

Науки о Земле

УДК 622.023.6

Шевченко Юрий Степанович
Yuriy Shevchenko



ДЕФЕКТНОСТЬ И ПРОБЛЕМЫ АКТИВАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ

THE IMPERFECTION AND PROBLEMS OF MINERAL SYSTEMS ACTIVATION

С точки зрения добычи и переработки полезных ископаемых дефектность минеральных систем (МС) первична, поскольку она задает активность руд, их свойства, поведение и долговечность в поле действующих сил. Рассмотрен ряд особенностей генетической дефектности природных МС, недостаточно отраженных в литературе.

В первую очередь это структурная дефектность и геохимическая (и связанная с ней электрохимическая), отражающие условия становления и преобразования МС. Показано, что на дефектах МС концентрируются и перераспределяются микроэлементы и напряжения разного рода. Выделены уровни развития дефектности МС с учетом активационного воздействия на данные системы, связанного с технологическими процессами эксплуатации месторождений полезных ископаемых

Ключевые слова: минеральная система, дефектность, активация, релаксация

The imperfection of natural mineral systems (MS) is primarily vital, because it predetermines ore activation, properties, conduct and long-living in field of active power. The row of peculiarities of MS genetic imperfection is observed a few of which being reflected in literature. In the first place it is structural and geochemical imperfection (and connected with them electrochemical imperfection) reflecting the conditions of coming into being and transformation of MS. It is shown that on imperfections of MS microelements and different tensions are concentrated and redistributed. The levels of imperfection evolution with regard to activation influence on MS, connected with technological processes of mineral resource deposits exploitation are pointed out

Key words: mineral system, imperfection, activation, relaxation

В природе нет идеально гомогенных по составу и строению объектов, особенно если речь идет о месторождениях, горных породах, рудах и минералах. В них всегда имеются нарушения, т.е. дефекты разного рода: разломы, трещины, поры, инородные включения и т.п.

С точки зрения добычи и переработки полезных ископаемых дефектность минеральных систем первична, поскольку она задает активность руд, их свойства, поведение, долговечность в поле действующих сил. Горнорудная (и даже обогатительная)

практика практически ничего не знает о дефектности минеральных систем. Ряд работ, например, [13-16], восполняет пробел в знании дефектности минеральных систем, хотя и рассматривают ее в несколько ограниченном плане. Обычно в горнорудной практике исследуют макродефектность, характеризуемую блочностью пород, их трещиноватостью, неоднородностью структуры и текстуры и др. Более мелкие, на уровне минеральных систем и отдельных минералов, дефекты практиков не интересуют, поскольку считается, что при мас-

совой добыче и переработке руды главную роль играет не микро-, а макродефектность. Действительность такого «постулата» требует соответствующего рассмотрения, поскольку исследования показывают, что для крупных (масштабных) объектов характерны, например, микродеформации вплоть до вращения зерен [2], проявление масштабного эффекта [3], и предлагается оперировать таким понятием, как квантовая геомеханика [14].

Анализ реальных поли- и мономинеральных объектов показывает, что следствием дефектности является отклик перерабатываемого материала на внешнее воздействие, а отклик, в свою очередь, характеризуется релаксационными явлениями, учет которых позволяет значительно повысить эффективность отбойки руд (первой стадии в геотехнологическом цикле), рудоподготовки и последующих обогащительных процессов [20, 21].

Выделяются два вида дефектности: структурная, являющаяся генетически первоочередной, и геохимическая.

1. Структурная дефектность. При становлении руды (и породы) минералы с точки зрения практически попадают в неравновесные условия, поэтому при кристаллизации в моноструктурной матрице они являются центрами концентрации напряжений и вокруг них образуется система радиальных и (или) концентрических трещин. Эти трещины часто сливаются, образуя своеобразную грануляцию монофазы-матрицы. В целом, вариации форм проявления структурной дефектности зависят от взаимоотношения минералов, минералов и матрицы (основной массы породы), а также от условий становления и текстурно-структурных особенностей матрицы.

При процессах изменения пород к первичной (если она сохранилась) дефектности добавляются вторичные структуры распада, диффузионные «дворики» и т.п. В других случаях, особенно когда породы подверглись стрессовому метаморфизму, релаксация напряжений проявляется в дезинтеграции и последующем растворении реликтов минералов, что создает своеобразные

разные геохимические «дворики» и ореолы дефектов. В таких тектонитах наблюдается явление зернограничной деформации и проскальзывания. При электронно-микроскопических исследованиях часто на фоне деформаций хрупкого разрушения (трещины, катаклаз) фиксируются участки пластической деформации, например, в оливине, на его контакте с более плотным пироксеном. При этом ядерная часть оливина практически остается неизменной, недеформированной, а вокруг нее развивается система трещин, относительно которых нетронутые блоки сдвинуты ступенчато.

Подобные концентрации деформаций отмечены и в рудных объектах [8, 18]. В [19], например, подчеркнуто, что средняя плотность дислокаций составляет $(1,2-2) \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ и около 1/3 их сосредоточена в границах субзерен. Возможно, этим объясняется отличие процессов на межфазных границах от условий, действующих в объемах самих фаз [12]. К тому же зоны поверхностей дефектов, где происходит данная концентрация напряжений (деформаций), находится еще и в крайне неравновесных физико-электрохимических состояниях.

2. Геохимическая дефектность полиминеральных объектов (ПМО) — дисперсия содержаний окислов в смежных минералах ПМО весьма значительна. Несомненно, что вследствие этого на границах срастания минералов неизбежен и соответствующий химический градиент. В данном плане наиболее интересно изучение вариаций не окислов, а микроэлементов, как более тонких индикаторов дефектности ПМО и его составляющих. Так, при микронзондовом профилировании контактовых участков (рис. 1) наблюдаются скачки содержаний элементов и колебания их интенсивности около какого-то среднего положения. Например, для железа интенсивность изменяется в пределах $\pm(0,1...0,2) \times 10^3$, причем период колебаний составляет порядка 60 мкм, что совпадает с порядком размера микропор в деформированных материалах и тождественно длине свободного пробега фонона в дилатонной гипотезе С.Н. Журкова.

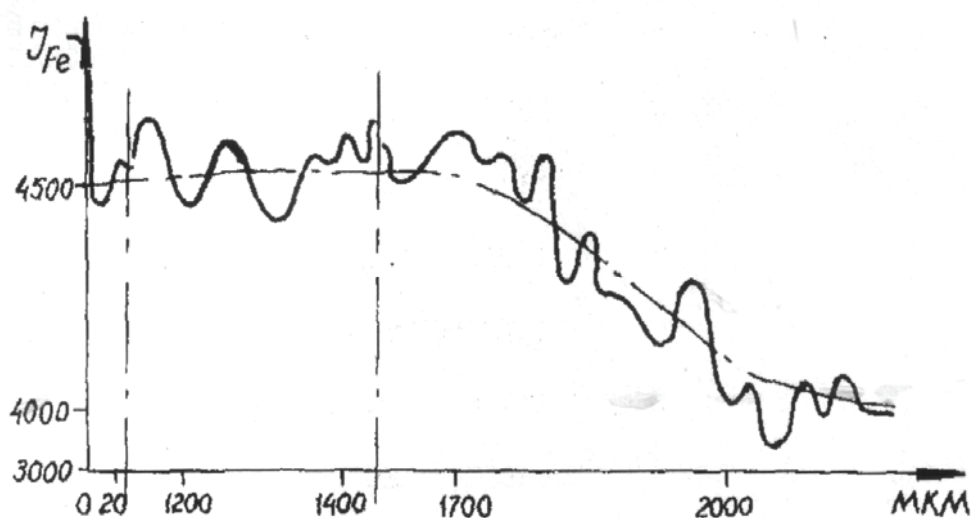


Рис. 1. Изменение интенсивности железа при удалении от кристалла магнетита. Микронзондовый анализ, оператор О.В. Хмельникова, ИГиГ СО АН СССР

На контактовых участках происходит изменение микротвердости минералов [17], что также влияет на характер распределения и накопления дефектов. То есть между вариациями микротвердости и поведением микроэлементов обнаруживаются определенные связи, свидетельствующие о том, что к механизму активации перерабатываемого минерального сырья можно подойти и со стороны геохимии, т.е. выведения определенных корреляций между его физико-механическими свойствами и вариациями микроэлементного состава в нем, особенно на дефектах структуры.

Что касается геохимической дефектности гомогенных минеральных объектов, то гомогенные руды и породы вследствие значительной дефектности трудно назвать

однородными, поскольку даже в вулканическом стекле, образованном при высоких скоростях закалки, обнаруживается масса неоднородностей разного рода. То есть минеральные системы на самом деле являются высокодефектными образованиями, будь то породы, руды и даже отдельные минералы. Так, например, в незональных кристаллах породообразующих минералов имеются многочисленные макро- и микродефекты нескольких типов: трещины и поры, дислокационные границы, структуры распада и роста (табл. 1). Среднее расстояние l^* между дефектами до $10^{-1} - 10^{-4}$ м (микродефекты с l^* на уровне $10^{-5} - 10^{-6}$ м и менее) практически не поддаются учету и, можно сказать, создают «фон» объекта.

Таблица 1

Расстояние (l^* , $\times 10^{-6}$ м) между дефектами в минеральных объектах

Дефект	Плагиоклазы	Пироксены
Структуры распада	(4...6)/8	—
Дислокационные границы	—	(0,63...5)/5
Трещины, поры	(0...10 ⁵)/17	—
Деструкционные дефекты	(0,5...1)/3	(1...10)/2
Минеральные включения	(0,5...10 ⁴)/4	(1...10 ⁴)/3

Примечание: под чертой — объем выборки.

Описанные «первичные» дефекты кристаллической решетки минералов в целом тождественны таковым, полученным при механической и тепловой деструкции. Аналогичный вывод о структурной и геохимической неоднородности можно сделать и для рудных объектов. Так, в «гомогенных» кристаллах часто наблюдается микрогранулярная структура с плотностью p_3 зерен, равной $(0,28 - 2,4) \times 10^3$ штук / 10^{-6} м^2 – пределы, $1,7 \times 10^{13}$ штук / 10^{-6} м^2 – средне-

арифметическое значение ($X_{cp, 10}$). Размеры (длина / ширина) зерен варьируют от $(2,44 - 1,78) \times 10^5 / (1,33 - 0,778) \times 10^5 \text{ м}$ ($p_3 = min$) до $(4,4 - 2,6) \times 10^5 / (1,5 - 0,89) \times 10^5 \text{ м}$ ($p_3 = max$).

Генетическая и приобретенная микро- и макронеоднородность рудных минералов фиксируется исследованиями анизотропии таких свойств разных частей, как термоэдс (ТЭДС), микротвердость, удельное сопротивление и пр. (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2

Анизотропия ТЭДС поверхностей пирита

Элемент кристалла	Значения ТЭДС, мВ
Грань (100)	+ (59,57,54,51), +(15, 15, 14)
Грань (010)	+ (55, 54, 54), + (90, 90, 87, 88)
Ступень роста	- (25, 25)
Грань (001)	+ (60,61,61,60), +(70,70,71,70)
Грань пентагондодекаэдра	+ (60,61,61, 19), -(15, 15,35,30)
Вросток куба	- (40,41,35)
Скульптура роста	- (31,30)

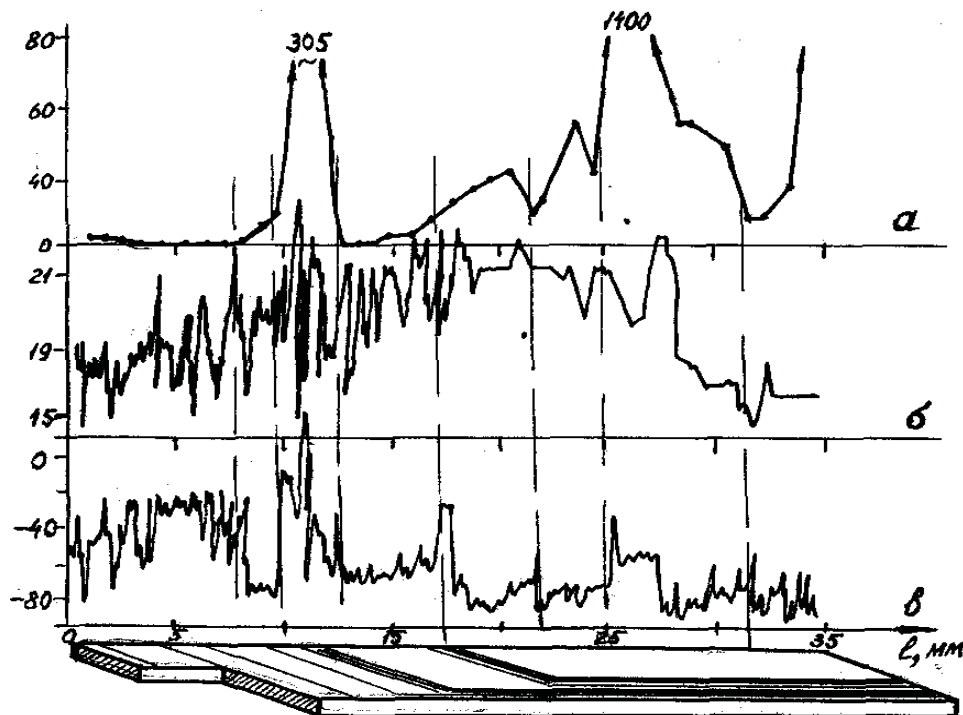


Рис. 2. Вариации удельного сопротивления (а, $\text{Om} \times \text{мм}$), микротвердости (б, $\times 10^2 \text{ кг / мм}^2$) и термоЭДС (в, мВ) на поверхности кристалла пирита

В проблеме исходного (перед добычей и переработкой) состояния минеральных систем весьма интересны и важны вопросы, связанные с генетическими причинами и следствиями неоднородности и дефектности реальных объектов. Исследования дефектности минералов, пород, руд и их комплексов показывают, что горнорудная практика имеет дело с природными объектами практически уже активированными, т.к. они образуются и развиваются в совершенно неоднородных тектонических и термодинамических условиях. Достаточно сказать, что приливные явления постоянно генерируют определенную напряженность пород земной коры; с течением времени (t) приобретенная напряженность спадает со скоростью, определяемой релаксационными характеристиками. Для горнорудных процессов также характерны периодические воздействия, когда напряжения изменяются во времени соответственно частоте внешнего нагружения. Поскольку при данных воздействиях также неизбежны релаксационные явления, возникает дисгармония по фазе с углом δ , содержащая фазный (ε_1) и нефазный (ε_2) компоненты деформации. С учетом закона Гука можно записать, что отношение модулей упругости в обоих случаях равно $E_2 / E_1 = tg \delta$. Поэтому все «константы», характеризующие механические свойства природных объектов, относительноны. Это существенный момент, позволяющий судить о значительной дефектности структуры данных объектов, например, о прочностных свойствах последних: так, начальные напряжения в структурах могут быть причиной даже потери их устойчивости [4]. По [11, 19, 20] существует тенденция снижения предела прочности горных пород при их периодических погружениях в сравнении со статическим воздействием. Можно считать, что реальная прочность зависит от дефектности минеральной системы: $\sigma_p = f(p^*)$, где p^* – плотность физических барьеров или дефектов (свободных поверхностей: границ зерен, включений, нарушений спайности, пор и т.д.) в объеме тела. При небольших деформациях, когда в объеме

тела происходит концентрация напряжений ($\sigma(t) < \sigma_{крит}$):

$$\sigma_0 \sin \omega t = E \varepsilon.$$

Если $\varepsilon = vt$ (v – скоростная характеристика), $\sin \omega t = 2 \pi v$, то $\sigma_0 = E / 2\pi$. Ясно, что $\sigma_0 \gg \sigma_p$, где σ_p характеризует реальный дефектный объект. Таким образом, получаем следующее: в элементарном объеме тела отношение σ_0 / σ_p эквивалентно p^* , поэтому

$$\sigma_0 = E / 2 \pi p^*.$$

Следствием дефектности реальных объектов является не только вариативность их прочностных и других характеристик. Дефектная система, будь то массивная руда или дисперсные сухие, или продукты в виде пульпы, характеризуется градиентными полями, возникающими из-за некоторых различий между минеральными зёрнами или их участками [1, 5, 19]. То есть данные объекты, во-первых, неравноценны по электрохимическим характеристикам, во-вторых, способны относительно друг друга или относительно раствора (в пульпе) играть роль электродов, из-за чего неизбежно появление разности электрохимических потенциалов ($\Delta \xi_i$)

$$\Delta \xi_i = -\Delta E_{CI} / v_{II} \Phi,$$

где ΔE_{CI} – изменение свободной энергии;

v_{II} – валентность ионов;

Φ – постоянная Фарадея.

В таких условиях (с учетом химического градиента) неизбежно появление и токов, величина которых зависит от токов обмена $I_{об}$ на границах фаз и падения потенциалов в поверхностных и дефектных электрических слоях

$$I \sim I_{об} \Phi \Delta \xi_i / RT,$$

где R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

В частности, о наличии таких явлений свидетельствует эффект изменения температуры рудной системы при ее активации, сопровождающейся соответствующими деформациями [10, 13]. То есть, когда деформация превышает пределы упругости,

внутри системы развиваются нелинейные процессы, в условиях которых вариации температуры и интенсивность ИК-излучения оказываются более значимыми.

При периодических воздействиях в процессах добычи и переработки руд происходит подпитка неравновесности состояния активируемого объема рудной системы, когда поле напряженности (поляризующее поле) постоянно изменяется.

$$H_{II} = H_{II0} e^{i\omega t},$$

где H_{II} , H_{II0} – конечное и начальное значения поляризующего поля.

Ясно, что дефекты являются энергоактивными зонами, скоррелированными в первую очередь с электрическими (или электрохимическими) n -слоями. В пределах этих слоев сконцентрирована основная часть энергии горных пород и руд, т.е. они являются источниками и местом сосредоточения неустойчивости последних. Внешние воздействия деформируют и активируют данные зоны, вызывая в итоге соответствующий отклик системы; так, при взрывной отбойке на подземных рудниках данный отклик часто выражен в виде горных ударов и землетрясений.

При внешних, особенно силовых, воздействиях нарушенность стехиометрических отношений в дефектных средах приближается к критической, если учесть при этом эффект Степанова (явление возникновения электрического заряда на поверхности кристалла при внешнем воздействии в отсутствие внешнего электрического поля). Так, в [7] показано, что при большой концентрации таких электрических «двориков» (эквивалент – геохимических) комплексная диэлектрическая проницаемость руд весьма велика: $\varepsilon_{дл} \rightarrow 10^n$, что позволяет говорить о первых, как емкостях энергии, тем более, что

$$\varepsilon_{дл} = \varepsilon_{дл0} - 4\pi i \gamma_0 / \omega,$$

где γ_0 – ионная проводимость среды.

То есть в пределах, как минимум, раздела фаз локализуется мощное поле, достигающее величин $10^5 - 10^8$ В/10⁻² м [6].

Учет данной напряженности есть так-

же резерв для повышения эффективности передела минерального сырья, что особенно важно в технологических циклах подземной добычи полезных ископаемых, отличающихся экстремальностью «рабочих» условий и значительной энергоемкостью процессов отбойки и переработки руд «на месте».

На примерах видно, что исходное сырье уже на входе цикла его добычи и переработки является объектом с явно дефектной структурой, т.е. и с большим внутренним потенциалом. В первую очередь это определяется генетическими причинами, во вторую – забойной отработкой. Отсюда следует, что в процессах переработки минерального сырья главную роль играет именно дефектность, а не «модульные» свойства обогащаемого материала. Близок к такому заключению и вывод, сделанный в [9] на основе стохастического моделирования дезинтеграции сырья.

Время релаксации приобретенного потенциала зависит от перераспределения напряжений в системе между дефектами, которых в объектах рудообогатительной практики много больше, чем у металлов, стекол и пр. Будем считать, что в основной части руд те или иные минералы распределены равномерно с плотностью, выражаемой отношением n_M / V , где n_M – количество минералов в единичном объеме V . Если вокруг одного минерала имеется n_T трещин, то общая плотность их, даже без учета длины, равна, соответственно, $n_T n_M / V$. Поскольку породу составляют несколько основных минералов (2-4 и больше), то суммарная плотность дефектов равна

$$n_{T1} n_{M1} / V + n_{T2} n_{M2} / V + \dots + n_{Ti} n_{Mi} / V.$$

Заметим, что большая часть деформаций под обычным микроскопом не диагностируется, следовательно, можно принять, что даже в нетронутым состоянии единичный объем породы (руды) «пропитан» как дефектными, так и напряженными участками.

Если среднее расстояние между дефектами равно $l^* = 10^{-1} - 10^{-6}$ м, то в куске руды с линейным размером $d = 10^0 - 10^{-3}$

м имеется, как минимум, $d / l^* = 10^3-10^6$ концентраторов напряжений. То есть, учитывая энергетические аспекты, потенциал обогащаемой системы огромен изначально, нужно только воспользоваться им разумно.

Далее на отмеченное генетическое состояние накладываются второй уровень нагрузки: тектонический (стрессовые ориентированные напряжения изгиба, кручения, сдвига, сжатия и т.п.), затем, зачастую на фоне второго, третий — процессы того же метаморфизма, когда происходит интенсивное преобразование и переотложение вещества пород. Четвертый уровень — карьерная отбойка сырья, которую завершает пятый уровень, связанный непосредственно с обогатительным циклом: рудоподготовкой и собственно обогащением.

На первых трех уровнях порода эволюционирует в сторону приобретения равновесного состояния будучи сама внутренне неравновесной. На четвертом уровне плотность деформационных зародышей резко увеличивается, достигая максимума при взрывной отбойке и последующей рудоподготовке. Этим моментом практика дезинтеграции сырья не пользуется, подвергая его излишнему стрессовому воздействию и в данном случае природе необходимо помочь избавиться от уже приобретенного на данных уровнях неравновесного состояния, используя соответствующую активацию.

В заключение можно сделать следующие выводы относительно минеральных систем, подлежащих добыче и переработке:

1) судя по постоянному наличию и особенностям структурной, геохимической и электрохимической дефектности минеральных объектов и ее влиянию на физико-

технические и электрохимические свойства последних, выходит, что сырье на входе цикла его переработки является высокоактивированным;

2) дефектность реальных минеральных объектов заключается, в частности, в том, что на свободных поверхностях в объеме пород и минералов происходит концентрация и перераспределение микроэлементов, в результате чего образуются локальные геохимические «дворики». Данные аспекты указывают на возможный путь выхода к механизму активации и разрушения минерального сырья через оценку корреляций между его свойствами и дефектностью, и вариациями микроэлементного состава на дефектах;

3) дефектность обуславливает преобразование электрохимических полей, сопровождающееся появлением и релаксацией ионных, диффузионных и т.п. токов в перерабатываемом рудном материале под влиянием внешних воздействий. В целом, если учитывать все нюансы, связанные с дефектностью, получается, что в процессах переработки сырья, особенно при добыче и рудоподготовке, она, а не свойства материала, играет главную роль. Этот вывод исходит из первичности дефектности пород и руд в сравнении с их свойствами (дефектность, тоже свойство, но нетрадиционное);

4) выделяются пять уровней развития дефектности минерального сырья: от природных до технологически обусловленных.

Основной вывод данных исследований — природе необходимо помочь, поскольку природная минеральная система первично поражена дефектами и требует лишь щадящей соответствующей активации.

Литература

1. Воробьев А.А., Тонконогов М.П., Векслер Ю.А. Теоретические вопросы физики горных пород. М.: Недра, 1972. 152 с.
2. Гарагаш И.А. Микродеформации предварительно напряженной дискретной геофизической среды // Доклады АН. 1996. Т. 347. № 1. С. 95-98.

References

1. Vorobiev A.A., Tonkonogov M.P., Veksler Ju.A. *Teoreticheskie voprosy fiziki gornyh porod* [Theoretical questions of rock physics]. Moscow: Nedra, 1972. 152 p.
2. Garagash I.A. *Dokl. Akad. Nauk* (Reports of the Academy of Sciences). 1996. T. 347. no. 1. P. 95-98.

3. Гольдштейн Р.В., Мосолов А.Б. Мультифрактальная геометрия разрушения и масштабный эффект // Доклады АН. 1993. Т. 329. № 4. С. 429-431.
4. Гузь А.Н. Устойчивая упругость твердых тел при конечных деформациях. Киев: Наукова Думка, 1973. 213 с.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.
6. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Наука, 1976. 327 с.
7. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Киев: Наукова Думка, 1972. 206 с.
8. Изменение технологических свойств минералов как фактор эффективного обогащения руд / Б.И. Пирогов [и др.] // Проблема направленного изменения технологических и технических свойств минералов. Л.: Механобр, 1985. С. 34-43.
9. Крымский В.И. Стохастическая модель технологического процесса рудоподготовки / Интенсификация технологического процесса рудоподготовки. М.: Механобр, 1987.
10. Левин Б.В., Шейнин В.И., Блохин Д.И., Фаворов Б.В. Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные ударные нагрузки // Доклады АН СССР. 2004. Т. 395. № 6. С. 822-824.
11. Мохначев М.П. Усталость горных пород. М.: Недра, 1979. 151 с.
12. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных фаз. М.: Наука, 1978. 336 с.
13. Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горного производства. М.: Недра, 1994. 224 с.
14. Опарин В.Н. Явление зональной дезинтеграции горных пород и начала «квантовой геомеханики» // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах. Сб трудов. Новосибирск: ИГД СО РАН. 2012. С. 4-12.
15. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984. 359 с.
16. Селективное разрушение минералов // В.И. Ревнивцев [и др.]. М.: Недра, 1988. 286 с.
17. Титов А.Т. Электронно-микроскопическое изучение межзеренных границ магнетитов и сопутствующих минералов в железоносных скарнах с целью выяснения кинетики метасоматических реакций // Динамические и физико-химические модели магматогенных процессов. Новосибирск: Наука, 1983. С. 138-146.
3. Goldshtein R.V., Mosolov A.B. *Dokl. Akad. Nauk* (Reports of the Academy of Sciences). 1993. T. 329. Number 4. P. 429-431.
4. Guz A.N. *Ustojchivaya uprugost tverdyh tel pri konechnykh deformatsiyah*. [Stability of elastic solids at finite deformations]. Kiev: Naukova Dumka, 1973. 213 p.
5. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. *Poverhnostnye sily*. [Surface Forces]. Moscow: Nauka, 1985. 398 p.
6. Duhin S.S., Deryagin B.V. *Jelektroforez* [Electrophoresis]. Moscow: Nauka, 1976. 327 p.
7. Duhin S.S., Shilov V.N. *Dijelektricheskie yavleniya i dvoynoy sloj v dispersnyh sistemah i polielektrolitah* [Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes]. Kiev: Naukova Dumka, 1972. 206 p.
8. Pirogov B.I. [and others] *Problema napravlenogo izmeneniya tehnologicheskikh i tehnicheskikh svoystv mineralov*. (The problem of directed change of technological and technical minerals' properties). L.: Mekhanobr, 1985. P. 34-43.
9. Krymskij V.I. *Intensifikatsiya tehnologicheskogo protsessa rudopodgotovki*. (Intensification of technological processes of ore preparation). Moscow: Mekhanobr, 1987.
10. Levin B.V., Sheinin V. I., Blokhin D. I., Favorov B.V. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences). 2004. Vol. 395. Number 6. P. 822-824.
11. Mokhnachev M.P. *Ustalost gornyh porod* [Fatigue of rocks]. Moscow: Nedra, 1979. 151 p.
12. Nigmatulin R.I. *Osnovy mehaniki geterogennykh faz* [Fundamentals of heterogeneous phases' mechanics]. Moscow: Nauka, 1978. 336 p.
13. Novik G.Ja., Zilbershmidt M.G. *Upravlenie svoystvami porod v protsessah gornogo proizvodstva* [Control on properties of rocks in the process of mining]. Moscow: Nedra, 1994. 224 p.
14. Oparin V.N. *Sb tr. "Nelinejnye geomehaniko-geodinamicheskie protsessy pri otrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh na bolshih glubinah"* (Collection of articles "Non-linear geo-mechanical, geo-dynamic processes during elaboration of mineral deposits at large depths). Novosibirsk: IGD SO RAN. 2012. P. 4-12.
15. Rzhetskij V.V., Novik G.Ja. *Osnovy fiziki gornyh porod* [Basics of rocks physics]. Moscow: Nedra, 1984. 359 p.
16. Revnvtsev V.I. [and others]. *Selektivnoe razrushenie mineralov* [The selective destruction of minerals]. Moscow: Nedra, 1988. 286 p.
17. Titov A.T. *Dinamicheskie i fiziko-himicheskie modeli magmatogennykh protsessov* (Dynamic and physico-chemical models of magmatogenic processes). Novosibirsk: Nauka, 1983. P. 138-146.

18. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика; под ред. В.В. Федьнского. М.: Недра, 1976. 527 с.

19. Хопунов Э.А. Исследование механизма селективного разрушения руд // Интенсификация технологических процессов рудоподготовки. Л.: Механобр, 1987. С. 116-135.

20. Шевченко Ю.С. Основы релаксационного подхода к проблеме обогащения полезных ископаемых // Вестник ЧитПИ. М.: МГРИ, 1996. Вып. 3. С.193-199.

21. Шевченко Ю.С. Понятие о релаксационных явлениях (в приложении к технологиям рудообогатительного передела) // Техника и технология разработки месторождений полезных ископаемых. Новокузнецк: СГГМА, 1996. С. 213-224.

18. *Fizicheskie svoystva gornyh porod i poleznyh iskopaemyh (petrofizika)*. [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics)]. *Spravochnik geofizika*; ed. V.V. Fedynskiy. Moscow: Nedra, 1976. 527 P.

19. Хопунов Э.А. *Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov rudopodgotovki* (Intensification of technological processes of ore preparation). L: Mekhanobr, 1987. P. 116-135.

20. Shevchenko Yu.S. *Vestn. ChitPI*. (Vestnik of Chita Politechnical Institute). Moscow: MGRI, 1996. Issue 3. P. 193-199.

21. Shevchenko Yu.S. *Tehnika i tehnologiya razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* (Technique and technology of mineral deposits' elaboration). Novokuznetsk SGGMA, 1996. P. 213-224.

Коротко об авторе

Briefly about the author

Шевченко Ю.С., канд. техн. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
leshii.ru@list.ru

Yu. Shevchenko, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia

Научные интересы: геология, горнорудные технологии, экономика

Science interests: geology, mining technology, economy

