция геометрического центра палетки на профиль; h – высота этого центра над дневной поверхностью [31, 32]; $\tau = x + iz$ – текущая координата по профилю с учетом абсолютных высот z земного рельефа; τ_k – комплексная координата особой точки; M и s – мощность и тип особой точки; σ – вещественный пара-

метр регуляризации. Измеренный сигнал полагается потенциальной функцией, энергетическая характеристика которой имеет одну из двух форм:

- гравитационный потенциал:

$$U(z) = \sum_{k=1}^n \frac{\bar{\alpha}_k}{\rho} (\ln(z - a_k) - \ln(z - b_k)); \quad (4)$$

- магнитный потенциал:

$$V(z) = \frac{J}{G\rho} \frac{\partial U}{\partial z} = \sum_{k=1}^n A'_k \left(\frac{1}{z - a_k} - \frac{1}{z - b_k} \right). \quad (5)$$

При расчете интеграла (3) оцениваем промежуточные функции $\Psi_1 = \frac{g(\sigma-1)}{g(\sigma)}$ и $\Psi_2 = \frac{g(\sigma)}{g(\sigma+1)}$, определяющие характеристические параметры сингулярности:

- тип особой точки:

$$s = \sigma^2 \left(\left| \frac{\Psi_2}{\Psi_1} \right| - 1 \right);$$

- позиция особой точки ($\tau_k = \rho \exp(i\varphi)$):

$$\rho = \left(1 + \frac{s}{\sigma} \right) \sqrt{|\Psi_1 \Psi_2|},$$

$$\varphi = (\arg \Psi_1 + \arg \Psi_2) / 2;$$

- мощность особой точки (ее магнитный момент):

$$M = \frac{1}{2\pi\sigma^s} |g(\sigma)| \rho^{(\sigma+s)}.$$

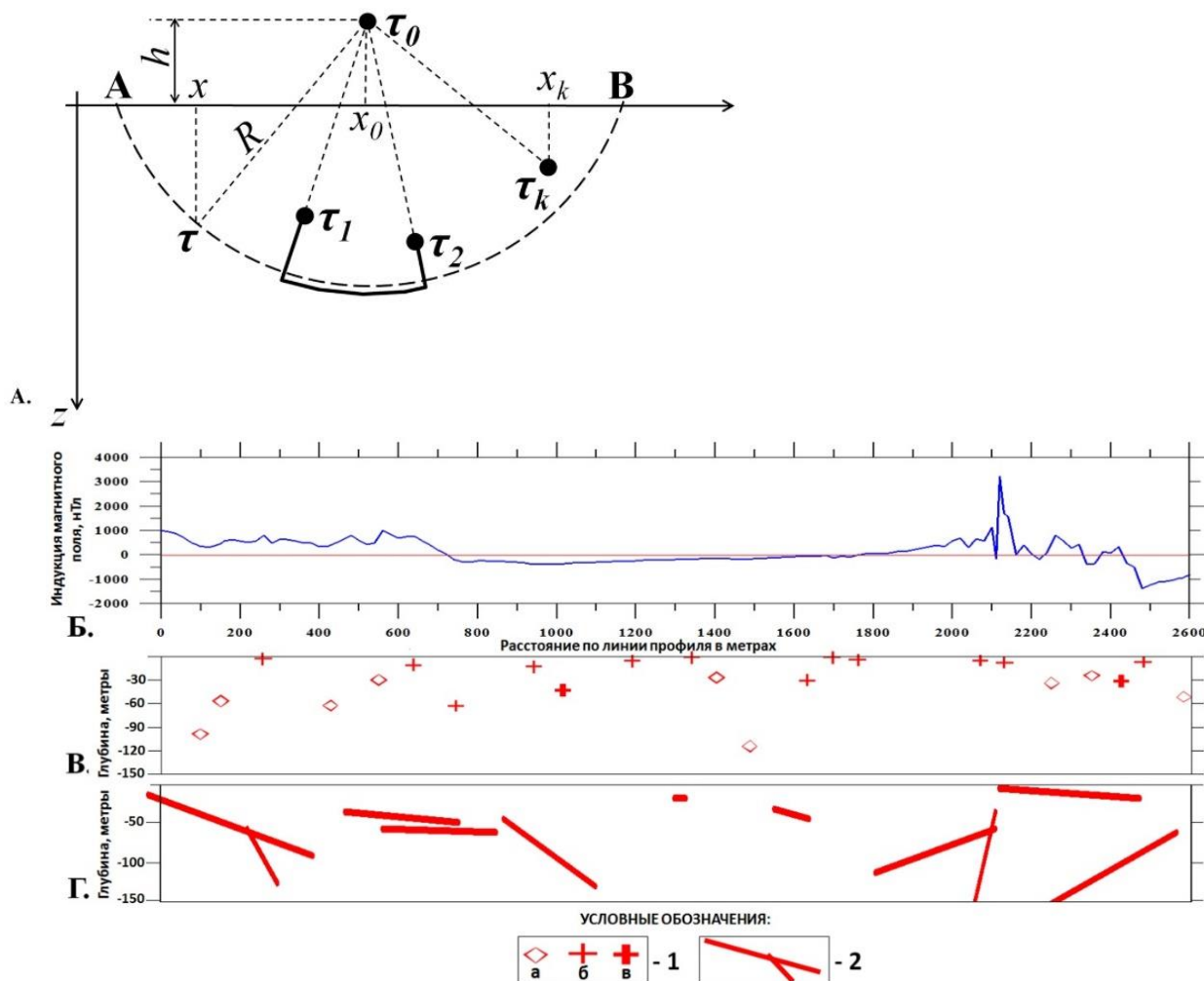


Рис. 2. Глубинный пересчет потенциального геополя на основе дискретных моделей: (А) общий образ скользящей палетки на интервале интегрирования АВ [33]; (Б) график аномального магнитного поля; (В) результат пересчета потенциального геополя в распределение сингулярностей разного типа; (Г) подбор распределения диполей (намагниченных пластов) методом Циркульского. Условные обозначения: 1 – сингулярности (а – центр сферы; б – верхняя кромка вертикального диполя; в – верхняя кромка уступа), 2 – пласты, намагниченные по падению

Fig. 2. Depth recalculation of a potential geofield based on discrete models: (A) general image of a sliding palette on the integration interval АВ [33]; (B) graph of an anomalous magnetic field; (B) the result of recalculating the potential geofield into distribution of singularities of various kinds; (Г) fitting the dipoles distribution (magnetized layers) by Tsirkulsky method. Legend: 1 – singularities (а – sphere center; б – upper edge of vertical dipole; в – upper edge of ledge), 2 – dip-magnetized layers

Картируемое в плоскости разреза облако сингулярностей отображает приповерхностные породные комплексы с максимальным содержанием ферромагнитной фракции, а также линейные крутопадающие зоны, гипотетически относимые к элементам разрывной тектоники [34]. Геоструктурный образ пытаемся верифицировать подбором модельных полей материальных или намагниченных пластов (рис. 2). Критерием близости наблюдаемого и модельного полей служит квадратичный функционал невязки [35]:

$$F(N, \vec{p}) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M (\varrho(N, \vec{p}, x_i, y_i) - U_{ij})^2, \quad (6)$$

где (x_i, y_i) – координаты пикетов на площади проведения измерений; N – число материальных/намагниченных пластов; \vec{p} – вектор параметров подбираемых намагниченных или материальных пластов. При минимизации функционала F осуществляется многократное (итерационное) обращение к решению прямой задачи по каждому из пластов. В графике зависимости F от номера итерации решению обратной задачи отвечает глобальный минимум. Немонотонность стремления к глобальному минимуму квадратичного функционала невязки предполагает возможность ложного решения, удовлетворяющего локальному минимуму функционала (6) и ложному геоструктурному образу. Основу применения моделей материальных или намагниченных пластов составляет представление гравитационного потенциала, подобное (3):

$$U(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_L \frac{\varphi(\xi) d\xi}{\xi - z},$$

где L – замкнутый контур геологического тела ($L \in D$, D – ограниченная односвязная область). Функция $U(z)$ распадается на две: $U^+(z)$, аналитическую внутри L , и $U^-(z)$, аналитическую за пределами L , при $U^+(\xi) - U^-(\xi) = \varphi(\xi) \quad \forall \xi \in L$, а для круга конечного радиуса R , внутри которого расположен контур L , $U(z)$ раскладывается в ряд Лорана

$$U(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{(z-a)^{k+1}}.$$

В задаче вводят функцию $z(t)$ конформного отображения области D на единичный круг T с границей L_1 , на которой

$$\overline{z(t)} = \sum_{i=1}^{\infty} (\alpha_i / t^i) \quad \forall t \in L_1.$$

Интегральное уравнение теоретической обратной задачи записывается в форме:

$$\rho \overline{z(t)} = - \frac{1}{2\pi i} \oint_{L_1} \frac{U(z(\tau))}{\tau - t} dt. \quad (7)$$

Решая (7), обращаемся к логарифмическому классу потенциалов, подобному (4) и (5). При этом, как отмечалось, организуем итерационный процесс: задаём начальное приближение в форме горизонтальных пластов в окрестности точек максимума магнитного или гравитационного поля; чередуем решение прямой задачи от семейства материальных или намагниченных пластов с оптимизацией параметров пластов по алгоритму скорейшего спуска. Сопоставление параметрических образов на рис. 1, B , Γ и рис. 2, B , Γ приводит нас к представлению в плоскости разреза мульды проседания с заметно раздробленными флангами (рис. 3).

Несколько отходя от формальной и методической направленности настоящей статьи, заметим принципиальный элемент геологической интерпретации, отражённый на рис. 3. Здесь дана в обобщенной форме геологическая основа опытного полигона, где актуальность представительной глубинной реконструкции определялась золотоносностью структурно-вещественных комплексов в окрестности гранитных интрузий. В пределах исследуемой площади примечательно формирование означенной интрузии в стороне (на дистанции 0,5–1,0 км к югу) от регионально-го дизъюнктива, отраженного на рис. 3, A .

Волновая аппроксимация параметрического разреза

Как можно видеть, даже на весьма ограниченной по площади геологической схеме, данный региональный дизъюнктив, несмотря на отмеченную в рис. 3 сложную его кинематику, имеет в окрестности опытного полигона выраженную сдвиговую компоненту. Можно предположить формирование в окрестности данного сдвигового дизъюнктива сопряженных трещин скола и отрыва (локальных областей растяжения), по которым реализовывались интрузивные комплексы, а также миграция высокотемпературных растворов с последующей разгрузкой искомой золотосульфидной минерализации. Последняя ассоциирует с толщами Куземского комплекса, прихотливо обрамляющими картируемую в разные годы и в разных масштабах вулканогенную мульду. Применительно к решению обратной задачи по профилю, субортогональному сдвигу, можно было бы ожидать морфологического маркирования сдвиговой структуры: она, согласно [37], в разрезе отчетливо проявляется в форме цветочнообразных, вергентно-раскрываемых по мере движения из глубины к поверхности, сопряженных пликативных и дизъюнктивных дислокаций (так называемая, «flower structure» – «структура цветка», или «зона концентрированной деформации» [38]). В нашем случае длина профиля для такого маркирования мала, порядка 2,6 км, но тем не менее, как можно видеть из рис. 3, B , в затронутой реконструкцией части разреза угадывается вершина отмеченной зоны концентрированной деформации.

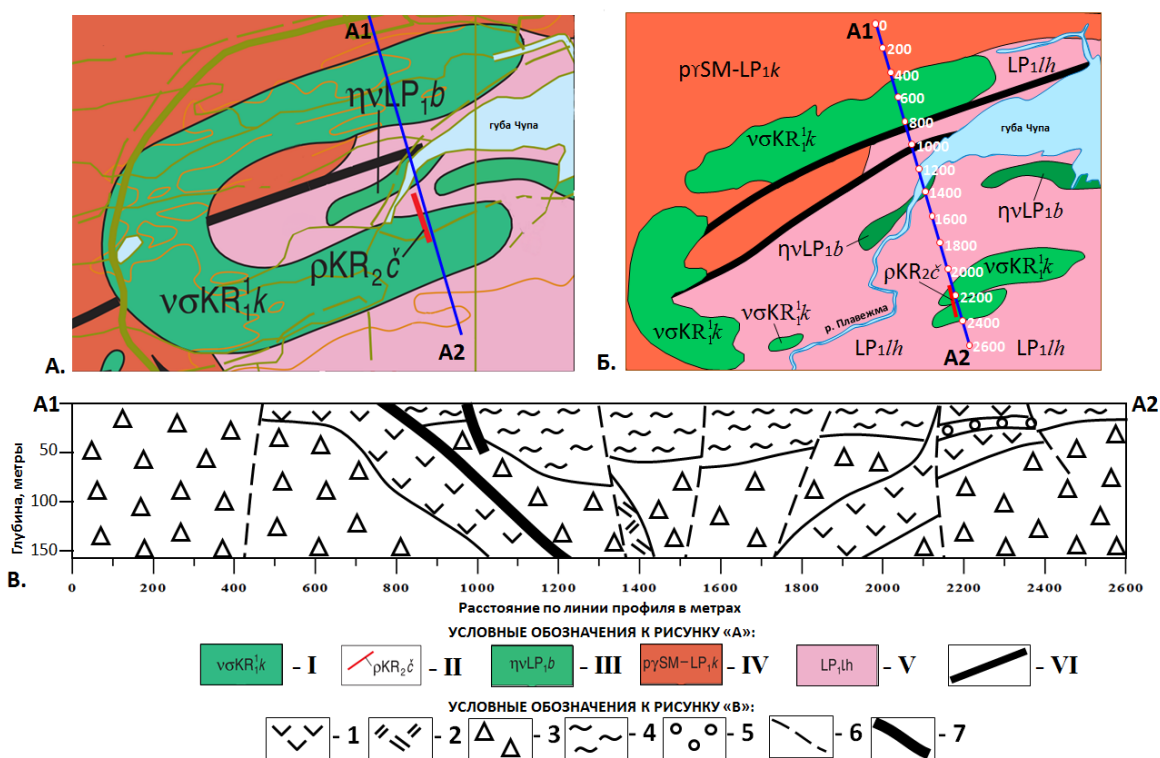


Рис. 3. Итоговая геоструктурная реконструкция разреза, образованная за счет комплексирования разных типов решения обратной задачи теории потенциала в окрестности губы Чупа (Карелия): А) исследуемая вулкано-генная мульда на геологической основе масштаба 1:200000 (согласно [36]). Условные обозначения: I – лерцолит-габброноритовый Куземский комплекс (ранний протерозой); II – гранит-пегматитовый Чупинский комплекс (ранний протерозой); III – перидотит-габбро-анортозитовый Боярский комплекс (поздний Архей); IV – мигматит-плагиогранитовый Котозерский подкомплекс (ранний-поздний Архей); V – гранат-биотитовые гнейсы Лоухской толщи (ранний-поздний Архей); VI – региональный дизъюнктив сложной кинематики (достоверный); Б) актуализированные контуры образований Куземского комплекса (ассоциированы с сульфидной медно-никелевой минерализацией со значимым содержанием платиноидов – маркированы розовыми тонами; В) реконструкция геоструктурного разреза вулкано-генной мульды по профилю А1–А2 (1 – область развития Куземского комплекса; 2 – возможное проявление Боярского комплекса; 3 – область залегания Котозерского комплекса (ассоциирован с керамическими и слюдяно-керамическими пегматитами); 4 – зона распространения Лоухской толщи; 5 – участок проявления образований Чупинского комплекса; 6 – приповерхностная разрывная тектоника со взбросово-сбросовой кинематикой, оперяющая региональный дизъюнктив – 7 с преимущественно сдвиговой кинематикой

Fig. 3. Final geostructural reconstruction of the section, formed by combining different types of solutions to the inverse problem of potential theory in the vicinity of Chupa Bay (Karelia): А) the studied volcanic trough on a geological basis at a scale of 1:200000 (according to [36]). Symbols: I – lherzolite-gabbro-norite Kuzemsky complex (early Proterozoic); II – granite-pegmatite Chupa complex (early Proterozoic); III – peridotite-gabbro-anorthosite Boyar complex (Late Archean); IV – migmatite-plagiogranite Kotozersky subcomplex (early-late Archean); V – garnet-biotite gneisses of the Loukhskaya Sequence (Early-Late Archean); VI – regional disjunctive of complex kinematics (reliable); Б) updated contours of layered formations of the Kuzemsky complex (associated with sulfide copper-nickel mineralization with a significant content of platinoids – marked with pink tones; В) reconstruction of the geostructural section of the volcanic trough along the A1-A2 profile (1 – area of development of the Kuzemsky complex; 2 – possible manifestation of the Boyarsky complex; 3 – occurrence area of the Kotozero complex (associated with ceramic and mica-ceramic pegmatites); 4 – distribution zone of the Loukhskaya sequence; 5 – area of manifestation of formations of the Chupa complex; 6 – near-surface discontinuous tectonics with reverse-fault kinematics, feathering regional disjunctive – 7 with predominantly strike-slip kinematics

В рассмотренных выше алгоритмах решения обратной задачи теории потенциала присутствуют два фундаментальных фактора, ограничивающих информативность данного решения:

- в задачах аналитического пересчета длина волны отфильтровываемой узкополосной компо-

ненты геополя растет с глубиной, что делает невозможной локализацию малых неоднородностей, размеры которых меньше длин волн, сопоставимых с глубиной пересчёта;

- в задачах подбора применяемые модели отличаются гомогенностью и изотропией, но ап-

проксимируют аномалеобразующие геологические объекты, обладающие гетерогенностью и анизотропией.

На этом фоне актуальной оказывается альтернативная волновая модель, базовые идеи которой изложены в парадигме О.В. Петрова [39], а некоторые формальные элементы отражены в методике А.М. Петрищевского [40] и в [41]. Если в прототипах [40, 41] сделан акцент на обобщенном описании алгоритмики, то в парадигме О.В. Петрова актуализированные алгоритмы насыщены физиче-

ским смыслом: неравновесная в плотностном отношении геологическая среда рассматривается с позиции ансамбля стоячих волн, развивающихся в условиях диссипативного сегментирования горных масс (рис. 4).

В основе нашего алгоритма лежит реализация свертки с переменным интервалом интегрирования L , рост которого на интервал ΔL определяется разрешающей способностью итогового параметрического разреза.

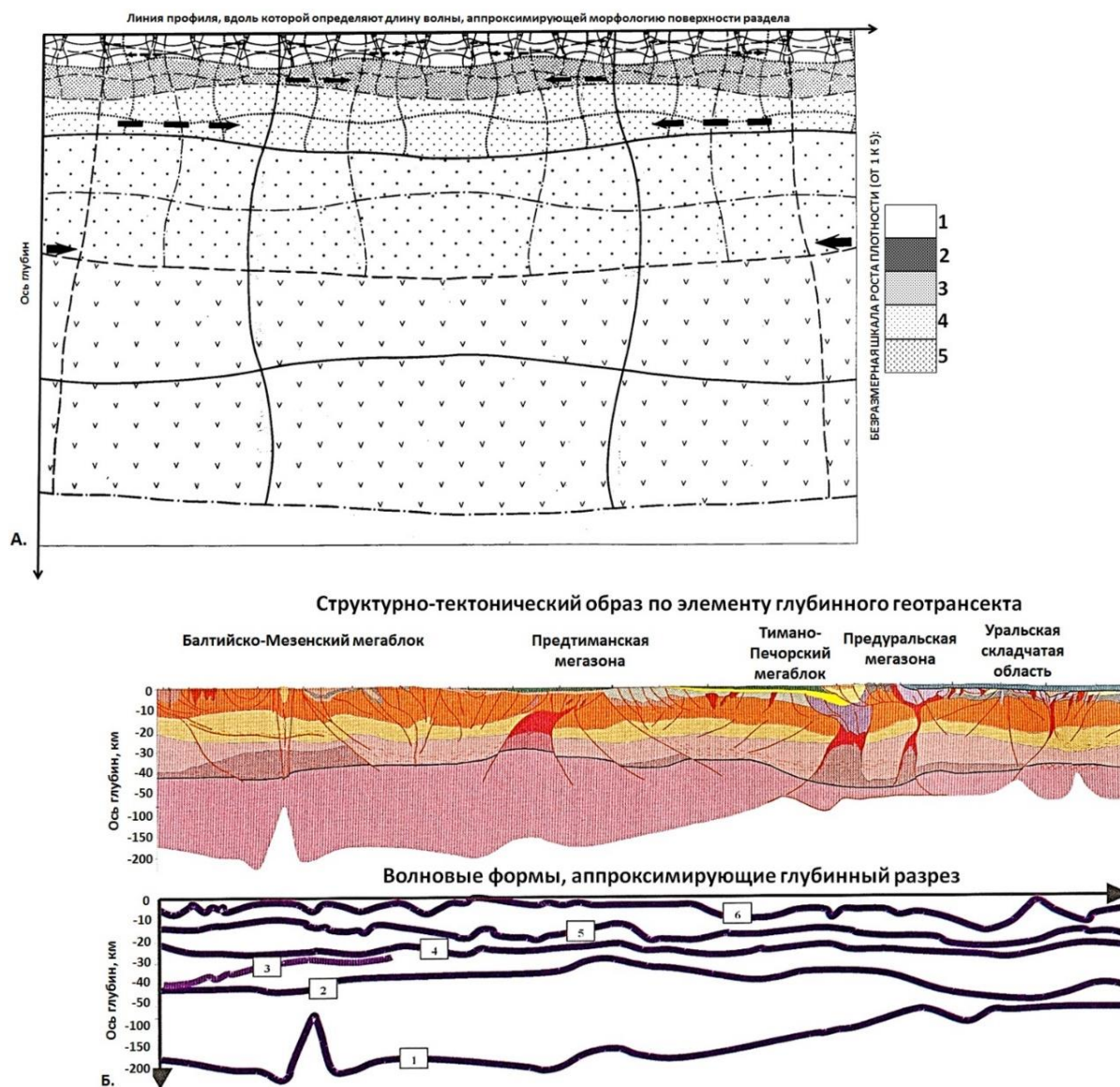


Рис. 4. Развитие стоячих волн как источника структурирования неравновесного горного массива: (А) визуализация парадигмы Петрова о структурировании геологического разреза при развитии в нём семейства конформно связанных друг с другом стоячих волн; (Б) пример аппроксимации геоструктурного разреза (по [42]) семейством квазипериодических волновых профилей

Fig. 4. Development of standing waves as a source of structuring of a non-equilibrium rock mass: (A) visualization of Petrov's paradigm about the structuring of a geological section with the development in it of a family of standing waves conformally related to each other; (B) example of geostructural section approximation (according to [42]) by the set of quasi-periodic wave profiles

Величина ΔL выступает здесь как параметр регуляризации и должна быть сопоставима с наименьшей протяженностью син- и антиформ в параметрическом разрезе. В интервале вариации L его наименьшее значение определяется удвоенным шагом дискретизации геофизического сигнала, а максимальная величина отвечает радиусу автокорреляции r_{ACF} , вычисленному по всей области определения геофизического сигнала. Параметр r_{ACF} вычисляется на основе анализа графика автокорреляционной функции на базе критериев С.А. Серкеева [43]. При свертке для фиксированного интервала L выводим на основе локальной выборки потенциального геофизического поля величину радиуса автокорреляции \tilde{r}_{ACF} с применением формулы В.Н. Страхова [40]. Отдельной проблемой выступает пересчет \tilde{r}_{ACF} в глубину залегания аномалеобразующей неоднородности: опыт демонстрирует, что модель должна отвечать сущности (структурной или рудной) задачи, с одной стороны, и с другой – верифицироваться опорными разрезами или скважинами. При невыполнении второго условия очевидно необходимость использования в расчете глубины заложения структурно-вещественной анома-

лии только одной модели этой аномалии (как правило, модели горизонтального пласта, вертикального пласта или уступа). Принципиальным отличием нашего алгоритма от прочих разработок выступает отнесение узкополосной составляющей геофизического сигнала к детерминированному профилю стоячей волны в плоскости параметрического разреза. Это позволяет представить данный разрез не только в анизотропной и неоднородной форме, но и в качестве континуальной среды. Вдобавок, специально подобранными градиентными фильтрами можно контрастировать в системе волновых аппроксимаций моноклинально и крутозалегающие контакты структурно-вещественных комплексов (рис. 5).

На рис. 5 дано сопоставление параметрического разреза (рис. 5, Б), полученного аналитическим пересчетом вниз гравитационного поля (рис. 5, А), с элементами сейсмического волнового разреза (рис. 5, В).

Означенный параметрический разрез на рис. 5, Б получен с отнесением узкополосных составляющих геофизического сигнала к вычисляемому в детерминированном диапазоне глубин профилю стоячей волны.

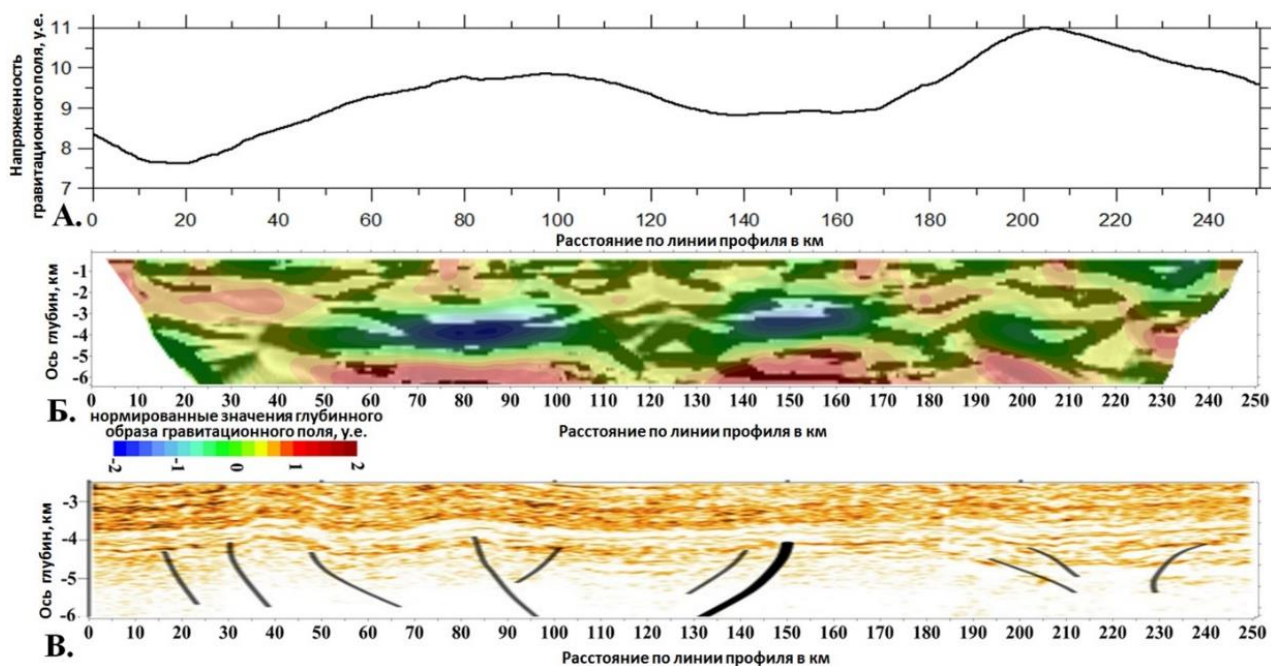


Рис. 5. Пример пересчета гравитационного поля в нижнее полупространство на основе метода волновых аппроксимаций в области регионального правостороннего сдвига: (А) усредненный график гравитационного поля в редукции Буге; (Б) аппроксимация геоструктурного разреза семейством стоячих волн в комбинации с глубинным образом нормированного потенциального поля; (В) волновой сейсмический разрез, верифицирующий глубинный пересчет на рис. 5, Б и отражающий элементы стратификации в комбинации с зоной концентрированной деформации

Fig. 5. Example of the gravitational field recalculation into a lower half-space based on the method of wave approximations in the area of the regional right-sided shear: (A) the average graph of the gravitational field in the Bouguer reduction; (B) approximation of the geostructural section by a family of standing waves in combination with a depth image of the potential field; (B) wave section verifying the depth recalculation in Fig. 5, B and reflecting the elements of stratification and the zone of concentrated deformation

Для повышения чувствительности метода и в попытке компенсации скин-эффекта этот пересчет сопровождается применением дифференциальных и интегральных операторов, гипотетически позволяющих локализовать как кровлю, так и подошву в семействе и структурных, и рудных моделей. Итоговое скалярное поле, представляемое как в полутоновой форме, так и в цвето-цифровой визуализации, чей полупрозрачный слой наложен на полутоновой образ, контрастно отображает элементы стратификации горного массива, а также крутопадающие дизъюнктивные дислокации. Цифро-цветовая шкала, приведенная к рис. 5, Б, отображает распределение по плоскости параметрического разреза нормированных указанным образом значений гравитационного поля, визуализированных в упомянутом полупрозрачном слое. Из сопоставления рис. 5, Б, В, в частности, видна отчетливая корреляция отображенного в сейсмическом волновом разрезе (рис. 5, В) структурно-вещественного комплекса в окрестности глубинной отметки 4 км и выдержанного по латерали горизонта на параметрическом разрезе (рис. 5, Б) для той же глубинной отметки. Оба обсуждаемых разреза выявляют в центре профиля зону концентрированной деформации, маркирующую априори известный для данного объекта (юго-восток Сибирской платформы) региональный сдвиг.

При известной глубине залегания объекта можно рассчитать в скользящем окне эффективный параметр геологической среды, например, для точечной массы m , расположенной на глубине z_0 :

$$\sigma = 2z_0 \sqrt{R(0)/(2\pi)} / G.$$

Как и в методе аналитического продолжения, подход применим к магнитному полю, приведенному к полюсу.

В инженерном приложении результат, отображенный на рис. 5, дополняется методом квазиволновых аппроксимаций, опирающимся на эффект гидростатической компенсации разномасштабных форм земного рельефа на разных глубинах. Согласно известному в гидродинамике опыту Тернера [44], по мере удаления от возмущенной (внешней) поверхности вглубь вязкой жидкости подавляются высоко- и затем среднечастотные составляющие данного возмущения, что согласуется с означенным ранее скин-эффектом. Если λ – длина стоячей волны, $\omega = \text{const}$ – несущая частота возмущений, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, d – мощность слоя, на подошве которого реализуется изостазия, то в расслоенном горном массиве стоячая волна

$$\Delta y = A \cos(2\pi x / \lambda - \omega t) + A \cos(2\pi x / \lambda + \omega t),$$

описываемая вертикальными смещениями, подчиняется эффекту дисперсии длин волн с глубиной [45]:

$$2\pi\lambda^{-1} = \sqrt{\frac{\pi g(2n+1)}{L} \operatorname{th}\left(\frac{\pi d(2n+1)}{L}\right)},$$

что удовлетворяет общей закономерности $\lambda \sim 2\pi g d / \omega$. Здесь L – протяженность по оси x неравновесного слоя, или длина измерительного профиля. В 3D-объеме слоя ограниченного простирающейся стоячей волной обладает целым числом полувольт

$$k = \pi \sqrt{(m/L_1)^2 + (n/L_2)^2 + (p/d)^2},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; L_1 и L_2 – латеральные размеры слоя вязкой жидкости в горизонтальной плоскости; d – мощность (глубина) слоя; m, n, p – целые числа. Это соотношение определяет дискретное изменение длины стоячих волн в объеме неравновесного слоя. С учетом рассмотренного подобрана аппроксимация изменения длины λ внутренних стоячих волн, проявленных в рельефе каждой поверхности напластования в виде регулярного чередования син- и антиформ:

$$\lambda(d) = C_1 + C_2 \exp(C_3 d) \cdot \operatorname{th}(C_4 d),$$

где $C_4 = \pi(2n+1)/L$, C_1, C_2, C_3 – константы, подбираемые при эмпирической аппроксимации. В предположении эффективности такой аппроксимации аналитический пересчет в глубину геопоя, измеренного по профилю на поверхности горного массива, предполагает вычисление радиуса автокорреляции:

$$r = 0.5R^{-1}(0) \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) d\tau,$$

где $R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)f(x \pm \tau) dx$ с последующей оценкой глубины h пластообразного тела [39]:

$$h = 4r \cdot \ln \left(\frac{2^{m+1} m^m}{(m+1)^{m+1}} \right) / \left[\pi(m-1)^2 \right],$$

где $m = h'/h$. Здесь h – глубина кровли пластообразного тела; h' – глубина его подошвы. Итоговое графическое представление параметрического разреза сформируем с учетом всех стадий пересчета (рис. 6, Б):

- аппроксимация плоскости разреза семейством стоячих волн с автоматизированным прослеживанием линейризованных геоструктур;
- компоновка континуального полутонового образа геоструктурного разреза, отображающего поверхности напластования;
- расчет распределения приращения эффективной плотности в пределах отмеченного континуального образа.

Подчеркнем, что все перечисленные трансформации на рис. 6 реализованы по отношению к локальным формам земного рельефа, истолковывае-

мым по аналогии с гравитационным полем. Принципиальными достоинствами обрабатываемой цифровой модели рельефа можно считать её высокую пространственную разрешающую способность, а также формирование на площадях больших, чем цифровые модели геофизических полей в данном масштабе изысканий. Все отмеченные нюансы, при малой антропогенной изменённости рельефа, определяют высокую степень достоверности реконструкции геоструктурных образов в условиях минимума геофизической изученности полигона. В частности, на рис. 6 приведен элемент производственного проекта по уточнению контуров геодинамической зоны, определяющей риск неустойчивости производственного объекта высокого класса опасности. Как видно из пояснений к рисунку, геофизические изыскания захватывают локальные участки исследуемой территории, тогда как целостный образ геодинамической зоны прослеживается по ЦМР, что в дальнейшем было использовано для уточнения геофизических оценок.

Для прикладных задач инженерной геофизики продемонстрированный подход становится принци-

пиальным: прослеживание геодинамических зон, равно как и реконструкция морфологии геотехнического объекта, оказывается возможна в условиях бесконтактного геофизического мониторинга. Например, подобный мониторинг реализуется по оси погруженных магистральных трубопроводов на основе магнитометра-градиентометра и последующего применения авторских алгоритмов, сформированных в рамках задачи создания автоматизированной системы распознавания нарушенных участков [21].

В данной задаче магнитное поле представлено многоканальной магнитометрической записью, где отдельный канал образован величинами компонент вектора магнитной индукции и их пространственных градиентов как функций расстояния по линии профиля. Для любого канала график обладает дифференцированной морфологией, в пределе характеризуемой как пилообразная (рис. 7, А). Без априорной информации об особенностях деформации тела трубопровода в процессе его эксплуатации применяем метод цепных дробей в комплексе с системой градиентных фильтров, пример которых отражен в [40].

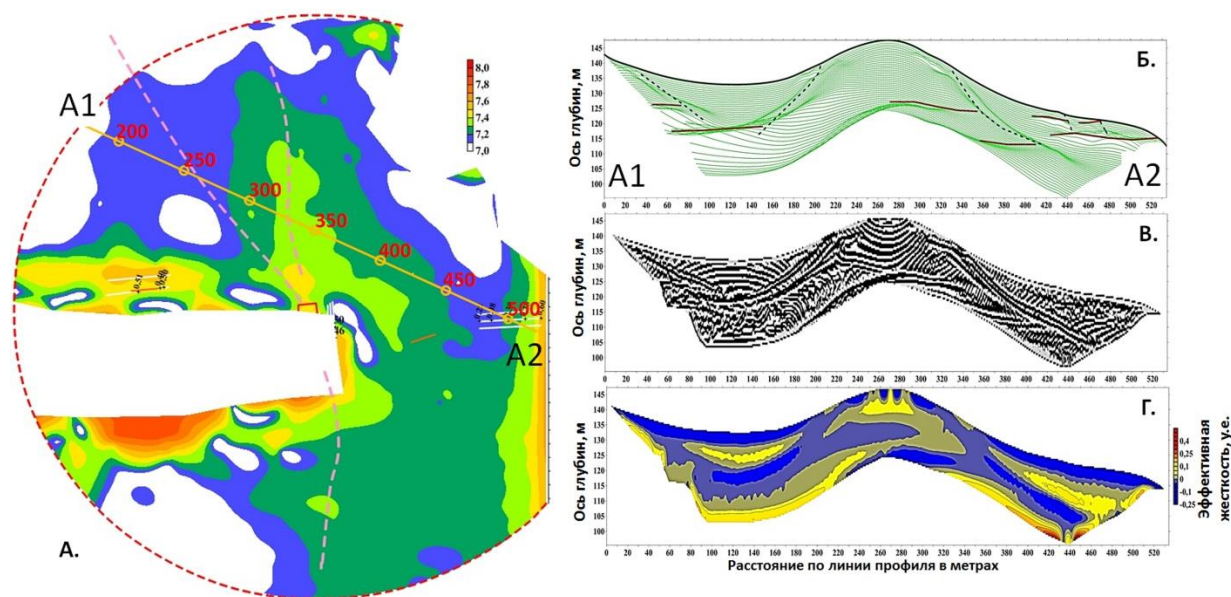


Рис. 6. Глубинная структурная реконструкция на основе цифровой модели рельефа вдоль профиля, секущего верифицированную геодинамическую зону, оказывающую непосредственное влияние на устойчивость объекта изысканий (Мурманская область): (А) позиция профиля (желтым) с метражом (красные цифры). Синим обозначены контуры озер, белыми линиями – профили электротомографии и малоглубинной сейсморазведки, розовым пунктиром – геодинамическая зона (локализована по геолого-геофизическим данным), красным – объект изысканий; (Б) глубинная реконструкция по профилю северо-западного простирания на основе волновой аппроксимации; (В) полутоновой образ итога пересчета рельефа на разноглубинные волновые профили; (Г) результат применения системы градиентных фильтров, представляющий параметр эффективной жесткости

Fig. 6. Deep structural reconstruction based on a digital elevation model along a profile that intersects a verified geodynamic zone that has a direct impact on stability of the survey object (Murmansk region): (A) profile position (yellow) with footage (red numbers). The contours of the lakes are marked in blue, the white lines are the profiles of electrotomography and shallow seismic surveys, the pink dotted line is the geodynamic zone (located according to geological and geophysical data), the red line is the survey object; (B) depth reconstruction along the NW-trending profile based on wave approximation; (C) halftone image of the result of the relief reconstruction into different-depth wave profiles; (D) the result of applying a system of gradient filters, representing the effective stiffness parameter

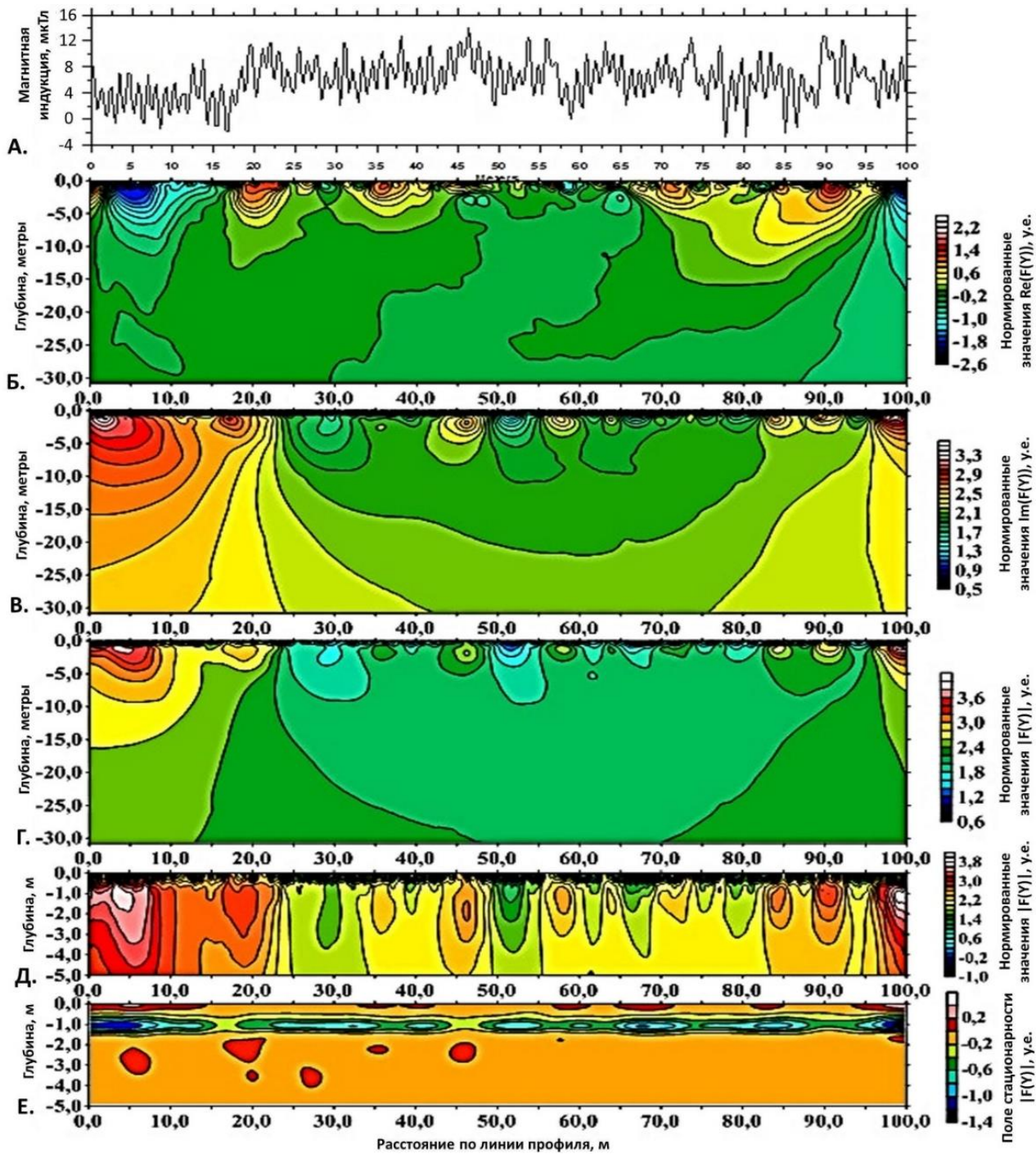


Рис. 7. Применение методики CFCM аналитического продолжения магнитометрического сигнала в глубину на примере стометрового рабочего профиля. (А) Аномальное магнитное поле по оси магистрального трубопровода; (Б) вещественная часть функции $F(Y)$; (В) мнимая часть функции $F(Y)$; (Г) распределение в плоскости верхней части разреза (ВЧР) квадрата амплитуды магнитометрического сигнала; (Д) детализация образа для меньших глубин (порядка 5 м); (Е) локализация тела трубопровода и отдельных намагниченных неоднородностей в нем на основе применения системы авторских градиентных фильтров, разработанных по аналогии с методикой ГРАД

Fig. 7. Application of the CFCM method of analytical continuation of the magnetometric signal in depth using the example of a 100-meter working profile. (A) Anomalous magnetic field along the axis of the main pipeline; (B) real part of the function $F(Y)$; (C) imaginary part of the function $F(Y)$; (Г) distribution in the plane of the upper part of the section (VSL) of the squared amplitude of the magnetometric signal; (Д) image detailing for shallower depths (about 5 m); (Е) localization of the pipeline body and individual magnetized inhomogeneities in it based on the use of a system of proprietary gradient filters developed by analogy with the GRAD method

Анализируя полученные данные, можно видеть, что непосредственно из графиков аномального магнитного поля выводятся дипольные структуры, тяготеющие к области размещения магистрального трубопровода, на глубине 0,8–2,0 м. Помимо локальных аномалий, отбивающих собственно тело трубопровода, параметрические разрезы содержат сквозные градиентные области (рис. 7, Б–Г), которые, согласно полевым заверкам, маркируют так называемые участки «рассеивания поля» на стенке трубопровода. Означенные участки являют собой предпорывные интервалы: области утонения стенки сегмента трубопровода [46], на которых наблюдается уменьшение пространственной плотности силовых линий магнитного поля. Применение градиентных фильтров (рис. 7, Е) позволяет локализовать пологозалегающие кровлю и подошву техногенного объекта, маркируя рискованные интервалы локальными разрывами в ансамбле аномалий, тяготеющих к телу трубопровода. В рамках рассмотренного примера нами выделены в качестве рискованных интервалы 18–23, 44–50 и 93–97 м по линии профиля, из которых при шурфовании и внутритрубном опробовании подтверждение нашли первый и третий интервалы, что мы оцениваем как удовлетворительный результат апробации. Особо отметим, что собственное магнитное поле малых зон нарушения стенки трубопровода не фиксируется на расстоянии нескольких метров. Однако эти зоны формируют сгущения в области концентрации напряжений стенки трубопровода, способной, согласно методу магнитной памяти металла, создавать аномальные отклики во внешнем магнитном поле, фиксируемые на дистанции 2–3 м, что в нашем случае и отображено.

Обсуждение

В современной практике широкое распространение получили методы количественной интерпретации, удовлетворяющие трем условиям:

- 1) применение стандартных библиотек при программировании задач;
- 2) малое число итераций, обеспечивающее оптимальную реализацию метода в реальном режиме измерений – в полевых условиях на маломощной вычислительной технике;
- 3) относительно наглядное представление результатов с точки зрения геоструктурного восприятия.

Как итог, при решении обратной задачи популярными оказываются модели разложения сигнала по отдельным спектральным гармоникам, а также модели свертки, сопряженные с решением системы линейных алгебраических уравнений, чья универсальность относительно произвольных геоструктурных обстановок вызывает жаркие дискуссии. В рамках пересчета наиболее распространенных геофизических полей, гравитационного поля в редукции Буге и магнитного поля ΔT_a возникает ряд

проблем до пересчета, на стадии подготовки материалов: учет влияния рельефа; редукция магнитного поля к полюсу; подбор модели, адекватной текущей геолого-поисковой задаче; учет скин-эффекта, обеспечивающего рост степени сглаживания параметрического образа горного массива с глубиной.

В ряде проектов на стадии планирования наземных изысканий, а также при верификации более ранних результатов интерпретации оказалось целесообразным дополнить грави-магнитные поля материалами нерегламентированного доступа. Одно из них представлено полем фотоаномалий дистанционной основы, для которого пересчет в глубину реализуется не по исходному полю, а по его трансформанте – полю плотности линеаментов. В качестве другого типа доступных данных выступает цифровая модель рельефа, которую в средних и мелких масштабах некоторым специалистам свойственно рассматривать в качестве аналога гравитационного поля. Основой этой аналогии служит функциональная связь гравитационного поля с ЦМР в виде редукций Фая, Буге и изостатической редукции, а также эмпирически обнаруженной связи между шириной геоморфологической аномалии и глубиной залегания уровня её гидростатической компенсации. К полю плотности линеаментов, к цифровой модели рельефа, а также к потенциальным геофизическим полям применим один и тот же подход при реконструкции геоструктурного разреза, основанный на методе волновых аналогий. В случае потенциальных полей параметрические разрезы, опирающиеся на этот метод, эффективно комплексуются с оценкой особых точек (сингулярностей), традиционными аналитическими продолжениями и подбором ФГМ. В случае непотенциальных геополей параметрические разрезы, полученные на базе волновых аналогий, верифицируются параметрическими разрезами, выводимыми посредством тех же аналогий по потенциальным полям. В качестве базовых объектов глубинного картирования при совместной количественной интерпретации потенциальных и непотенциальных геополей выступают элементы разрывной тектоники и стратификации горного массива.

Заключение

Концепция комплексирования методов решения обратной задачи теории потенциала опробована в различных геоструктурных обстановках. Спектральный пересчет и методы подбора дают комбинированный графический образ, допускающий привязку к реальным геоструктурным особенностям горного массива (к син- и антиформам в разноглубинных поверхностях напластования, к блоковой тектонике, к субвертикальным интрузивным внедрениям и проч.). Здесь заметна корреляция аномалий разного

знака глубинного образа потенциального поля с вершинами материального или намагниченного пласта, а особые точки выстраиваются по зонам резкого пространственного градиента данного глубинного образа. Переход к аппроксимации структурно-вещественных особенностей геологического разреза семейством стоячих волн (гидродинамическая ана-

логия, согласно парадигме О.В. Петрова о диссипативном структурировании Земли) позволяет вовлекать в обработку не только широкий спектр пространственно распределенных геолого-геофизических сигналов, но и представлять результат пересчета в полутонной форме, подобной сейсмическим волновым разрезам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологический словарь. Т. 3. Р–Я / под ред. О.В. Петрова. – СПб: Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2012. – 440 с.
2. Коррекция глубинно-скоростных моделей методом гравиметрической разведки для труднодоступных участков шельфовой зоны / Т.А. Мингалева, Г.Д. Горелик, А.С. Егоров, В.Д. Гулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 77–86. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_77
3. Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структур его складчатого обрамления / А.С. Егоров, Н.В. Большакова, Д.Ф. Калинин, А.С. Агеев // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 703–719. DOI: 10.31897/PMI.2022.63
4. Григорьев Г.С., Салищев М.В., Сенчина Н.П. О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 492–500. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.2
5. Калинин Д. Ф., Яновская Ю. А., Долгаль А. С. Использование статистических методов интерпретации потенциальных полей для изучения структурно-тектонического строения нефтегазоперспективных территорий // Геология нефти и газа. – 2021. – № 2. – С. 27–36. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-2-27-36
6. Блинов П.А., Садыков М.И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // Известия Томского политехнического университета. – 2023. – Т. 334. – С. 97–105. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3925
7. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-2. – С. 105–116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105
8. Richardson R.M., Zandt G. Inverse problems in geophysics (GEOS 567). – Arizona, Tucson: University of Arizona, 2003. – 241 p.
9. Senchina N.P., Grigoriev G.S., Gulin V.D. The applicability of multilevel magnetometry for reducing the level of geological uncertainties in the data interpretation // International Journal of Applied Engineering Research. – 2020. – V. 15. – № 5. – P. 492–497.
10. Enhancing linear features in aeromagnetic data using directional horizontal gradient at WadiHaimur area, South Eastern Desert, Egypt / A.M. Eldosouky, S.O. Elkhateeb, A. Ali, S. Kharbush // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2020. – V. 15. – № 2. – P. 323–326. DOI:10.26471/cjees/2020/015/132
11. Mapping subsurface structural lineaments using the edge filters of gravity data / L.T. Pham, A.M. Eldosouky, O. Melouah, K. Abdelrahman, H. Alzahrani, S.P. Oliveira, P. András // Journal of King Saud University-Science. – 2021. – V. 33. – № 8. – P. 101594. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101594
12. Nelson D.T., Jewell P.W. Transgressive stratigraphic record and possible oscillations of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Hogup Mountains, Utah, USA // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2015. – V. 432. – P. 58–67. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.04.028
13. Olasunkanmi N.K., Sunmonu L.A., Adabaniya M.A. Geophysical investigation for mineral prospect in Igbeti-Moro area, southwestern Nigeria // Kuwait Journal of Science. – 2020. – V. 47. – № 3. – P. 2–14.
14. Krishna R.R., Kishan D., Sarup J. Lineament extraction and lineament density assessment of Omkareshwar, MP, India, using GIS Techniques // International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR). – 2015. – V. 5. – № 3. – P. 717–720.
15. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) / И.В. Таловина, Н.С. Крикун, Ю.Ю. Юрченко, А.С. Агеев // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 158–172. DOI: 10.31897/PMI.2022.45
16. Automatic and manual fracture-lineament identification on digital surface models as methods for collecting fracture data on outcrops: case study on fractured granite outcrops, Bangka / M.E.M. Nurshal, M.S. Sadewo, A. Hidayat, W.N. Hamzah, B. Sapiie, M. Abdurrachman, A. Rudyawan // Frontiers in Earth Science. – 2020. – V. 8. – P. 560–596. DOI: 10.3389/feart.2020.560596
17. Kennelly P.J. Terrain maps displaying hill-shading with curvature // Geomorphology. – 2008. – V. 102. – № 3–4. – P. 567–577. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.05.046
18. Bath V.M. Spectral analysis in geophysics. – Sweden: Elsevier, 2012. – 533 p.
19. Buttkus B. Spectral analysis and filter theory in applied geophysics. – Hannover, Germany: Springer Science & Business Media, 2012. – 651 p.
20. Dahlen F.A., Simons F.J. Spectral estimation on a sphere in geophysics and cosmology // Geophysical Journal International. – 2008. – V. 174. – № 3. – P. 774–807.
21. Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2022. – V. 380. – № 2237. – P. 20210403. DOI: 10.1098/rsta.2021.0403
22. Ермохин К.М. Продолжение геофизических полей в область источников аномалий методом аппроксимации цепными дробями // Геофизика. – 2007. – № 1. – С. 51–55.
23. Spectral estimation – What is new? What is next? / J.B. Tary, R.H. Herrera, J. Han, M. Baan // Reviews of Geophysics. – 2014. – V. 52. – № 4. – P. 723–749. DOI: 10.1002/2014RG000461
24. Петров О.В. Диссипативные структуры Земли как проявление фундаментальных волновых свойств материи. – СПб: Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2007. – 303 с.
25. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных. – Ухта: УГТУ, 2007. – 32 с.

26. Березкин В.М. Применение гравиразведки для поиска месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 1973. – 115 с.
27. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения / С.А. Бузмаков, П.Ю. Санников, Л.С. Кучин, Е.А. Игошева, И.Ф. Абдулманова // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 1–14. DOI: 10.31897/PMI.2023.22
28. Ермохин К.М. Аналитическое продолжение геофизических полей методом цепных дробей // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 238–241.
29. Федорова Н.В. Теория эквивалентности обратной задачи логарифмического потенциала для границ раздела и методы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий при изучении строения земной коры: дис. ... д-ра наук. – Екатеринбург, 2005. – 191 с.
30. Cai H., Xiong B., Zhu Y. 3D modeling and inversion of gravity data in exploration scale // Gravity-Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect. – 2018. – V. 1 – P. 401–406. DOI: 10.5772/intechopen.70961
31. Cai H., Zhdanov M. Application of Cauchy-type integrals in developing effective methods for depth-to-basement inversion of gravity and gravity gradiometry data // Geophysics. – 2015. – V. 80. – № 2. – P. G81–G94. DOI: 10.1190/geo2014-0332.1
32. Recovering 3D basement relief using gravity data through convolutional neural networks / S. He, H. Cai, S. Liu, J. Xie, X. H // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2021. – V. 126. – № 10. – P. e2021JB022611. DOI: 10.1029/2021JB022611
33. Воскобойников Г.М., Начапкин Н.И. Методические рекомендации по применению метода особых точек для интерпретации потенциальных полей. – Свердловск: УНЦ РАН СССР, 1980. – 130 с.
34. Модель структуры и тектоническая эволюция системы разломов в южной части региона Хур, Центральный Иран / А. Сохраби, А. Надири, И.В. Таловина, Х. Сафаи // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 142–152. DOI 10.31897/PMI.2019.2.142
35. Шпынёв Б.Г., Воронов А.Л. Минимизация нелинейного функционала невязки в задачах потоковой обработки экспериментальных данных // Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Т. 14. – № 4. – С. 503–515.
36. Корсакова М.А., Иванов Н.М., Дударева Г.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Карельская. Лист Q-36-XV, XVI (Лоухи): объяснительная записка. – М.: Минприроды России, Роснедра, СЗРГЦ, ГПП «Севзапгеология», 2021. – 1 л.
37. Егоров А.С., Мовчан И.Б. Комплексирование геофизических методов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. – 192 с.
38. Александров П.Н., Забиякова О.Б. Об обратной задаче геофизики с позиций развития идей ВН Страхова // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2020. – Т. 31. – № 2. – С. 56–69.
39. Зоны концентрированной деформации (структуры цветка): натурные наблюдения и данные моделирования / М.Г. Леонов, Ю.А. Морозов, Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 3. – С. 693–720. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0368.
40. Мудрецова Е.А., Веселов К.Е. Гравиразведка. Справочник геофизика. 2-е изд. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
41. Способ обнаружения аномалий глубинного строения Земли: пат. Рос. Федерация, № 2004138868, заявл. 30.12.2004; опубл. 10.06.2006. Бюл. № 28. – 7 с.
42. Егоров А.С. Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотраверсов России): дис. ... д-ра наук. – СПб, 2000. – 390 с.
43. Серкерев С.А. Теория гравитационного и магнитного потенциалов. – М.: Недра, 1990. – 304 с.
44. Petrov O.V. The Earth's dissipative structures: fundamental wave properties of substance. – Switzerland, Cham: Springer Geophysics, 2019. – 34 p.
45. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика (теоретическая физика, т. VI). – М.: Наука, 1986. – 736 с.
46. Probabilistic and statistical techniques to study the impact of localized corrosion defects in oil and gas pipelines: a review / J.C. Velazquez, E. Hernandez-Sanchez, G. Teran, S. Capula-Colindres, M. Diaz-Cruz, A. Cervantes-Tobon // Metals. – 2022. – V. 12. – № 4. – P. 576–616. DOI: 10.3390/met12040576

REFERENCES

1. Petrov O.V. *Geologicheskii slovar. Tom 3. R-Ya* [Geological dictionary. Vol. 3. R–Ya]. St. Petersburg, All-Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky Publ., 2012. 440 p.
2. Mingaleva T., Gorelik G., Egorov A., Gulin V. Correction of depth-velocity models by gravity prospecting for hard-to-reach areas of the shelf zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2022, no. 10-1, pp. 77–86. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_77
3. Egorov A.S., Bolshakova N.V., Kalinin D.F., Ageev A.S. Deep structure, tectonics and geodynamics of the Sea of Okhotsk region and structures of its folded frame. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 703–719. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2022.63
4. Grigorev G.S., Salishchev M.V., Senchina N.P. On the applicability of electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 250, pp. 492–500. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.2
5. Kalinin D.F., Yanovskaya Yu.A., Dolgal A.S. Statistical methods for potential fields interpretation: studies of structural and tectonic architecture of oil and gas promising territories. *Geologiya nefi i gaza*, 2021, no. 2, pp. 27–36. In Rus. DOI 10.31087/0016-7894-2021-2-27-36
6. Blinov P.A., Sadykov M. I. Evaluation of elastic-strength properties of cement-epoxy systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 97–105. In Rus. DOI 10.18799/24131830/2023/1/3925
7. Gendler S.G., Prokhorova E.A. Assessment of the cumulative impact of occupational injuries and diseases on the state of labor protection in the coal industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2022, no. 10-2, pp. 105–116. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105
8. Richardson R.M., Zandt G. *Inverse problems in geophysics (GEOS 567)*. Tucson, University of Arizona, 2003. 241 p

9. Senchina N., Grigoriev G., Gulín V. The applicability of multilevel magnetometry for reducing the level of geological uncertainties in the data interpretation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2020, vol. 15, no. 5, pp. 492–497.
10. Eldosouky A.M., Elkhateeb S.O., Ali A., Kharbish S. Enhancing linear features in aeromagnetic data using directional horizontal gradient at Wadi Haimur area, South Eastern Desert, Egypt. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 323–326. DOI:10.26471/cjees/2020/015/132
11. Pham L.T., Eldosouky A.M., Melouah O., Abdelrahman K., Alzahrani H., Oliveira S.P., András P. Mapping subsurface structural lineaments using the edge filters of gravity data. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, vol. 33, no. 8, pp. 101594. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101594
12. Nelson D.T., Jewell P.W. Transgressive stratigraphic record and possible oscillations of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Hogup Mountains, Utah, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, vol. 432, pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.04.028
13. Olasunkanmi N.K., Sunmonu L.A., Adabaniya M.A. Geophysical investigation for mineral prospect in Igbeti-Moro area, southwestern Nigeria. *Kuwait Journal of Science*, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 2–14.
14. Krishna R.R., Kishan D., Sarup J. Lineament extraction and lineament density assessment of Omkareshwar, MP, India, using GIS Techniques. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 717–720.
15. Talovina I.V., Krikun N.S., Yurchenko Y.Y., Ageev A.S. Remote sensing techniques in the study of structural and geotectonic features of Iturup Island (the Kuril Islands). *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 254, pp. 158–172. In Rus. DOI: 10.31897/PML2022.45
16. Nurshal M.E.M. Automatic and manual fracture-lineament identification on digital surface models as methods for collecting fracture data on outcrops: case study on fractured granite outcrops, *Bangka. Frontiers in Earth Science*, 2020, vol. 8, pp. 560596. DOI: 10.3389/feart.2020.560596
17. Kennelly P.J. Terrain maps displaying hill-shading with curvature. *Geomorphology*, 2008, vol. 102, no. 3–4, pp. 567–577. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.05.046
18. Bath B.M. *Spectral analysis in geophysics*. Hannover, Germany, Elsevier, 2012. 533 p.
19. Buttkus B. *Spectral analysis and filter theory in applied geophysics*. Sweden, Springer Science & Business Media, 2012. 651 p.
20. Dahlen F.A., Simons F.J. Spectral estimation on a sphere in geophysics and cosmology. *Geophysical Journal International*, 2008, vol. 174, no. 3, pp. 774–807.
21. Yakovleva A.A., Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I. Dynamic response of multi-scale geophysical systems: waves and practical applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A.*, 2022, vol. 380, no. 2237, pp. 20210403. DOI: 10.1098/rsta.2021.0403
22. Ermohin K.M. Prodolzhenie geofizicheskikh poley v oblast istochnikov anomalii metodom approksimatsii tsepnymi drobyami [Continuation of geophysical fields into the area of anomaly sources by the method of approximation by chain fractions]. *Geofizika*, 2007, no. 1, pp. 51–55.
23. Tary J.B. Spectral estimation – What is new? What is next? *Reviews of Geophysics*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 723–749. DOI: 10.1002/2014RG000461
24. Petrov O.V. *Dissipativnye struktury Zemli kak proyavlenie fundamentalnykh volnovykh svoystv materii* [Dissipative structures of the Earth as a manifestation of the fundamental wave properties of matter]. St. Petersburg, All-Russian Research Geological Institute named after. A.P. Karpinsky, 2007. 303 p.
25. Kobrunov A.I. *Matematicheskie osnovy teorii interpretatsii geofizicheskikh dannykh* [Mathematical foundations of the theory of interpretation of geophysical data]. Uhta, UGTU Publ., 2007. 32 p.
26. Berezkin V.M. *Primenenie gravirazvedki dlya poiska mestorozhdeniy nefii i gaza* [Application of gravity exploration for the search of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 115 p.
27. Buzmakov S.A., Sannikov P.Y., Kuchin L.S., Igosheva E.A., Abdulmanova I.F. The use of unmanned aerial photography for interpreting the technogenic transformation of the natural environment during the oilfield operation. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 1–14. In Rus. DOI: 10.31897/PMI.2023.22
28. Ermokhin K.M. Analytical continuation of geophysical fields by continued fractions method. *Journal of Mining Institute*, 2009, vol. 183, pp. 238–241. In Rus.
29. Fedorova N.V. *Teoriya ekvivalentnosti obratnoy zadachi logarifmicheskogo potentsiala dlya granits razdela i metody interpretatsii gravitacionnykh i magnitnykh anomalii pri izuchenii stroeniya zemnoy kory*. Dis. Dokt. nauk [Equivalence theory of the inverse logarithmic potential problem for interface boundaries and methods of interpretation of gravitational and magnetic anomalies in the study of the structure of the Earth's crust. Dr. Diss.]. Ekaterinburg, 2005. 191 p.
30. Cai H., Xiong B., Zhu Y. 3D modeling and inversion of gravity data in exploration scale. *Gravity-Geoscience Applications, Industrial Technology and Quantum Aspect*, 2018, vol. 183, pp. 401–406. DOI: 10.5772/intechopen.70961
31. Cai H., Zhdanov M. Application of Cauchy-type integrals in developing effective methods for depth-to-basement inversion of gravity and gravity gradiometry data. *Geophysics*, 2015, vol. 80, no. 2, pp. G81–G94. DOI: 10.1190/geo2014-0332.1
32. He S. Recovering 3D basement relief using gravity data through convolutional neural networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, vol. 126, no. 10, pp. e2021JB022611. DOI: 10.1029/2021JB022611
33. Voskoboynikov G.M., Nachapkin N.I. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu metoda osobykh toчек dlya interpretatsii potentsialnykh poley* [Guidelines for using the singular point method to interpret potential fields]. Sverdlovsk, UC RAS USSR Publ., 1980. 130 p.
34. Sohrabi A., Nadimi A., Talovina I.V., Safaei H. Structural model and tectonic evolution of the fault system in the Southern Part of the Khur Area, Central Iran. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 142–152. DOI 10.31897/PMI.2019.2.142
35. Shpynov B.G., Voronov A.L. Minimizatsiya nelineynogo funktsionala nevyazki v zadachakh potokovoy obrabotki eksperimentalnykh dannykh [Minimization of the nonlinear functional of the discrepancy in the problems of stream processing of experimental data]. *Vychislitelnye metody i programmirovaniye*, 2013, vol. 14, no. 4, pp. 503–515.

36. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Karelskaya. List Q-36-XV, XVI (Loukhi): obyasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000. Second edition. Karelian series. Sheet Q-36-XV, XVI (Loukhi): explanatory note]. Eds. M.A. Korsakova, N.M. Ivanov, G.A. Dudareva. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, North-West Russian Geological Center, State Enterprise "Sevzapgeologiya", 2021. 1 p.
37. Egorov A.S., Movchan I.B. *Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov* [Integration of geophysical methods]. St. Petersburg, St. Petersburg Mining University Publ., 2018. 192 p.
38. Aleksandrov P.N., Zabinyakova O.B. Ob obratnoy zadache geofiziki s pozitsiy razvitiya idey V.N. Strakhova [On the inverse problem of geophysics from the perspective of the development of V.N. Strakhov's ideas]. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2020, vol. 31, no. 2, pp. 56–69.
39. Leonov M.G., Morozov Yu.A., Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Zones of concentrated deformation (flower structures): field observations and modeling data. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 693–720. In Rus. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0368.
40. Mudretsova E.A., Veselov K.E. *Gravirazvedka. Spravochnik geofizika* [Gravity exploration. Geophysics Reference Book]. 2nd ed. revised and expanded. Moscow, Nedra Publ., 1990. 607 p.
41. Chernikov A.G., Libina N.V., Matushkin M.B. *Sposob obnaruzheniya anomalii glubinnogo stroeniya Zemli* [Method for detecting anomalies in the deep structure of the Earth]. Patent RF, no. 2004138868, 2006.
42. Egorov A.S. *Glubinnoe stroenie i geodinamika litosfery Severnoy Evrazii (po rezul'tatam geologo-geofizicheskogo modelirovaniya vdol geotraversov Rossii)* Dis. Dokt. nauk [Deep structure and geodynamics of the lithosphere of Northern Eurasia (based on the results of geological and geophysical modeling along geotraverses of Russia). Dr. Diss.]. St. Petersburg, 2000. 390 p.
43. Serkerov S.A. *Teoriya gravitatsionnogo i magnitnogo potentsialov* [Theory of gravitational and magnetic potentials]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 304 p.
44. Petrov O.V. The Earth's dissipative structures: fundamental wave properties of substance. *Springer Geophysics*, 2019, no. 3, pp. 23–57.
45. Landau L.D., Lifshits E.M. *Gidrodinamika (teoreticheskaya fizika, t. VI)* [Hydrodynamics (theoretical physics, vol. VI)]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p.
46. Velazquez J.C., Hernandez-Sanchez E., Teran G., Capula-Colindres S., Diaz-Cruz M., Cervantes-Tobon A. Probabilistic and statistical techniques to study the impact of localized corrosion defects in oil and gas pipelines: a review. *Metals*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 576–616. DOI: 10.3390/met12040576

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александра Анатольевна Яковлева, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; yakovleva_aa@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2476-2790>

Игорь Борисович Мовчан, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; movchan_ib@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2311-8979>

Дарья Кирилловна Мединская, аспирант кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; s225007@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1020-3955>

Зиля Ириковна Садыкова, аспирант кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2; s205007@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X>; шифр специальности ВАК 1.6.9.

Поступила в редакцию: 31.03.2023
Поступила после рецензирования: 28.05.2023
Принята к публикации: 06.07.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandra A. Yakovleva, Cand Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; yakovleva_aa@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X>

Igor B. Movchan, Cand Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; movchan_ib@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2311-8979>

Daria K. Medinskaia, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; s225007@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1020-3955>

Zilya I. Sadykova, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; s205007@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2476-2790>

Received: 31.03.2023
Revised: 28.05.2023
Accepted: 06.07.2023