

УДК 622.234.57:622.02:537

DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-431-443

## Руды магнетитов и бокситов как петрофизические объекты спектрально-сортовой оценки на основе электрометрии (из архивов оксид-метрической разведки на месторождениях Урала)

А. В. Тимохин, Р. С. Титов, М. В. Козлова

Институт горного дела УрО РАН, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, e-mail: timohin.igduran.geo@mail.ru, ukr15@mail.ru, mkoz94@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2020 г., принята к печати 29.09.2020 г.

**Объект исследований.** Распределения руд магнетитов и бокситов в горных блоках месторождений по данным электропроводности в связи с сигналами рассеянных фаз окислов Са, Mg и Al. Петрофизические объекты и дифференциация свойств окислов, выявляемые в пограничном и на границе с диэлектриками полупроводниковом диапазоне в геохимической обстановке метаморфических образований из карбонатных осадков. **Материалы и методы.** Предпринимается поиск стационарных признаков – исследование отличает изучение на элементном уровне (обзор) и, затем, на основе материалов собственных электрометрических измерений на месторождениях. **Результаты.** В обзорной части выполнен анализ констант металлов – относительной электроотрицательности ОЭО (шкала Луо и Бенсона), электронных потенциалов E0 и связи электрического сопротивления и давления в чистых элементах. Раскрывается инверсия свойств СаО ↔ MgO (впервые в 2002–2004 гг.); Са идентифицирован как восстановитель (СаО – твердый диэлектрик) в отличие от традиционных представлений о сравнительной аддитивности легкого Mg. Установлено, что MgO – отдельный источник полупроводниковых носителей. Благоприятные условия изучения проводимости в экспериментальной части работы – абсолютные обменные приращения рудных окислов на геологических контактах. Измерены и рассчитаны свойства руд, пород и окислов, предсказаны связи сортового роста проводимости с уплотнением, повышением основности и магнитной восприимчивости (магнетизации), что, в свою очередь, дает фундаментальные основания для изучения кернов, проб из развалов, измельчений и переработанного геоматериала, включая концентраты, хвосты и отходы. **Выводы.** Идентифицированы спектральные свойства рассеянных легких окислов ат. № ≤ 20. Отмечено активационное действие MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ионной среде (СаСО<sub>3</sub> = СаО + СО<sub>2</sub>). В явлениях полупроводниковой природы (n- и p- источники) дана версия донорно-акцепторного механизма. Установленные свойства – фактор осуществления в условиях месторождений оксид-метрических решений как в оценках карбонатных химотипов терригенных ископаемых, так и плагиоклаз-пироксеновых – в магматических. Сортная разведка и прототип электрометрии обсуждаются с позиций высокоточной интерпретации в потенциале и восполняющем комбинировании различных петрофизических измерителей.

**Ключевые слова:** магнетиты, бокситы, анализ металлов, спектральные свойства окислов, электрометрия, сортная оценка, геотехнология

### Источник финансирования

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 11-05-00159) и в рамках государственного задания 007-00293-18-00, тема № 0405-2018-0015

## Magnetite and bauxite ores as petrophysical objects of spectral-grade estimation based on electrometry (from the archives of oxide-metric exploration in the Ural deposits)

Alexandr V. Timohin, Roman S. Titov, Maria V. Kozlova

Institute of Mining of Ural branch of RAS, 58 Mamina-Sibiryaka st., Ekaterinburg 620075, Russia, e-mails: timohin.igduran.geo@mail.ru, ukr15@mail.ru, mkoz94@mail.ru

Received 21.09.2020, accepted 29.09.2020

**Для цитирования:** Тимохин А.В., Титов Р.С., Козлова М.В. (2021) Руды магнетитов и бокситов как петрофизические объекты спектрально-сортовой оценки на основе электрометрии (из архивов оксид-метрической разведки на месторождениях Урала). *Литосфера*, 21(3), 431–443. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-431-443

**For citation:** Timohin A.V., Titov R.S., Kozlova M.V. (2021) Magnetite and bauxite ores as petrophysical objects of spectral-grade estimation based on electrometry (from the archives of oxide-metric exploration in the Ural deposits). *Litosfera*, 21(3), 431–443. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-3-431-443

**Research subject.** Distribution of magnesite and bauxite ores in mining blocks of deposits according to electrical conductivity in connection with signals of scattered phases of Ca, Mg and Al oxides. Petrophysical objects and differentiation of the properties of oxides detected in the boundary area and at the boundary with dielectrics, the semiconductor range in the geochemical environment of metamorphic formations from carbonate sediments. **Materials and methods.** An approach of searching for stationary features was applied. First, a study at the elemental level (review) was undertaken. Further, the authors' electrometric measurements of the deposits were analyzed. **Results.** In the review part, the analysis of the metal constants – the relative electronegativity of the OEO (Luo and Benson scale), the electronic potentials  $E_0$ , and the relationship of electrical resistance and pressure in pure elements was performed. The inversion of the properties of  $\text{CaO} \leftrightarrow \text{MgO}$  was revealed (for the first time in 2002–2004); Ca was identified as a reducing agent ( $\text{CaO}$  is a solid dielectric), which contradicts the current ideas about the comparative additivity of light Mg. It was established that  $\text{MgO}$  is a separate source of semiconductor carriers. Favourable conditions for studying the conductivity during the experimental part of the work were the absolute exchange increments of ore oxides at geological contacts. The properties of ores, rocks and oxides were measured and calculated. The relationships of the varietal growth of conductivity with compaction, increased basicity and magnetic susceptibility (magnetization) were predicted. This, in turn, provides a basis for studying cores, samples from debris, shredding and recycled geo-material, including concentrates, tailings and waste. **Conclusions.** The spectral properties of scattered oxides with atomic numbers  $\leq 20$  were identified. The activation effect of  $\text{MgO}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the ionic medium ( $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) was noted. In the phenomena of the semiconductor nature (n- and p-sources), a version of the donor-acceptor mechanism was proposed. The established properties are a factor in the implementation of measuring identification of oxides and ore grades in the conditions of deposits, both in the estimates of carbonate chemical types of terrigenous fossils, and plagioclase-pyroxene – in igneous ones. Varietal exploration and prototype electrometry were discussed from the standpoint of high-precision interpretation in the potential and replenishment combination of various petrophysical meters.

**Keywords:** magnesites, bauxites, metal analysis, spectral properties of oxides, electrometry, grade estimation, geotechnology

#### Funding information

The research was supported by the RFBR (grant No. 11-05-00159) and within the framework of the state task 007-00293-18-00, topic No. 0405-2018-0015

## ВВЕДЕНИЕ

На месторождениях нагорного типа<sup>1</sup> на Урале переходные процессы в освоении недр характеризует осложнение горно-геологических условий: отработка глубоких горизонтов и неоднородных массивов в истощенных флангах главных залежей, кратное повышение объемов добычи, пределы обедненного и техногенного сырья.

<sup>1</sup> Месторождения *нагорного* типа (м.н.т.) – месторождения твердоминеральных ископаемых, характеризующиеся особенностями (текст), в силу расположения в пределах складчатостей. Географическое место магмогенных ископаемых – главная горная гряда, терригенных – сводовые поднятия карбонатных толщ, т.е. примыкающие и окраинные пенеплены. Факторы выгоды освоения – высокая доля открытой геотехнологии: отработка горных блоков выходов сначала карьерами, затем флангов и углублений – шахтами (комбинированный способ). В то же время не обнаруживается применение термина к месторождениям общераспространенных ископаемых. В статье связанные с этим контекстом м.н.т. имеются формулировки: меридианальная *нагорная* полоса (Урал), *нагорные* карбонатно-терригенные толщ (западный и восточный склоны), *нагорная* минерализация (описание типичных и сортовых изменений состава) и др.

Актуальна модернизация всех аспектов недропользования. Инновации сортового изучения – идея технологического реагирования на ухудшение условий эксплуатации традиционных минеральных баз. В то же время обновление и восполнение методов сырьевой оценки способствуют оптимизации алгоритмов нормирования потерь и разубоживания, управления качеством, вплоть до постановки задач повышения извлечения, пересмотра обогатимости, коррекции горного планирования и вариантов переработки (Агошков, 1970; Типовые ..., 1972).

Выявление спектральных закономерностей – направление развития оценки на основе физических измерителей. Приложения в геотехнологии множественны – от обмеров массивов в естественном залегании и до изучения проб горной массы на всем пути перевалки, включая пункты контроля на обогатительных фабриках.

Обсуждаются основания петрофизических измерений и подходы оксид-метрических решений при разнообразии литологических условий, генезисов и хмотипов ископаемых, а также первые прототипы электрометрии (Тимохин и др., 2012; Кантемиров и др., 2018). Изучаются оруденения магнетитов (Саткинская группа месторождений)

и бокситов (Североуральский бокситовый рудник, СУБР).

Цели исследования. 1. Обзор петрологических методов и исходной изученности нагорных, карбонатно-терригенных толщ, региональных условий генезиса и метаморфизма. Обоснование первичного повода и подходов к петрофизическому изучению. 2. Эмпирический анализ констант элементов (величин металлов) в прогнозе направленности и дифференциации спектральных свойств оксид-минеральных сред, обусловленных вариациями состава. 3. Разработка методики электрометрии в объемной постановке и проведение полевых работ. Интерпретация собственных измерений и имеющихся архивов. Предмет изучения – сортовые сигналы магнезитов и бокситов в геохимической обстановке крупных залежей и отдельных рудных тел. По мере накопления данных электропроводности обсуждение связанных стационарных свойств исходя из общей спектральной природы. Ожидаемые результаты – восполнение сырьевой оценки, информация в поддержку планирования, энергоресурсосбережение.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На Урале массивы терригенных, краевых непленов занимают территории западных и восточных примыканий к главной, магмогенной гряде в меридиональной нагорной полосе от южной обширной части до Арктической зоны. Основные залежи известняка, углей, магнезитов и бокситов приурочены к карбонатно-терригенным толщам.

Осадконакопление происходило в условиях морской и прибрежной фаций. Более всего в первичном виде сохранены известняки. Имеющиеся в них окаменелости (остатки фауны и флоры) дают основания для геологической датировки. Генезис углей определяет течение метаморфических процессов. Образование магнезитов и бокситов связано с вторичным внедрением магм и метаморфическими изменениями – накоплением рудных оксидов при главной роли гальванопроцессов.

Физико-химический анализ парагенезисов минеральных ассоциаций – базовый метод петрологии в изучении процессов метаморфизма, протекающих в сложной обстановке образования ископаемых карбонатных отложений (Trewin, Davidson, 1999; Маракушев, Бобров, 2005).

О метаморфических превращениях вещества судят по идентификациям сумм реакций и составляемых объемных эффектов (табл. 1).

В петрологическом анализе объемные эффекты отнесены к действию гидратации ( $H_2O$ ) и железистых компонентов (Fe) в градиентах высоких (гематит  $Fe_2O_3$ ) и аномальных (магнетит  $Fe_3O_4$ ) параметров. Однако диапазоны  $\Delta V_s$  в парагенезисах

**Таблица 1.** Объемные эффекты метаморфических реакций между магнезиальными минералами метаультрабазитов (Маракушев, Бобров, 2005)

**Table 1.** Volume effects of metamorphic reactions between magnesian minerals of metaultrabasites (Marakushev, Bobrov, 2005)

| №  | Реакция                      | $\Delta V_s, \text{см}^3$ |
|----|------------------------------|---------------------------|
| 1  | $Ath = 7En + Qtz + H_2O$     | –30.00                    |
| 2  | $Tlc = 3En + Qtz + H_2O$     | –19.15                    |
| 3  | $3Ath + 4Qtz + 4H_2O = 7Tlc$ | 41.92                     |
| 4  | $Ath = Tlc + 4En$            | –10.85                    |
| 5  | $9En + H_2O = Ath + Fo$      | 33.54                     |
| 6  | $5En + H_2O = Tlc + Fo$      | 22.69                     |
| 7  | $5Ath + 4H_2O = 9Tlc + 4Fo$  | 32.55                     |
| 8  | $2Fo + 3H_2O = Srp + Brs$    | 43.637                    |
| 9  | $5Srp = Tlc + 6Fo + 9H_2O$   | –133.80                   |
| 10 | $6En + 3H_2O = Tlc + Srp$    | 54.222                    |
| 11 | $Fo + En + 2H_2O = Srp$      | 31.336                    |

Примечание. *Ath* – антофиллит, *En* – энстатит, *Qtz* – кварц, *Tlc* – тальк, *Fo* – форстерит, *Srp* – серпентин, *Brs* – брусит.

Note. *Ath* – anthophyllite, *En* – enstatite, *Qtz* – quartz, *Tlc* – talk, *Fo* – forsterite, *Srp* – serpentine, *Brs* – brucite.

(см. табл. 1) заметно контрастней тех, что могут обеспечить субстанции  $H_2O$  и Fe. Количество гидрат-ионов подчиняется функциям стехиометрии и валентности, вклад железистых разностей определяется по магнетизации (Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992).

Петрофизический подход к интерпретации обеспечивает методические возможности выявления свойств легких оксидов металлов (ат. № ≤ 20). Объяснение стационарных явлений – синергия оксидов и нейтральность большей их части (диэлектрики). Геологические следствия – свойства входят в полупроводниковый диапазон, их изменения, включая  $\Delta V_s$ , контрастны и направлены (Sanderson, 1976; Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992; Бацанов, 2000).

Геофизические данные в анализе донорно-акцепторных механизмов – основа разделения оксидов по активационному и аддитивному (диэлектрики) стационарному действию. Минеральные соединения рассматриваются как спектральные объекты. Изучаются: 1) составы оксидов и электронные индивидуальности элементов (металлов); 2) плотность, структура, магнитная восприимчивость (магнетизация), типы связи (ионная, ковалентная, металлическая). Дифференциация свойств (п. 2) и электропроводности, обусловленная составом (п. 1) и термобарическими воздействиями, обеспечивается единой спектральной природой (Овчинников, 1978; Шуй, 1979; Величковский, 2006; Тимохин и др., 2012).

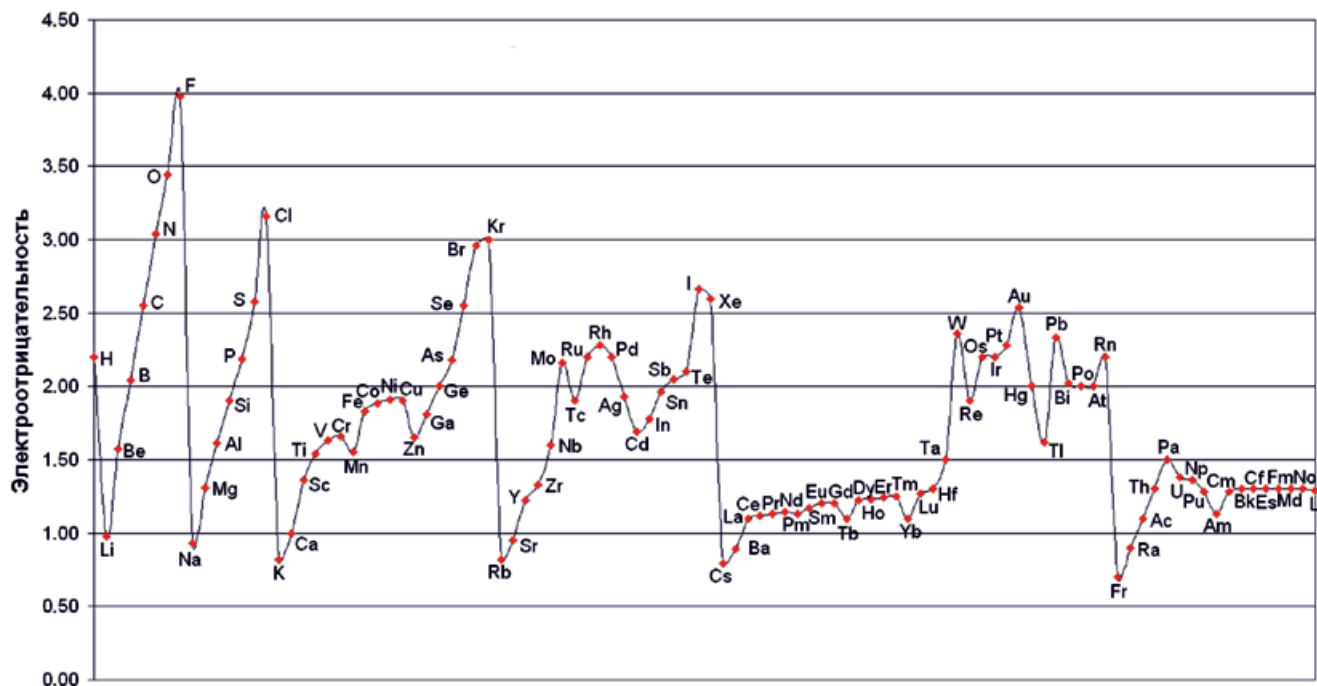


Рис. 1. Относительная электроотрицательность элементов.

Fig. 1. The relative electronegativity of the elements.

Оксиды (ат. № ≤ 20) составляют 40.874–43.464 мас. % земной коры.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  в самостоятельном виде не встречаются, состояние в геологических средах – рассеянные и сложнораспределенные микроразмерные фазы. Оксиды  $\text{Ca}$ ,  $\text{Fe}^{(3+)}$ ,  $\text{Fe}^{(2+, 3+)}$ ,  $\text{Si}$  в виде мономинеральных отдельностей представлены и изучены. Происхождение и природа носителей в полупроводниковых минералах – актуальная тема обсуждения и поллярных дискуссий в современной литературе (Семенов, 1948; Sanderson, 1976; Шуй, 1979; Адамов и др., 1990; Петрофизика..., 1992).

Для раскрытия свойств оксидов по стационарным признакам доступны обзор на уровне изучения элементов и возможности собственных измерений на участках оруденения.

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ (МЕТАЛЛОВ)

Удельные величины металлов обеспечивают спектральный прогноз свойств оксидов. Существенны s-, sp- и d-позиции в периодической таблице; электронные потенциалы  $E_0$  и гальванические свойства (жидких сред-электролитов); относительная электроотрицательность ОЭО (шкала Луо и Бенсона) как выражение химических связей и энергий связей. Симметрично с  $E_0$  изменяется ОЭО (рис. 1).

Низкие значения электроотрицательности у металлов – признак лучших восстановителей, фтор и

кислород – сильнейшие окислители (Овчинников, 1978; Бацанов, 2000).

Связи электрического сопротивления чистых элементов и давления (рис. 2) – единственный имеющийся в литературе прототип твердых тел (КиКоин, 1976; Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992).

Спектр при давлении испытывает главным образом монотонный отток электронов в зону проводимости. Активационный процесс выражен в графиках уменьшения сопротивления от 0 (нормальные условия, н. у.) до экстремума (рис. 3).

Термобарические изменения выражает уравнение Аррениуса:

$$\frac{\rho_p}{\rho} = \exp\left(\frac{-\Delta U - p \cdot \Delta V}{k_B \cdot T}\right), \quad (1)$$

где  $k_B$  – коэффициент Больцмана;  $\Delta U$  – энергия активации;  $\Delta V$  – объем активации; сопротивления:  $\rho_p$  – при давлении  $p$ ,  $\rho$  – при н. у.;  $T$  – температура.

Типичные активационные графики с переносом в точку (0.0) описывает монотонная функция положительной гиперболы I четверти:

$$\text{Lg}\left(\frac{\rho_p}{\rho}\right) = \frac{1}{p - \frac{1}{\text{lg} D}} + \text{lg} D. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), выразим энергию через давление и продифференцируем:

$$\frac{\partial \Delta U}{\partial p} = \frac{k_B \cdot T}{(p - \frac{1}{\lg D})^2} - \Delta V ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta U}{\partial p^2} = (-2) \frac{k_B \cdot T}{(p - \frac{1}{\lg D})^3} < 0 . \quad (4)$$

Вторая производная отрицательная, первая – убывает и меняет знак с “+” на “–” в точке максимума энергии активации (см. рис. 3, нижний график).

Оксиды представляют собой простые соединения, анион O – идентичный окислитель. От элементов d-электронного строения и вплоть до sp, входящих в область ат. № ≤ 20, энергии и потенциалы связей понижаются (см. рис. 1, 2). Металлы с E0 и ОЭО меньше уровня Mg активационных графиков на рис. 3 в интервале 0–10 ГПа не имеют, Li, Na, K, Ca являются восстановителями. Твердоминеральные субстанции их оксидов вместе с SiO<sub>2</sub> – диэлектрики. Напротив, соединения d-элементов и оксиды sp: Mg (граничного) и Al образуют в рудах и породах стационарные фазы проводников и полупроводников в силу активационного соответствия графиков  $\rho_p/\rho$  уравнениям (1)–(4).

Отмечается инверсия свойств CaO ↔ MgO. CaO – диэлектрик. Внедрение в среду диэлектриков MgO как самостоятельное, так и в сочетании с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выражает активацию спектра – усиление пьезофизических свойств. Вместе с проводимостью и основностью необратимо повышение плотности с появлением субстанций Fe – магнетизации – в силу направленности ОЭО (см. рис. 1) и E0<sub>(Ca, Mg, Al)</sub> = –2.90, –2.38, –1.68 В (Sanderson, 1976; Овчинников, 1978; Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992; Бацанов, 2000).

## ИЗУЧЕНИЕ ОРУДЕНЕНИЙ

Месторождениям свойственно пластовое строение. Связи состава и сортовых особенностей обеспечивают земельные оксиды. Имеют место одиночные простоты: в магнетите MgO (+27.7% на контакте с доломитом), боксите Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (+56% на контакте с известняком) замещается CaO. Фиксируются абсолютные замещения Mg вместо Ca, Al вместо Ca (и степени их восстановления). Это в изучении проводимости I рода, ее основных n (собственная проводимость) и p (“дырочная” проводимость) механизмов создает благоприятные условия. Свойства рудных оксидов идентифицированы как источники носителей с высоким разрешением.

Формат эксплуатационной разведки включает в себя методическое комбинирование наблюдений электропроводности – сочетание вертикальных электроразведочных ВЭЗ и равноглубинных съемок с охватом площадей. Опробовались при-

мы, использующие чувствительность измерителей к составу. Установлены сигнальные параметры пород, руд типичных сортов и примесных. Результаты – рисунки изолиний состава, в идеале с разделением в форматных картах и разрезах рудопроявлений на химотипы, с регистрацией объемных сортовых распределений.

На Саткинской группе месторождений наиболее чистый магнетит добывается в Карагайском карьере (см. рис. 4, 5) и подземных участках его флангов.

Бокситы изучались в шахте Ново-Курьинской (СУБР). Подземные электроразведочные, ПЭЗ измерения при заземлениях в кровлю. Использовались архивы данных ПЭЗ с заземлениями в почву на шахтах Курьинская и Красная шапочка. На графиках анализировались градиенты свойств на контактах (рис. 8).

Метод картирования предложен для информационной поддержки геотехнологии в задачах сортового планирования.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Магнетиты и бокситы представляют собой карбонатные образования измененных оксид-минеральных составов (CaCO<sub>3</sub> → kCaO + (1-k)Σ(Z<sub>2</sub>(n<sup>+</sup>)O<sub>n</sub>) + CO<sub>2</sub>). Измерения показали, что при вариациях оксидов (металлов Σ(Z) ат. № ≤ 20, включая Ca) свойства руд и пород за пределы границ природы полупроводников не переходят.

В разное время для обработки слабых флуктуационных сигналов предлагались операторы статистической функции желательности, мультифрактальный анализ (вейвлет-анализ), решения Вейера и др. (Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992; Маракушев, Бобров, 2005; Величковский, 2006). Отличающийся рассмотрением стационарных признаков подход предложен исходя из свойств элементов. Физические константы металлов служат поводом проверки “наследования” спектральной информации оксидами и затем экспериментов в приложениях изучения образцов и сортовых обмеров залежей (архивы собственной разведки и обработки геоданных начиная с 2002–2004 гг.).

Состояние оксидов – рассеянные фазы. Авторство уравнения двухкомпонентной смеси принадлежит И.К. Овчинникову (1978):

$$\rho_n = \frac{3\rho_{\text{зап}} ABC}{3ABC + 2(1 - w_{\text{зап}})\Delta\rho(AB + AC + BC)} , \quad (5)$$

где  $\rho_n$  – сопротивление смеси;  $\rho_{\text{зап}}$  – сопротивление заполнителя;  $w_{\text{зап}}$  – объемное содержание заполнителя;  $\Delta\rho = \rho_{\text{зап}} - \rho_{\text{вкл}}$ ,  $\rho_{\text{вкл}}$  – сопротивление эллипсоидальных включений;  $A = abcA(0)w_{\text{зап}}\Delta\rho + 2\rho_{\text{вкл}}$ ,  $B = abcB(0)w_{\text{зап}}\Delta\rho + 2\rho_{\text{вкл}}$ ,  $C = abcC(0)w_{\text{зап}}\Delta\rho + 2\rho_{\text{вкл}}$ ;  $a, b, c$  – полуоси эллипсоида;  $A(0), B(0), C(0)$  – функции эллиптических интегралов 1-го и 2-го родов и тригонометрических функций.

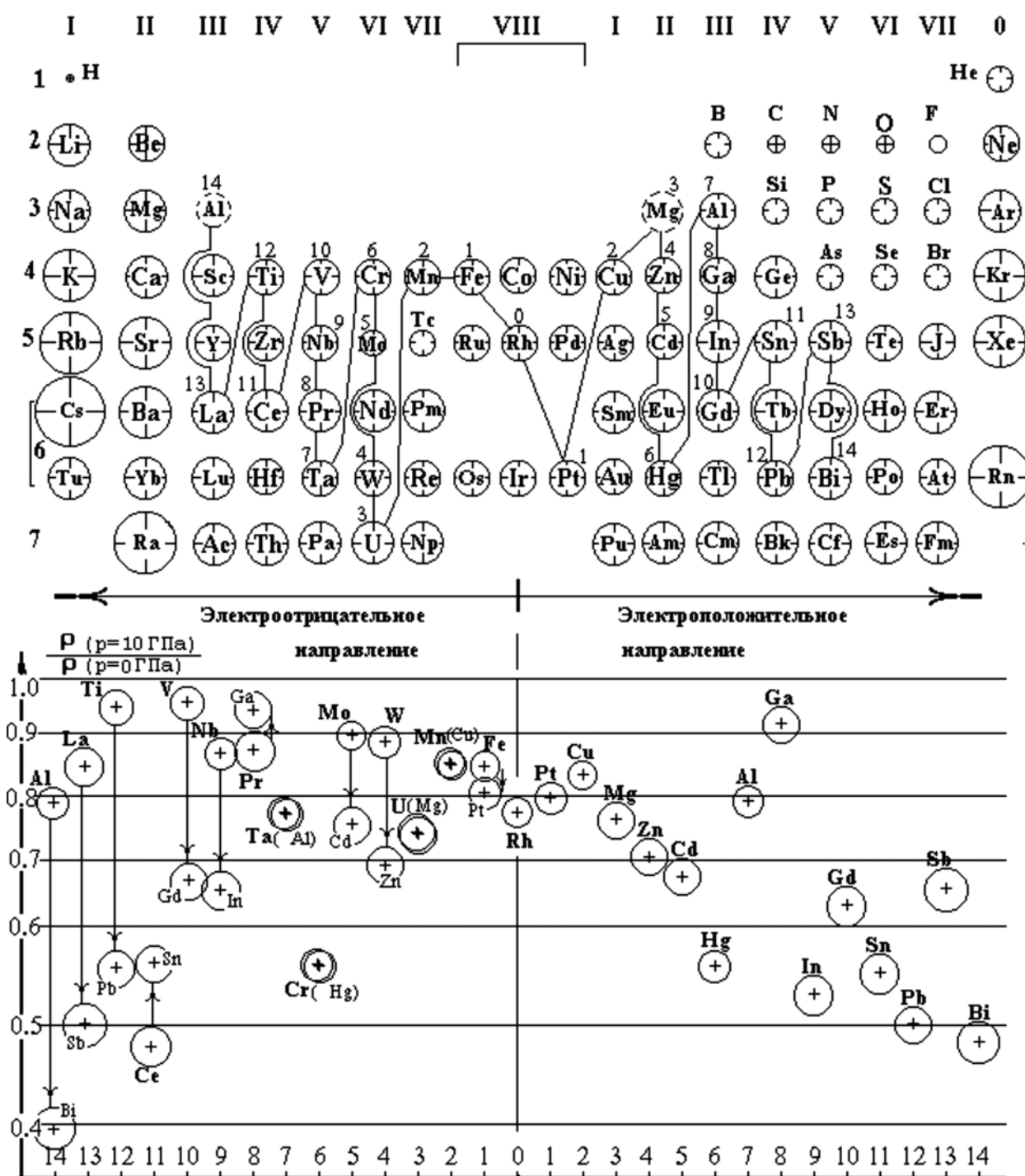


Рис. 2. Практические экстремумы  $D = \rho_p/\rho$  при  $p = 10$  ГПа.

Fig. 2. The practical extremes  $D = \rho_p/\rho$  at  $p = 10$  GPa.

Частный случай формулы (1) для смеси с включениями бесконечно большого сопротивления выражает уравнение А.С. Семенова (1948):

$$\rho_n = \frac{(3 - w_{\text{зап}}) \rho_{\text{зап}}}{2w_{\text{зап}}} \quad (6)$$

Электрические сопротивления слоевых диаграмм (рис. 4, 6, 8) служат расчету активационных свойств  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в карбонатно-ионной среде (табл. 2).

Примеси представляют собой сульфидные и железистые оторочки. Отороченные магнезиты

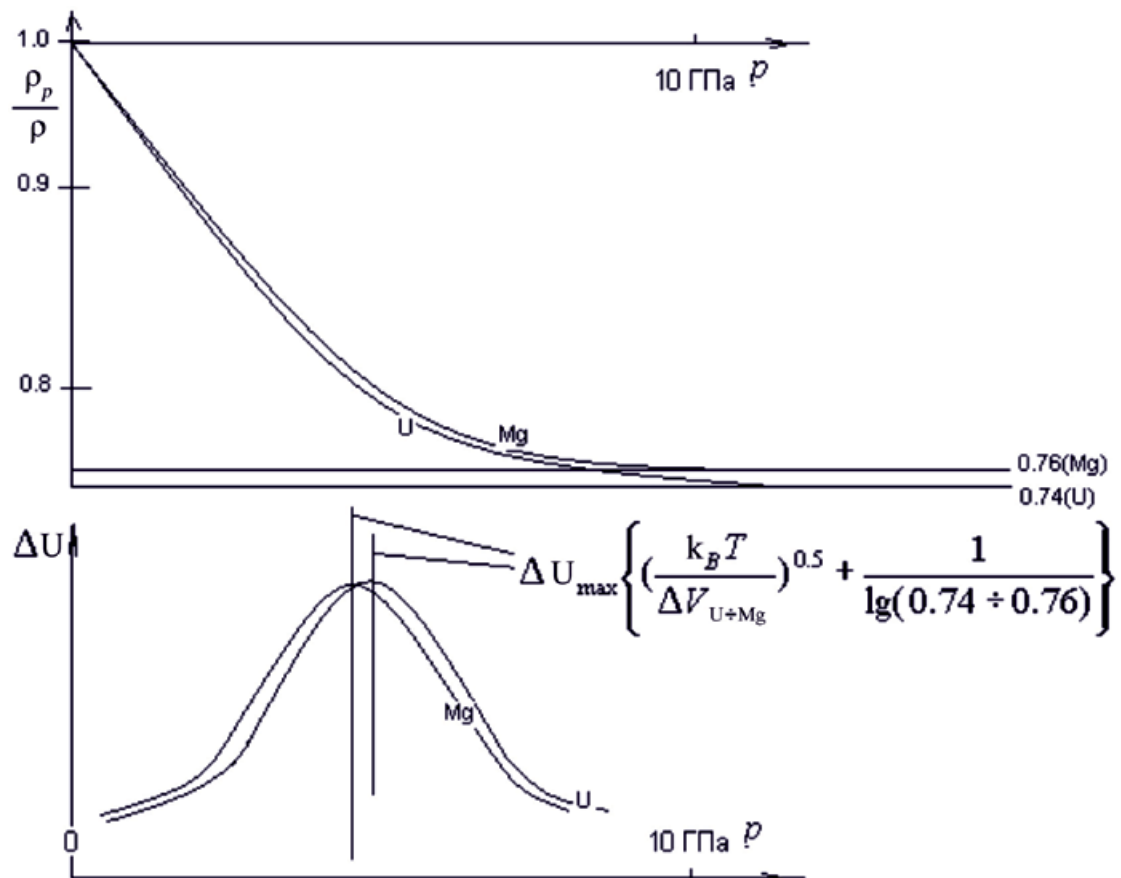


Рис. 3. Изменения  $\rho_p/\rho$  и энергии активации  $\Delta U$  (на примере Mg и U).

Fig. 3. Changes  $\rho_p/\rho$  and activation energy  $\Delta U$  (for example, Mg and U).

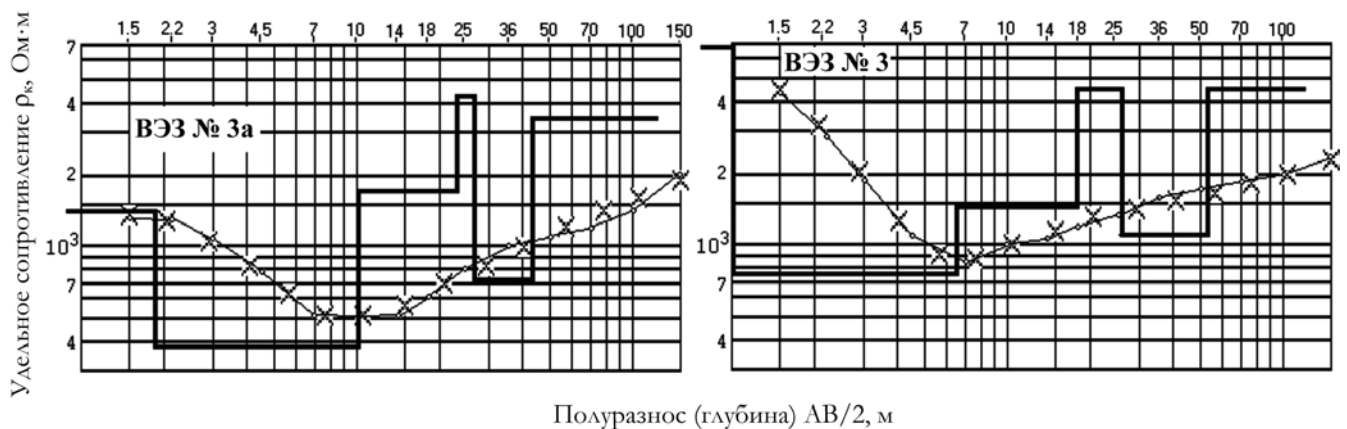


Рис. 4. Графики ВЭЗ № 3а и № 3 и диаграммы слоевой IBM-интерпретации.

Сплошной линией обозначены измеренные графики, линией с крестиками – полученные в итоге обработки по программе КОВ/Еf.exe (С.Н. Голод, М.И. Красницкий, А.В. Тимохин).

Fig. 4. Graphics VES No. 3a and 3 and diagrams of layered IBM interpretation.

The solid line – the measured graphics, the line with crosses – received as a result of processing under the program KOB/Ef.exe (S.N. Golod, M.I. Krasnitsky, A.V. Timohin).

**Таблица 2.** Сопротивления руд, пород, константы оксидов**Table 2.** Resistance of ores, rocks, oxide constants

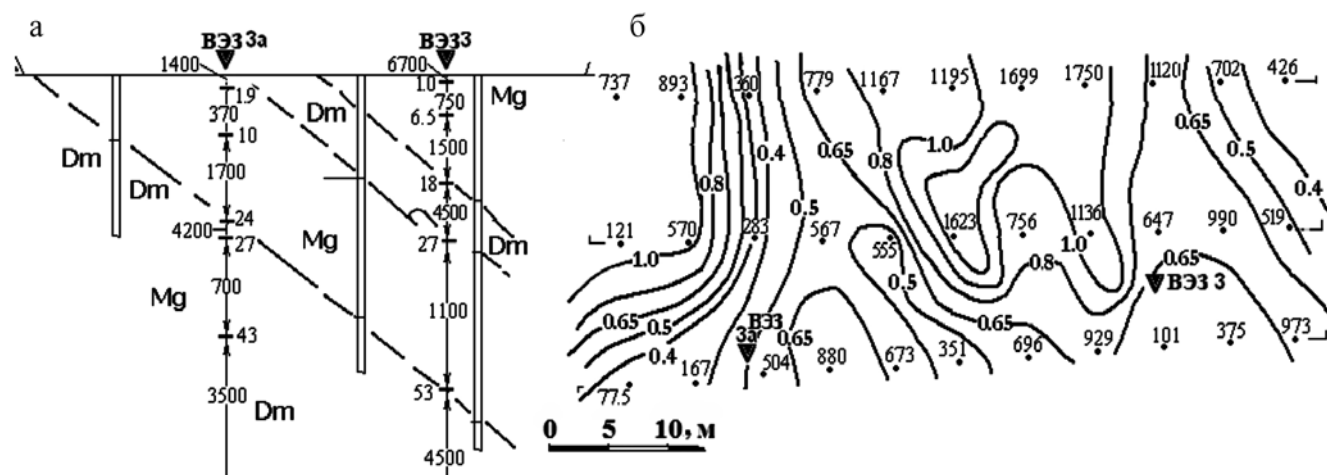
| Параметр                        | ОАО “Комбинат Магнезит”*                |   |                         | СУБР**            |  |                                       |
|---------------------------------|---|---|-------------------------|-------------------|--|---------------------------------------|
| Порода, руда, минерал (фракция) | Доломит                                 | Магнезит                                | Магнезия                | Известняк         | Боксит   | Глинозем                              |
| Формула                         | Ca,<br>MgCO <sub>3</sub><br>MgO = 20.0% | Ca,<br>MgCO <sub>3</sub><br>MgO = 47.7% | MgO = 100%              | CaCO <sub>3</sub> | Ca,<br>AlCO <sub>3</sub><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 56.0% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 100% |
| Сопротивление руды/породы, Ом·м | 4700<br>(3840)                          | 1300<br>(984)                           | 400 = 10 <sup>2.6</sup> | 12 000            | 240<br>(200)   | 20 = 10 <sup>1.3</sup>                |

Примечание. Свойства на осадочных, низкотемпературных залежах.

\*Полевые работы выполнены под руководством д-ра техн. наук Ю.П. Шуплецова (учтены и обработаны на новом уровне архивов группы В.Ф. Брызгалова). \*\*Полевые работы выполнены под руководством д-ра техн. наук Ю.В. Лаптева при деятельном участии от предприятия главного инженера М.Н. Ковалева, а также Н.Н. Муравья, В.И. Полховского.

Note. Properties on sedimentary, low-temperature deposits.

\*The field works were carried out under the supervision of Grand PhD in Engineering sciences Y.P. Shupletsov (the archives of the V.F. Bryzgalov group were taken into account and processed at a new level). \*\*The field works were carried out under the supervision of Grand PhD in Engineering sciences Y.V. Laptev with the active participation of the company's chief engineer M.N. Kovalev, as well as N.N. Muravei, V.I. Polkhovskii.

**Рис. 5.** Разрез и площадной рисунок изолиний сортовой геометризации.

Изолинии: а – интерпретационные (отражены на диаграммах), б – измеренные в латерально-глубинном поле. Цифры – сопротивления  $\rho$ , Ом·м. Dm – доломит, Mg – магнезит.

**Fig. 5.** Section and the areal pattern of the contour bars of the geometrization.

Contour bars: а – the interpretative (are reflected in the figures), б – measured in the lateral deep field. The numbers are resistances  $\rho$ , Ohm. Dm – Dolomite, Mg – Magnesite.

отличают компоненты серы, бокситы – плитчатые разности. Признаки сильных электронных объектов – наложение проводимости, существенное уплотнение.

Преобразования вещества при метаморфических процессах по сумме реакций и парагенезисов – предмет изучения петрологии, включает объемный анализ (см. табл. 1).



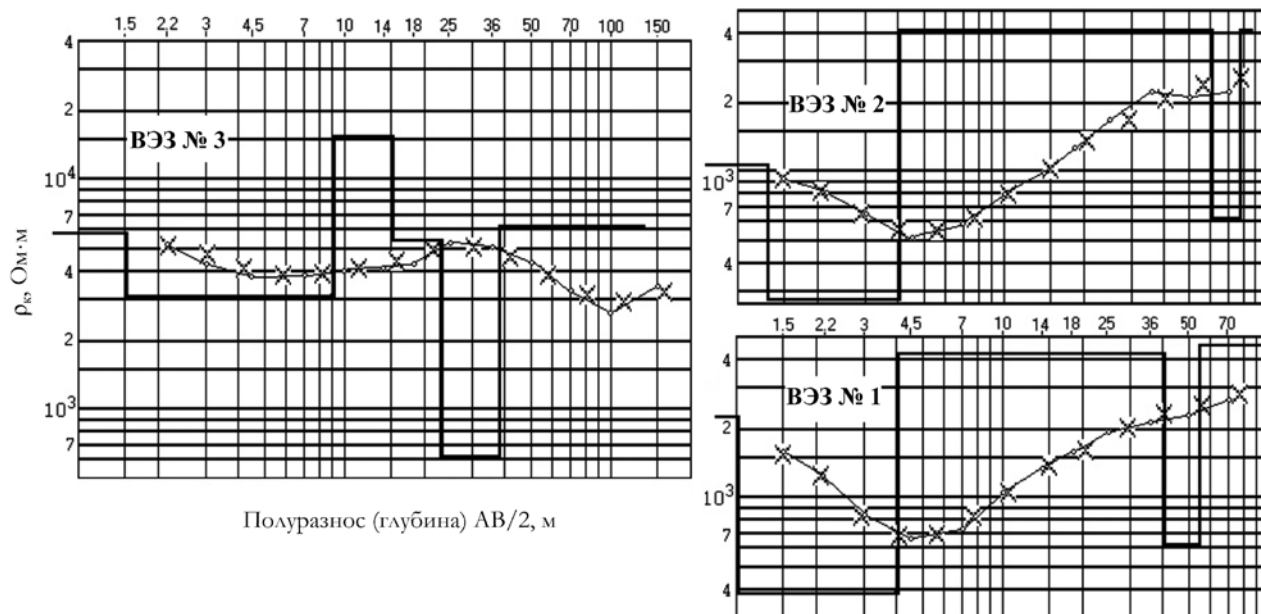


Рис. 6. Графики ВЭЗ и диаграммы слоевой IBM-интерпретации.

Условные обозначения – см. рис. 4.

Fig. 6. Graphics VES and diagrams of layered IBM interpretation.

The legend – see Fig. 4.

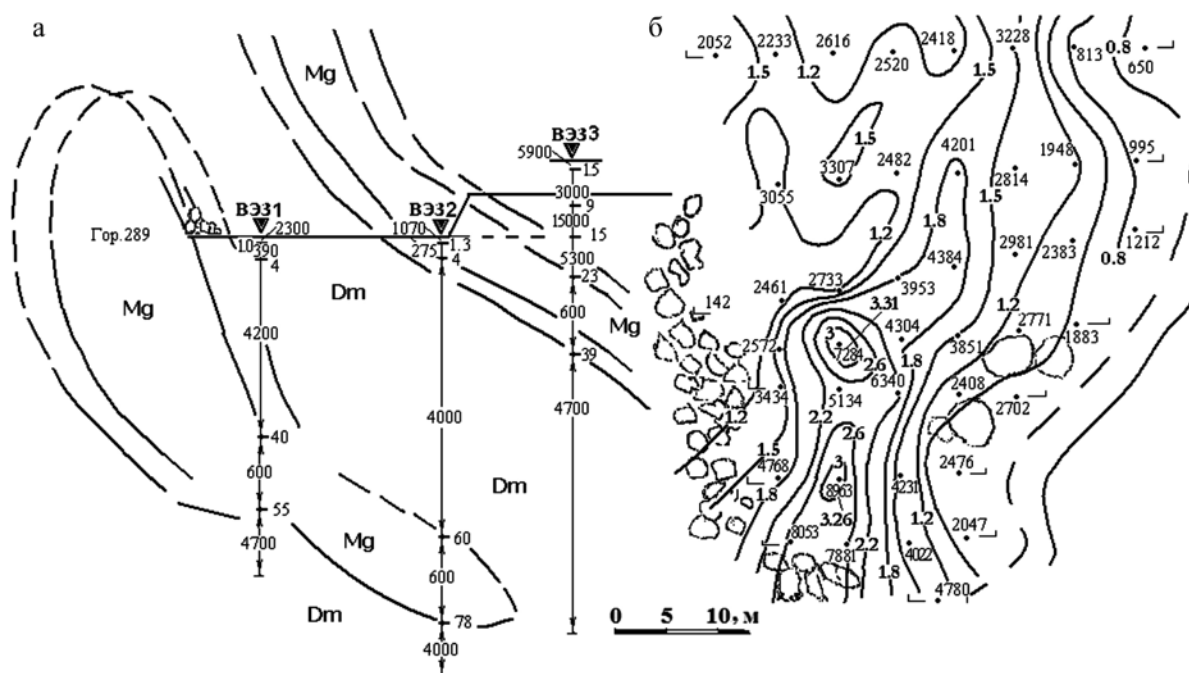
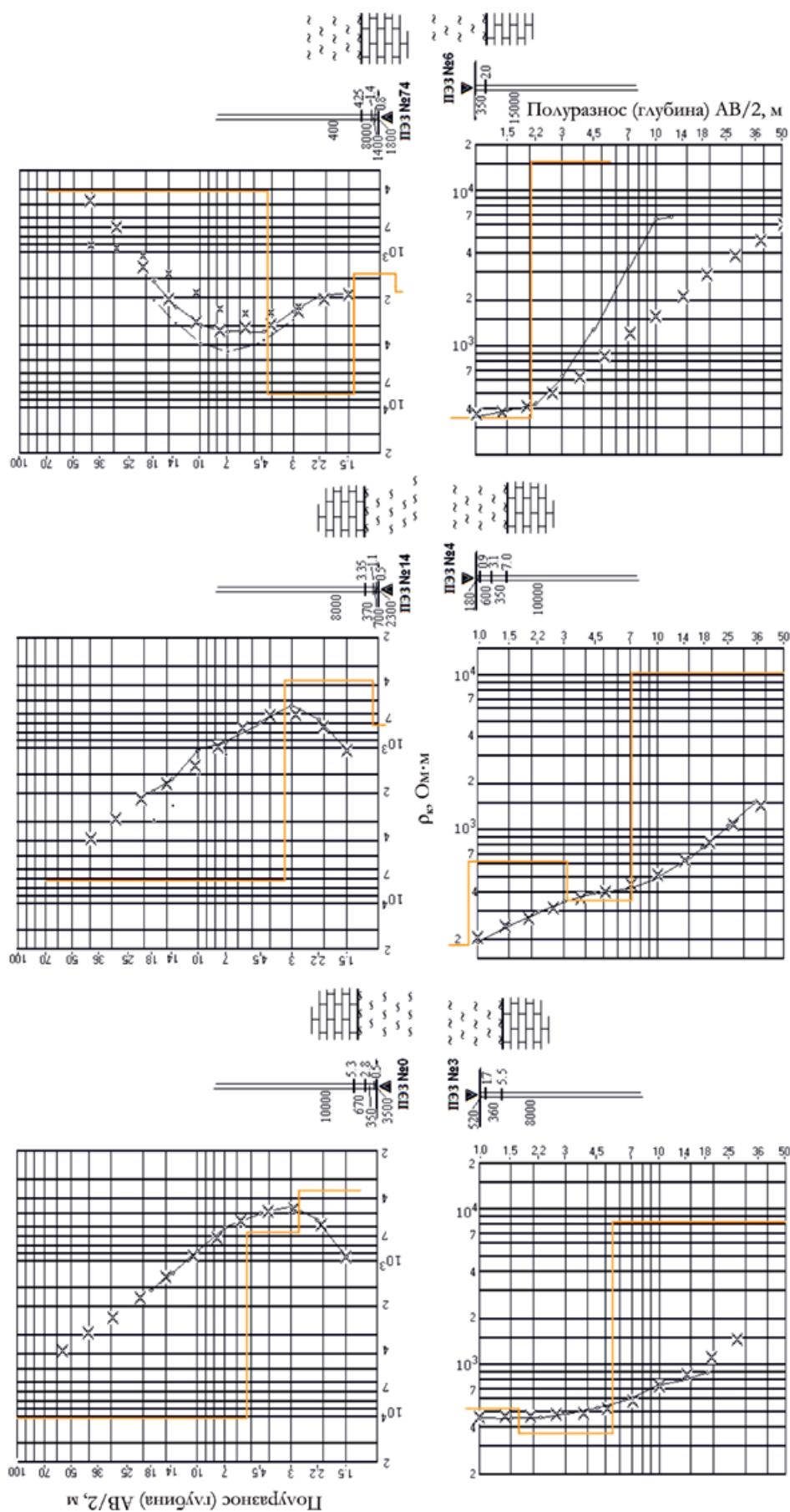


Рис. 7. Разрез и площадной рисунок изолиний сортной геометризации.

Условные обозначения разрезов и съемок см. на рис. 5. Кольцевые фрагменты – каплевидные полости карста с наклоном параллельно контактной зоне (Тимохин, 2010; Тимохин и др., 2015).

Fig. 7. Section and the areal pattern of the contour bars of the geometrization.

Symbols for sections and surveys in Fig. 5. Ring fragments – drop-shaped karst cavities with an inclination parallel to the contact zone (Timokhin, 2010; Timokhin et al., 2015).



**Рис. 8.** Графики ПЭЗ и слоевые диаграммы. Литологические колонки скважин.

Цифры у колонок – интерпретационные сопротивления слоев и контактов: высота в кровле и глубина в почве. Условные обозначения – рис. 4.

**Fig. 8.** Graphics PES and diagrams of layered. Lithological columns of wells.

Numbers for columns – interpretation resistances of layers and contacts: height in the roof and depth in the soil. The legend – see Fig. 4.

Таблица 3. Свойства минеральных оксидов  
Table 3. Properties of mineral oxides

| Оксиды:<br>электронный тип Zx <sup>+</sup><br>минералы, агрегаты – фазы<br>(формула, металлы-металлоиды, катионы x <sup>+</sup> ) | I – по данным изучения мономинеральных образцов (измерено);<br>II – по данным изучения месторождений и обмеров массивов (измерено, вычислено) |       |   |         |   |   | Структура   |
|---|---|-------|---|---------|---|---|---|
|   | Плотность,<br>уд. вес,<br>σ, г/см <sup>3</sup>  |       | Эл. сопротивление,<br>УЭС,<br>ρ, Ом·м                     |         | Магнитная восприимчивость, МВ,<br>χ 10 <sup>-5</sup> ед. СИ |   |   |
|   | I   | II    | I   | II      | I   | II  |   |
| Известь (CaO),<br>Известняк CaCO <sub>3</sub>   | 2.54  | 2.715 |   | 12 000* |   |   | I<br>Известняк – ионный и ковалентный типы связи  |
| Магнезия (MgO)  | –   | 3.25  | –   | 400**   |   |   | II<br>Магнезия (магнезиальная структура)  |
| Глинозем (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  | –   | 3.75  | –   | 20**    |   | Бж*:<br>370-4400,<br>Б: 12-880            | Глинозем (не выше Θ, γ – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> структур)<br>*Бж – боксит железистый,<br>Б – боксит   |
| Гематит (оксид Fe <sub>3+</sub> ),<br>Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Г*5.1   |       | 10 <sup>-4</sup>  |         | Г*:<br>130–1300, м:<br>(4–25) · 10 <sup>-5</sup>            |   | В габбро, рудах асбестов и титаномангнетитов Fe восстановлено, поэтому магнезит   |
| Вюстит (оксид Fe <sub>2+</sub> ),<br>FeO  | –   |       | –   |         | –   |   | В оруденениях асбестов и титаномангнетитов ТМ ассоциирован с γ – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в шпинели   |
| Магнетит (ферромагнетик, смесь оксидов Fe <sup>3+</sup> и Fe <sup>2+</sup> ) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                       | 5.09  |       | 10 <sup>-5</sup><br>(10 <sup>-2</sup> –10 <sup>-1</sup> ) |         | (8.8–25) · 10 <sup>-5</sup>                                 | О*:<br>0.01–20,<br>П: 0.3–4.5,<br>ТМ : 13 | Шпинель изоморфного примесного ряда (чаще всех Al, Mg./ χ = 2.8 σ = 3.6 (3.5–3.7))<br>*О – оливин, П – пироксен, ТМ – титаномангнетит, σ = 4.72 (4.4–4.9) |
| Оксид скандия (ScO)   |   |       |   |         |   |   | Изоморфно в бокситах и ТМ   |
| Оксид титана (TiO <sub>2</sub> )  | Р*4.1   |       |   |         | Р* 10.6   |   | Изоморфная примесь в ТМ   |
| Оксид ванадия (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )  |   |       |   |         |   |   | Изоморфная примесь в ТМ   |
| Магнезиоферрит (MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )  |   |       | 3 · 10 <sup>-1</sup>                                      |         | 10 · 10 <sup>-5</sup>                                       |   | Магнезиальная шпинель   |
| Сидерит (FeCO <sub>3</sub> )  | 3.79  |       | 10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>                          |         | 2500–7500   |   |   |

\*В условиях водонасыщения ( $\rho$  сухого известняка 70 000–150 000 Ом·м и более). \*\*Вне зависимости от водных условий – константы.

\*Under water saturation conditions (the  $\rho$  of dry limestone is 70 000–150 000 Ohm·m or more). \*\*No matter the water conditions – constants.

Свойства металлов – фактор “наследования” спектральной информации: атомов – оксидами, оксидов – геологической средой. Установленные свойства *sp*-объектов включены в пополняемые архивы петрофизических констант (см. табл. 2, 3). Это позволяет связать сортовое возрастание проводимости с повышением основности и уплотнением, увеличением магнитной восприимчивости (магнетизации), что, в свою очередь, дает повод измерений и, вместе с инструментами петрологии, основания для высокоточной сортовой идентификации малых образцов: кернов, проб из развалов, измельчений и переработанного геоматериала, включая концентраты, хвосты и отходы.

## ВЫВОДЫ

Метаморфические процессы, влекущие за собой перенос вещества и рудообразование, обеспечили спектральные перестроения и дифференциацию свойств рудоносных комплексов. В петрологических подходах используется анализ реакций и объемных эффектов  $\Delta V_s$  – фиксируется уплотнение руд и разуплотнение, свойственное вмещающим породам (Шуй, 1979; Адамов и др., 1990; Петрофизика..., 1992; Trewin, Davidson, 1999; Маракушев, Бобров, 2005). Выделенные константы оксидов являются маркерами свойств ископаемых и фактором восполнения сырьевой интерпретации (Геофизические разведочные работы..., 2006; Тимохин и др., 2012; Кантемиров и др., 2018).

1. Нагорные минерализации включают в себя карбонатные хомотипы на терригенных залежах, плагиоклаз-пироксеновые – на магматических. Актуальны оксид-метрические принципы петрофизики. Карты и разрезы в латерально-глубинном поле электрометрии, анализ объектов оксидов дали основания для выделения отдельного вида эксплуатационной разведки. Информационные преимущества – совмещение с технологической оценкой, гибкие методики сгущения сортовых данных между скважинами детальной разведки и взрывания, картирование и идентификация свойств сырья, восполняющие результаты петрологии и превосходящие по точности ряд опробования и все каротажи.

2. Зафиксирована нейтральность Са (впервые в 2002–2004 гг. авторами настоящей работы) в отличие от противоположных представлений об аддитивности Mg. Установлено, что в оксидной среде легких металлов *sp*-электронного строения (сумма всех объектов элементов ат. № ≤ 20) активационное действие принадлежит носителям Mg и Al. Направленное усиление стационарных свойств (полупроводниковая природа) определяет внедрения магнезии MgO и глинозема Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в карбонатно-ионную часть CaCO<sub>3</sub> (CaO + CO<sub>2</sub>). В примесных, отороченных рудах приращение проводимости и плотности дополняют сульфиды и ожелезне-

ние (включает намагничивание). Соединения элементов d-типа и n-носители (смещение к природе собственной проводимости) учитываются в уравнениях (5)–(6) во вторых вложениях, вслед за суммой оксидов *sp*-металлов (Соколов, 1962; Тимохин и др., 2012).

3. Отдельный маркер рудных ископаемых в осадках – карстопроявления. Карсты в отороченных рудах встречаются на порядок чаще, выступают поисковым признаком в обширной области оруденений (Геофизические разведочные работы..., 2006). Природа отличается от суффозионной (Соколов, 1962). Накопление вещества MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приводит к существенному уплотнению. Полости с наклоном вдоль контактов имеют каплевидную форму (см. рис. 7) и фиксируются в электрометрии по наличию воздуха, не проводящего ток, по связи объема пустот с  $\Delta V_s$  в выражении контактных парагенезисов (см. табл. 1) и с плотностью оксидов (см. табл. 3). Данный вид карста предложено классифицировать как литологический (Тимохин, 2010; Тимохин и др., 2015).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природа свойств оксидов *sp*-металлов отличается от обменного, выделяемого в структурах шпинели (субстанции fe). Фундаментальный вопрос в объяснении связей диапазонов изменений измеряемых свойств и составов – происхождение носителей (n- и p-источники). Mg и Al обладают крайне низкой растворимостью до 0.2 ат. %, создают отдельные оксидные фазы (Шуй, 1979; Петрофизика..., 1992). Ионно-электронное состояние с Са исключено – ряд *известняк* → *доломит* → *магнезит* → *боксит* выражен в контрастных изменениях текстур и структур, в объемных эффектах  $\Delta V_s$ . Появление носителей – следствие необратимости стехиометрических дефектов. Лишь затем следует интерпретация инверсии CaO ↔ MgO. В активации оксидных спектров роль атомного размера Mg оказывается сильнее действия массы Са. В сформированной ковалентной связи явление донорно-акцепторного механизма обусловлено избытком металла в MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> как источнике носителей при их внедрении в ионную среду: SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, Na<sub>2</sub>O. При этом в ионных типах связи предполагается, что с Na<sub>2</sub>O или уже с CaO имеется, напротив, стехиометричность формул по валентности.

Стационарные свойства легких оксидов и дифференциация их контрастных сигналов в геоматериалах прочно связаны между собой в силу единства спектральной природы. Они использованы в эксплуатационной разведке на основе электрометрии, с их применением следует ожидать новые прототипы осуществления сортовой оценки высокой точности, раскрываемые в потенциале и восполняющем комбинировании различных петрофизических измерителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Агошков М.И. (2012) Основные показатели полноты и качества извлечения полезных ископаемых из недр при добыче. М.: СФТП ИФЗ АН СССР, 39 с.
- Адамов Э.В., Алексеева Т.И., Андреев Е.Е. (1990) Технологическая оценка минерального сырья. Справочное пособие. (Под ред. П.Е. Остапенко) М.: Недра, 264 с.
- Бацанов С.С. (2000) Структурная химия. Факты и зависимости. М.: МГУ, 292 с.
- Величковский Б.М. (2006) Когнитивная наука. Основы психологии познания. М.: ИЦ "Академия", 448 с.
- Геофизические разведочные работы на восточном фланге Степного участка Саткинского месторождения магнезитов методом площадной и глубинной электрометрии (2006). Отчет ИГД УрО РАН. Екатеринбург, 36 с.
- Кантемиров В.Д., Тимохин А.В., Титов Р.С. (2018) Оценка засоренности массива известняка с использованием методов электроразведки. *Маркшейдерия и недропользование*, (2), 21-31.
- Кикоин И.К. (1976) Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
- Маракушев А.А., Бобров А.В. (2005) Метаморфическая петрология. М.: Изд-во МГУ, 256 с.
- Овчинников И.К. (1978) Теория поля. М.: Недра, 327 с.
- Петрофизика. Справочник. (Под ред. Н.Б. Дортман). (1992). В 3 кн. Кн 1. Горные породы и полезные ископаемые. М.: Недра, 361 с.
- Семенов А.С. (1948) Влияние структуры на сопротивление агрегатов. *Материалы ВСЕГЕИ*, (12), 43-61.
- Соколов Д.С. (1962) Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 322 с.
- Тимохин А.В. (2010) Решение проблемы карстологической безопасности Урала с применением измерительных средств картирования и геометризации геолого-техногенных сред. *Золотодобывающая промышленность*, (2-4), 26-33.
- Тимохин А.В., Лаптев Ю.В., Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. (2015) Карстогенный режим фильтрации как фактор полезного сигнала электрометрии для регистрации геометрии пустот и сплошности. *Инженерная защита*, (1), 116-126.
- Тимохин А.В., Лаптев Ю.В., Титов Р.С., Яковлев А.М. (2012) Геометризация оруденений с применением электрометрии (на примере месторождений огнеупоров и бокситов). *Изв. вузов. Горн. журн.*, (6), 94-102.
- Типовые методические указания по определению, нормированию, учету и экономической оценке потерь твердых полезных ископаемых при их добыче (1972). М.: Госгортехнадзор СССР. 221 с.
- Шуй Р.Т. (1979) Полупроводниковые рудные минералы. Л.: Недра, 288 с.
- Sanderson R.T. (1976) Chemical Bonds and Bond Energy. N. Y.: Acad. Press, 218 p.
- Trewin N.H., Davidson R.G. (1999) Lake-level changes, sedimentation and faunas in a Middle Devonian basin-margin fish bed. *Geol. Soc.*, **156**(3), 535-548.
- Adamov E.V., Alekseeva T.I., Andreev E.E. (1990) Technological evaluation of mineral raw materials. Reference guide. (Ed. P.E. Ostapenko). Moscow, Nedra Publ., 264 p. (In Russian)
- Agoshkov M.I. (1970) Main indicators of completeness and quality of extraction of minerals from the subsurface during mining. Moscow, SFTGP IFZ Acad. Nauk SSSR, 39 p. (In Russian)
- Batsanov S.S. (2000). Structural chemistry. Facts and dependencies. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 292 p. (In Russian)
- Geophysical exploration on the Eastern flank of the Steppe section of the Satka deposit of magnesites by the method of area and depth Electrometry. (2006). Report of The Institute of Mining of Ural Branch of RAS. Ekaterinburg, 36 p. (In Russian)
- Kantemirov V.D., Timokhin A.V., Titov R.S. (2018) Estimation of limestone contamination using electrical survey methods. *Marksheideriya i nedropol'zovaniye*, (2), 21-31. (In Russian)
- Kikoin I.K. (1976) Tables of physical quantities. Moscow, Atomizdat Publ., 1008 p. (In Russian)
- Marakushev A.A., Bobrov A.V. (2005) Metamorphic Petrology. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 256 p. (In Russian)
- Ovchinnikov I.K. (1978) Field theory. Moscow, Nedra Publ., 327 p. (In Russian)
- Petrophysics. Guide. In 3 vol. V. I. Rocks and minerals. (Ed. N.B. Dortman) (1992) Moscow, Nedra Publ., 361 p. (In Russian)
- Sanderson R.T. (1976) Chemical Bonds and Bond Energy. N. Y., Acad. Press, 218 p.
- Semenov A.S. (1948) Influence of structure on the resistance of aggregates. *Materials of VSEGEI*, (12), 43-61. (In Russian)
- Shui R.T. (1979) Semiconductor ore minerals. Leningrad, Nedra Publ., 288 p. (In Russian)
- Sokolov D.S. (1962) Basic conditions for development of karst. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 322 p. (In Russian)
- Standard methodological guidelines for normalizing losses of solid minerals during mining (1972). Moscow, Gosgortekhnadzor SSSR Publ., 221 p. (In Russian)
- Timokhin A.V. (2010) Solving the problem of karstological safety of the Urals with the use of measuring tools for mapping and geometrization of geological and technogenic environments. *Zolotodobyvayushchaya Promyshlennost'*, (2-4), 26-33 (In Russian)
- Timokhin A.V., Laptev Yu.V., Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. (2015) Karstogenic filtration mode as a factor of a useful Electrometry signal for registering the geometry of voids and continuity. *Inzhenernaya Zashchita*, (1), 116-126. (In Russian)
- Timokhin A.V., Laptev Yu.V., Titov R.S., Yakovlev A.M. (2012) Geometrization of mineralization using Electrometry (on the example of refractories and bauxite deposits). *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Gorn. Zhurn.*, (6), 94-102. (In Russian)
- Trewin N.H., Davidson R.G. (1999) Lake-level changes, sedimentation and faunas in a Middle Devonian basin-margin fish bed. *Geol. Soc.*, **156**(3), 535-548.
- Velichkovskii B.M. (2006) Cognitive science: Fundamentals of the psychology of cognition. Moscow, Akademiya Publ., 448 p. (In Russian)