



В.М. Юров , К.Н. Жангозин* 
ТОО «ТСК-Восток», Астана, Қазақстан
*e-mail: tskvstk@gmail.com

КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ И НАНОПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В КВАРЦЕ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Предложена квантовая модель формирования нанокластеров и наноплёнок металлов платиновой группы (МПГ) в кварцевых месторождениях. Модель опирается на представление о квантовом поверхностном нанослое металла с характерной толщиной $R_n \approx 0,7-0,8$ нм (по Юрову). В этом нанослое дискретизация электронных состояний, солитон-опосредованный перенос и эффекты поверхностного предплавления могут стабилизировать ультратонкие плёнки. Модель применена к месторождению Такыр-Кальджир (Восточный Казахстан), где МПГ наблюдаются в виде плёнок и кластеров нанометрового масштаба (порядка единиц нанометров) при содержаниях до 66,5 ppm. Геохимические данные указывают на полигенетическое происхождение: гидротермальный перенос $Pd \pm Pt$ в виде хлоридных комплексов и механическая денудация $Ir-Os$. Ключевое предсказание модели — перколяционная проводимость через сеть нанокластеров — согласуется с результатами электрогидравлического дробления: обычный кварц разрушается по границам зерен, микротрещинам, тогда как образцы Такыр-Кальджира распадаются на рваные ячеистые структуры, что указывает на вклад туннельного/прыжкового переноса.

Ключевые слова: квантовый поверхностный слой, наноплёнки МПГ, солитонный транспорт, перколяционная проводимость, электрогидравлическое дробление, транзитно-аккумулятивное месторождение, геохимия РЗЭ.

В.М. Юров, К.Н. Жангозин*
«ТСК-Восток» ЖШС, Астана, Қазақстан
*e-mail: tskvstk@gmail.com

Кварцтағы платина тобы металдарының нанокластерлері мен наноқабықшаларының түзілуінің кванттық моделі: перколяциялық өткізгіштікті эксперименттік растау

Кварц кен орындарындағы платина тобы металдарының (ПТМ) нанокластерлері мен наноқабықшаларының түзілуінің кванттық моделі ұсынылған. Модель $R_n \approx 0,7-0,8$ нм (Юров бойынша) сипаттамалық қалыңдығы бар кванттық беттік наноқабат тұжырымдамасына негізделген. Бұл наноқабатта электрондық күйлердің дискретизациясы, солитондық тасымалдау және беттік алдын ала балқу әсерлері үздіксіз ультражіңішке қабықшаларды тұрақтандыра алады. Модель ПТМ 66,5 ppm дейінгі мөлшерде нанометрлік масштабтағы наноқабықшалар мен нанокластерлер түрінде кездесетін Тақыр-Қалжыр кен орнына (Шығыс Қазақстан) қолданылған. Геохимиялық деректер полигенетикалық шығу тегін көрсетеді: $Pd \pm Pt$ хлоридті кешендер түрінде гидротермалық тасымалдануы және $Ir-Os$ механикалық денудациясы. Модельдің негізгі болжамы — нанокластерлер желісі арқылы перколяциялық өткізгіштік — электрогидравликалық ұсақтау нәтижелерімен сәйкес келеді: қарапайым кварц типтік морт траекториялар бойынша бұзылады, ал Тақыр-Қалжыр үлгілері жыртқық ұяшықты құрылымдарға ыдырайды, бұл туннельдік/секіргелі тасымалдау үлесін көрсетеді.

Түйін сөздер: кванттық беттік қабат, ПТМ наноқабықшалары, солитондық тасымалдау, перколяциялық өткізгіштік, электрогидравликалық ұсақтау, транзиттік-аккумулятивтік кен орны, СЖЭ геохимиясы.

V.M. Yurov, K.N. Zhangozin*
 TSK-Vostok LLP, Astana, Kazakhstan
 *e-mail: tskvstk@gmail.com

Quantum model of PGM nanocluster and nanofilm formation in quartz: experimental verification of percolation conductivity

A quantum model is proposed for the formation of platinum-group metal (PGM) nanoclusters and nanofilms in quartz deposits. The model is based on the concept of a quantum surface nanolayer with characteristic thickness $R_n \approx 0.7\text{--}0.8$ nm (Yurov). Within this nanolayer, discretization of electronic states, soliton-mediated transport, and surface premelting effects can stabilize continuous ultrathin films. The model is applied to the Taqyr-Qalzhyr deposit (Eastern Kazakhstan), where PGMs occur as nanometer-scale nanofilms and nanoclusters (on the order of single nanometers) with contents up to 66.5 ppm. Geochemical data indicate polygenetic origin: hydrothermal transport of Pd±Pt as chloride complexes and mechanical denudation of Ir–Os. The key prediction of the model—percolation conductivity through a nanocluster network—is consistent with electrohydraulic crushing results: ordinary quartz fractures along typical brittle trajectories, while Takyr-Kalzhyr samples disintegrate into ragged cellular structures, indicating contributions from tunneling/hopping transport.

Keywords: quantum surface layer, PGM nanofilms, soliton transport, percolation conductivity, electrohydraulic crushing, transit-accumulative deposit, REE geochemistry.

Введение

В работе [1] мы предложили новый «транзитно-аккумулятивный» тип минерализации МПГ для месторождения Такыр-Кальджир. Настоящая статья развивает эту концепцию для ответа на вопрос: какой механизм управляет формированием аномально тонких (порядка единиц нанометров) плёнок МПГ на поверхности кварца?

Большинство промышленных месторождений МПГ связано с магматическими системами. Комплекс Бушвельд (ЮАР) и Великая Дайка (Зимбабве) содержат МПГ в расслоённых мафит-ультрамафитовых интрузиях как включения в хромите или сульфидах [2, 3]. Месторождения Норильска содержат МПГ в Cu-Ni сульфидах [4]. Эти системы характеризуются: (1) магматической кристаллизацией *in situ*, (2) сульфидными /хромитовыми минералами-хозяевами, (3) содержаниями 3–5 ppm, (4) петрогенетическими моделями на основе силикатно-сульфидной несмесимости.

Классические модели не объясняют наблюдения на Такыр-Кальджире (Восточный Казахстан, эоцен): МПГ встречаются в виде ультратонких плёнок нанометрового масштаба в кварце (данные СЭМ); валовое содержание достигает 66,5 ppm — на порядок выше Бушвельда; Pd-обогащённые наноплёнки коррелируют с окисленными фациями, тогда как Ir-Os — обломочные зёрна в восстановленных фациях; P3Э-сигнатура ($\Sigma\text{REE} \approx 274$ ppm, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$, $\text{Y}/\text{Ho} = 22,9$) характерна для F/Cl-содержащих гидротермальных флюидов.

Мы предполагаем многостадийный флюидно-сорбционный процесс: (1) транспорт Pd/Pt как хлоридных комплексов [5]; (2) аккумуляция в кварцево-галечных коллекторах; (3) восстановление и осаждение металлических Pd/Pt; (4) рост наноплёнок при квантовом ограничении. Физико-химическая модель основана на квантовой структуре поверхностного слоя металла [6, 7].

Теоретическая основа

Фундаментальная длина масштаба R_n

Модель основана на концепции квантового поверхностного слоя в металлах Юрова. В [6, 7] показано, что атомарно-гладкая металлическая

поверхность обладает квантово-механической структурой до характерной глубины R_n :

$$R_n = \beta \cdot 0,17 \times 10^{-9} \cdot \sqrt[3]{v(i)} \text{ [м]}, \quad (1)$$

где $v(i)$ — молярный объём, $\beta = 1-3$ учитывает кристаллическую структуру. Для ГЦК-металлов: Pd ($v = 8,85 \text{ см}^3/\text{моль}$) $\rightarrow R_n \approx 0,7 \text{ нм}$; Pt (9,10) $\rightarrow 0,7 \text{ нм}$; Ir (8,52) $\rightarrow 0,7 \text{ нм}$; Au (10,21) $\rightarrow 0,8 \text{ нм}$. Для гексагональных плотно упакованных металлов, таких как осмий, модель поверхностного слоя Юрова следует рассматривать как оценку характеристической шкалы длины реконструкции квантовой поверхности, а не строго изотропную толщину поверхностного слоя. Хотя абсолютное значение остается сопоставимым с значением благородных металлов ГЦК, эффективная глубина может зависеть от кристаллографической ориентации. Соответственно, для Os получается: Os: $v = 8,42 \text{ см}^3/\text{моль}$ $\rightarrow R_n \approx 0,7 \text{ нм}$ — это как и для остальных соответствует 3–4 атомным монослоям.

Нанометровый масштаб наблюдаемой морфологии относится как к толщине плёнок, так и к размеру нанокластеров. В рамках квантовой модели это отражает единый энергетический ландшафт, задаваемый фундаментальной длиной R_n : при сильном квантовом ограничении зародышеобразование кластеров может быть термодинамически предпочтительнее мгновенного формирования сплошной плёнки. Наблюдаемый нанофазный полиморфизм — прямое следствие квантового механизма в неравновесных геологических условиях.

Дискретные энергетические уровни и их роль в устойчивости нанофаз

В пределах поверхностного нанослоя толщины R_n электронное движение в направлении, перпендикулярном поверхности, оказывается квантово-ограниченным. Это приводит к появлению дискретных квази-двумерных состояний (квантование по толщине), что принципиально меняет плотность электронных состояний у уровня Ферми и, как следствие, поверхностную энергию и химический потенциал атомов в нанослое. Именно этим объясняется, почему на масштабе R_n возникают «особые» условия, при которых система предпочитает 2D-морфологию (ультратонкие плёнки) или, альтернативно, устойчивые 0D-зародыши (нанокластеры): меняется баланс «энергия поверхности \leftrightarrow энергия границы \leftrightarrow энергия упругих и дефектных искажений».

Квантование по толщине можно представить в виде модели «частицы в потенциальной яме»:

$$E_n = \left(\frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e} \right) \left(\frac{n}{d} \right)^2, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер состояния, d —

эффективная толщина квантово-ограниченного слоя (порядка R_n), m_e — эффективная масса. Экспериментальные подтверждения наличия квантованных поверхностных подзон в ультратонких металлических слоях получены методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением [8]. Для нашей модели важно не само значение E_n , а факт дискретизации, потому что она является физическим механизмом, связывающим нанометровую толщину R_n с изменением химического потенциала и, следовательно, с термодинамикой роста нанофаз.

Градиент химического потенциала как движущая сила латерального переноса

Квантово-ограниченный поверхностный слой характеризуется химическим потенциалом, отличающимся от объёмного. Для ГЦК-металлов это дополнительно усиливается реконструкцией поверхности (например, изменения межслоевого расстояния на Pd(111), Pt(111) [9]), что приводит к появлению градиента химического потенциала $\mu(z)$ вблизи поверхности. Схематически это можно записать как:

$$\mu(z) = \mu_{bulk} + \Delta\mu \cdot e^{-\frac{z}{\lambda}}, \quad (3)$$

где z — глубина, μ_{bulk} — химический потенциал в объёмной фазе, $\Delta\mu$ — избыточный поверхностный вклад, $\lambda \sim R_n/2$. Тогда $d\mu/dz$ задаёт «встроенную» термодинамическую тягу к перераспределению вещества в поверхностном слое. Здесь зависимость $\mu(z)$ следует понимать как индикатор того, что при $z \lesssim R_n$ формируется поверхностная зона с повышенным/пониженным химическим потенциалом по сравнению с объёмом. Это не означает «движущую силу вдоль поверхности» от $d\mu/dz$; латеральный перенос определяется градиентами химического потенциала вдоль поверхности, который возникает из-за неоднородного покрытия адатомами (адсорбированными атомами), дефектов, ступеней, микротрещин и локальных различий адсорбции/восстановления. Роль поверхностной реконструкции и квантово-ограниченного слоя состоит в том, что они модифицируют энергетический ландшафт у поверхности (в частности, понижают барьеры миграции и изменяют энергию связи), тем самым повышая скорость латеральной диффузии в пределах нанослоя.

В практическом смысле это означает: атом, попавший на поверхность (после восстановления комплекса Pd/Pt), имеет пониженный эффективный барьер для миграции в пределах

нанослоя и может быстро перераспределяться по поверхности кварца, формируя либо непрерывные плёночные участки, либо насыщающие центры нуклеации (кластеры). Таким образом, градиент μ — это связующее звено между квантовой природой нанослоя (R_n) и возможностью образования 2D-связных структур при умеренных температурах диагенеза.

Ускорение массопереноса: солитон-опосредованный транспорт и поверхностное предплавление

Ключевой вопрос для геологической среды: как обеспечить достаточно быстрый массоперенос металла по поверхности при 100–200 °С, чтобы успели сформироваться связные наночастицы. В квантовом нанослое R_n перенос может идти не только классической термоактивированной диффузией, но и через нелинейные коллективные возбуждения решётки, которые действуют как «носители» локализованной деформации и энергии. Юров и др. [7], а также ряд авторов [10, 11] обсуждают солитонные механизмы (краудины, дискретные бризеры), которые способны переносить локальную перестройку атомной конфигурации на расстояния, существенно превышающие межатомное, без необходимости «перепрыгивать» высокий диффузионный барьер на каждом шаге.

Физический смысл для нашей модели таков: солитонные возбуждения эффективно понижают активационный барьер переноса в нанослое (ориентировочно с ~ 1 эВ до $\sim 0,1$ – $0,3$ эВ), что радикально увеличивает скорость массопереноса при умеренных температурах. Даже грубая оценка по Аррениусу показывает, что снижение барьера на $\sim 0,7$ – $0,9$ эВ при $T \sim 373$ – 473 К приводит к росту скорости на много порядков, делая возможным «быстрый» латеральный перенос в геологическом времени и формирование связных плёночных перемишек/коалесценцию кластеров.

Дополнительный вклад даёт поверхностное предплавление [12]: появление квазижидкого слоя на поверхности при $T \geq 0,2T_m$ резко

повышает подвижность адатомов и ускоряет коалесценцию. Для Pd это соответствует диапазону температур, сопоставимому с диагенетическим окном 100–200 °С, что согласуется с условиями формирования наночастиц в рассматриваемом объекте. В совокупности солитон-опосредованный перенос и предплавление обеспечивают механизм ускоренной «самосборки» наночастиц (наноплёнки \leftrightarrow нанокластеры), необходимый для появления перколяционной связности металлической подсистемы. Следовательно, при наличии устойчивого притока Pd/Pt из флюида поверхность кварца способна быстро перераспределять металл в нанослое, что приводит к сосуществованию F1 (кластеры) и F2 (плёночные перемишки) и создаёт предпосылки для перколяционной проводимости.

Объект исследования

Месторождение Такыр-Кальджир расположено в Восточно-Казахстанском складчатом поясе. Геология включает палеозойский фундамент с габбро-диоритовыми и ультрамафитовыми телами, перекрытый мезозойско-кайнозойским чехлом. Такыр-Кальджирская разломная зона СЗ простирается сопоставляет девонские метаморфиты с эоценовыми осадками, создавая проницаемые каналы для гидротермальных флюидов.

Ключевые геологические единицы: *Ультрамафит-габбровые интрузии* — поставляют МПП путём гидротермального выщелачивания; Pd/Pt образуют хлоридные комплексы $[PdCl_4]^{2-}$, $[PtCl_6]^{2-}$ в окислительных условиях [13]. *Гранитоиды* — генерируют F/Cl-богатые флюиды. *Эоценовые осадки* — кварцево-галечные конгломераты служат проницаемыми ловушками.

Исследуемый материал — образцы кварцево-галечных конгломератов эоценового возраста из зоны окисления месторождения. Выделяются две основные фации: жёлтая (окисленная, обогащённая Fe-оксидами и Pd) и серая (восстановленная, обогащённая обломочными Ir-Os).

Материалы и методы исследования

Пробоподготовка

Образцы отбирались из керна скважин и канав на месторождении Такыр-Кальджир. Для геохимического анализа использовались композитные пробы (15 полевых дубликатов, гомогенизированных для представительности). Для гравитационного обогащения применялся

концентратор Кнелсона с получением концентрата и хвостов.

Аналитические методы

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS): определение концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ) и

рассеянных элементов. Нормализация к С1-хондриту по Sun & McDonough (1989) [14].

Атомно-эмиссионная спектрометрия (ICP-AES): определение концентраций элементов платиновой группы (Pt, Pd, Ir, Os) после пробирной плавки с Ni-S коллектированием.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): морфологический анализ частиц после электрогидравлического дробления. Прибор: JSM-6390LV (JEOL) с энергодисперсионным анализатором.

Электрогидравлическое дробление (ЭИД)

Эксперименты проводились на установке импульсного разряда в водной среде. Параметры: напряжение 20–30 кВ, энергия импульса до 189 Дж. Образцы помещались в рабочую камеру с дистиллированной водой между электродами. После разряда продукты дробления извлекались и высушивались для СЭМ-анализа.

Для сравнения использовался результат измельчения ЭИД диэлектрического кварца из литературных источников [15]. Следует отметить, что параметры импульсного генератора в [15] (в частности, уровень напряжения) отличаются от использованных в настоящей работе. Однако в методе электрогидравлического дробления определяющими для механизма разрушения являются формирование плазменного канала и вводимая в разряд энергия/плотность энергии, а не само напряжение как таковое. В настоящей работе ключевой результат основан на сравнении «обычного» кварца и образцов Такыр-Кальджира, обработанных одним и тем же методом; публикация [15] используется лишь как ориентир типичной морфологии разрушения диэлектрического кварца при ЭИД.

Предлагаемая физико-химическая модель формирования нанофаз МПГ (нанокластеры и наноплёнки)

Стадия 1 — Флюидный транспорт и условия осаждения. Разломно-блоковое строение региона обеспечивает проницаемость и фокусировку глубинных флюидов, способных переносить Pd и Pt в виде устойчивых хлоридных комплексов. При подъёме и разгрузке флюида температура и солёность снижаются (условно от ~300 °С к ~100–150 °С), а кислотность смещается к слабокислым–нейтральным значениям, что меняет устойчивость комплексных форм и повышает вероятность их взаимодействия с минеральными поверхностями. Геохимическое моделирование по литературным данным [5] показывает высокую стабильность комплексов типа $[PdCl_4]^{2-}$ и $[PtCl_6]^{2-}$ (порядок $\log K_f \sim 18-20$,

где K_f — константа образования (устойчивости) хлоридного комплекса в водном растворе), что делает транспорт Pd/Pt реалистичным, но одновременно подразумевает резкое изменение поведения системы при разбавлении, нейтрализации и охлаждении флюида.

Стадия 2 — Адсорбционно-химическое закрепление на кварце. Поверхность кварца в зоне микротрещин и дефектов обогащена силанольными группами ($\equiv Si-OH$) и при pH выше ~2 приобретает отрицательный заряд, что облегчает взаимодействие с комплексами благородных металлов. Микротрещиноватость дополнительно увеличивает эффективную площадь контакта и создаёт локальные «ловушки» для адсорбированных комплексов. Фиксацию можно описать схематически как поверхностное комплексобразование/частичную замену лигандов с образованием связей $\equiv Si-O-M$ ($M = Pd, Pt$) и выделением HCl; максимум адсорбции ожидается в слабокислом диапазоне, где одновременно высока реакционная способность поверхности и не происходит полного подавления комплексных форм. На этой стадии кварц играет роль не только сорбента, но и подложки, задающей межфазную энергию и условия для последующей нуклеации.

Стадия 3 — Нуклеация и формирование металлических зародышей. При изменении Eh/pH, взаимодействии с восстановителями (Fe^{2+} -содержащие фазы, органическое вещество, поверхностные дефектные центры) или при локальной дегградации комплексов происходит восстановление и образование первичных металлических зародышей. На поверхности кварца появляется поток «адатомов» (адсорбированных атомов) МПГ, которые способны мигрировать по поверхности и конденсироваться в наноструктуры.

Стадия 4 — Два режима роста: 0D-нанокластеры и 2D-наноплёнки. Дальнейшая эволюция определяется конкуренцией двух кинетико-энергетических сценариев. При низком эффективном потоке металла и/или при сильной локализации на дефектах преобладает кластеризация: формируются 0D-нанокластеры, «закреплённые» на активных центрах кварца. При более высоком потоке металла и достаточной поверхностной подвижности адатомов возможен переход к 2D-росту с образованием ультратонких наноплёнок/перемычек. В рамках квантовой модели ключевым является наличие фундаментальной длины масштаба R_n порядка единицы нанометра (по Юрову), которая задаёт

квантовый поверхностный нанослой металла и меняет баланс энергии границы металл–SiO₂ и энергии поверхности. Это создаёт «окно» устойчивости ультратонких структур: на масштабе R_n становятся возможными как непрерывные 2D-фазы (наноплёнки), так и устойчивые нано-зародыши (кластеры) при сохранении дискретизации электронных состояний и специфической поверхностной динамики. Под «окном устойчивости» понимается диапазон толщин/размеров порядка R_n , в котором суммарная энергия ультратонкой структуры (вклад поверхности, границы металл–SiO₂ и квантово-размерный вклад) имеет локальный минимум. Поэтому вблизи $R_n \sim 1$ нм энергетически предпочтительными могут быть как непрерывные 2D-перемычки/наноплёнки, так и устойчивые 0D-зародыши (кластеры), тогда как при $d \gg R_n$ система переходит к «классическому» укрупнению (утолщение плёнки и/или агломерация), а при $d \ll R_n$ доминируют разорванные островковые состояния. Это отражает усиление роли поверхностной термодинамики и квантово-размерных эффектов при $d \sim R_n$.

Результаты и обсуждение

Геохимия РЗЭ

Результаты анализа содержания РЗЭ композитной фракции дают $\Sigma\text{REE}+\text{Y} = 325,7$ ppm ($\sim 54 \times \text{UCC}$). Хондрит-нормализованные спектры [14] показывают: $\text{LREE}/\text{HREE} = 5,30$; $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$; умеренные отрицательные аномалии Ce

Стадия 5 — Сосуществование фаз и перколяционная связность (F1+F2).

Геологическая среда неизбежно неоднородна по флюидному потоку, дефектности кварца и локальным условиям восстановления. Поэтому наиболее естественным результатом является сосуществование кластерной подсистемы (F1) и плёночных перемычек/связок (F2). В таком смешанном ансамбле перенос заряда может осуществляться прыжковым/туннельным образом между близко расположенными наночестрами и/или по ультратонким связкам, что приводит к перколяционной проводимости. Наблюдаемая при электрогидравлическом дроблении отличительная морфология разрушения (ячейность, «рваная» структура, множественные пути инициирования трещин) согласуется с наличием распределённой сети наночестров, влияющих на локальные поля и пути разрядов/трещинообразования, а температурно- и полезависимая необратимость магнитного отклика соответствует релаксационной динамике ансамбля нанофаз, а не простому суммированию вкладов обычных магнитных минералов.

(Ce/Ce* = 0,72) и Eu (Eu/Eu* = 0,81); субхондритовое Y/Ho = 22,9, указывающее на F/Cl-содержащие гидротермальные флюиды [16, 17]. Комбинация указывает на транспорт РЗЭ окисленными галогенобогачёнными флюидами.

Таблица 1 – Концентрации РЗЭ для композитного образца

Элемент	Конц., ppm	C_N	Элемент	Конц., ppm
La	51,58	217,6	Tb	1,96
Ce	84,57	138,1	Dy	11,10
Pr	15,69	170,2	Ho	2,26
Nd	61,89	135,3	Er	6,60
Sm	13,73	92,7	Yb	6,17
Eu	3,56	63,1	Lu	0,93
Gd	12,92	64,8	Y	51,76

Примечание: $\Sigma\text{REE}+\text{Y} = 325,7$; $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$; $\text{Y}/\text{Ho} = 22,9$; $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,72$; $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,81$

Систематика ЭПГ (элементы платиновой группы)

Данные по содержаниям ЭПГ исходных образцов выявляют полигенетические закономерности. Отношение Pd/Ir систематически различается между фациями: жёлтая фация характеризуется повышенным Pd/Ir = 2,6–3,2, тогда как серая фация демонстрирует

бимодальное распределение — либо высокие (Pd/Ir > 1), либо аномально низкие значения (Pd/Ir = 0,09–0,22). Это указывает на два генетических типа минерализации.

Геохимия рассеянных элементов

Механизм гидротермального транспорта дополнительно подтверждается составом

рассеянных элементов рудного материала. Коэффициенты концентрации (КК), рассчитанные как отношение содержания элемента в руде к среднему содержанию в земной коре, выявляют диагностическую геохимическую сигнатуру (табл. 3).

Наиболее яркая черта — экстремальное обогащение типичными флюидомобильными элементами: As (КК = 16,2) и Sb (КК = 11,0). Эти халькофильные элементы высокорастворимы в гидротермальных флюидах в виде тио- и хлорокомплексов и служат надёжными индикаторами флюидно-опосредованной минерализации. Напротив, сидерофильные элементы, типично обогащённые в магматических сульфидных системах, показывают субхондритовые значения: Ni (КК = 0,15) и Cu (КК = 0,04). Это выраженное Cu-Ni-обеднение эффективно исключает прямую генетическую связь с сульфидонасыщенными мафит-ультрамафитовыми расплавами, как в классических месторождениях норильского или бушвельдского типа.

Таблица 3 – Концентрации рассеянных элементов и коэффициенты концентрации (КК)

Элемент	Конц., ppm	Кларк, ppm	КК
Co	39,9	23	1,73
Ni	8,6	56	0,15
Cu	2,2	53	0,04
As	29,2	1,8	16,2
Mo	1,4	1,2	1,17
Sb	3,3	0,3	11,0

Примечание: Жирным выделены аномальные обогащения (КК > 10).

Экспериментальное подтверждение перколяционной проводимости

Для верификации объёмной проводящей фазы применён метод ЭИД при 10–30 кВ. Результаты выявили фундаментальное различие механики разрушения (рис. 1).

В обычном диэлектрическом кварце разряд локализуется по границам зёрен и макротрещинам, вызывая хрупкое расщепление с угловатыми обломками и раковистыми поверхностями; гранулометрия продуктов дробления относительно однородна [15].

В кварце Такыр-Кальджира морфология принципиально иная: «рваная» ячеистая структура с признаками объёмного коллапса и резко неоднородное распределение по размерам — мелкодисперсная фракция сосуществует со средними и крупными фрагментами (рис. 1с-d). Это указывает на распределение энергии разряда

через 3D-сеть проводящих включений (нанокластеров МПГ), вызывающих резистивный перегрев и множественные центры инициирования пробоя по топологии скрытой проводящей сети.

Структурные особенности (неправильная геометрия, отсутствие плоских граней, перешейки) несовместимы с чисто хрупким диэлектрическим разрушением. Аномалия однозначно указывает на перколяционную проводимость и подтверждает квантово-механическую связь нанокластеров (туннельная /прыжковая проводимость). Дополнительным аргументом в пользу физической реализуемости квантово-когерентного поведения металлических нанокластеров служит недавний эксперимент по материво-волновой интерферометрии [18], где показано, что наночастица металла может находиться в суперпозиции двух пространственно разделённых траекторий с расстоянием до 133 нм, существенно превышающим её собственный размер [18]. Это не является прямым доказательством переноса заряда в твёрдой матрице, но поддерживает допущение о том, что характерные масштабы квантовой делокализации /связи в нанометаллических объектах могут на порядки превышать их геометрические размеры, что согласуется с нашей интерпретацией перколяционного (туннельного/хоппингового) транспорта.

Значение квантовой модели. Настоящая работа представляет одно из первых применений концепции квантового поверхностного нанослоя металла R_n [6,7] к интерпретации рудной минерализации в кварцевых месторождениях. Предложенная модель важна тем, что переводит наблюдаемые наноморфологии МПГ из разряда «аномалий» в область количественно объяснимых следствий специфической физики ультратонкого металлического слоя и взаимодействия металл–SiO₂.

(1) **Ограничение толщины и морфологический “выбор” (2D vs 0D).** Наблюдаемая нанометровая толщина плёнок/перемычек согласуется с фундаментальной длиной R_n : вблизи $d \sim R_n$ суммарная энергия системы (поверхность + граница металл–SiO₂ + квантово-размерный вклад) может иметь локальный минимум, формируя «окно устойчивости» ультратонких структур. При $d \gg R_n$ квантовый вклад исчезает и рост переходит в классический режим (утолщение слоя и/или агломерация), что естественно объясняет сосуществование 2D-плёнок и 0D-кластеров в неоднородной геологической среде.

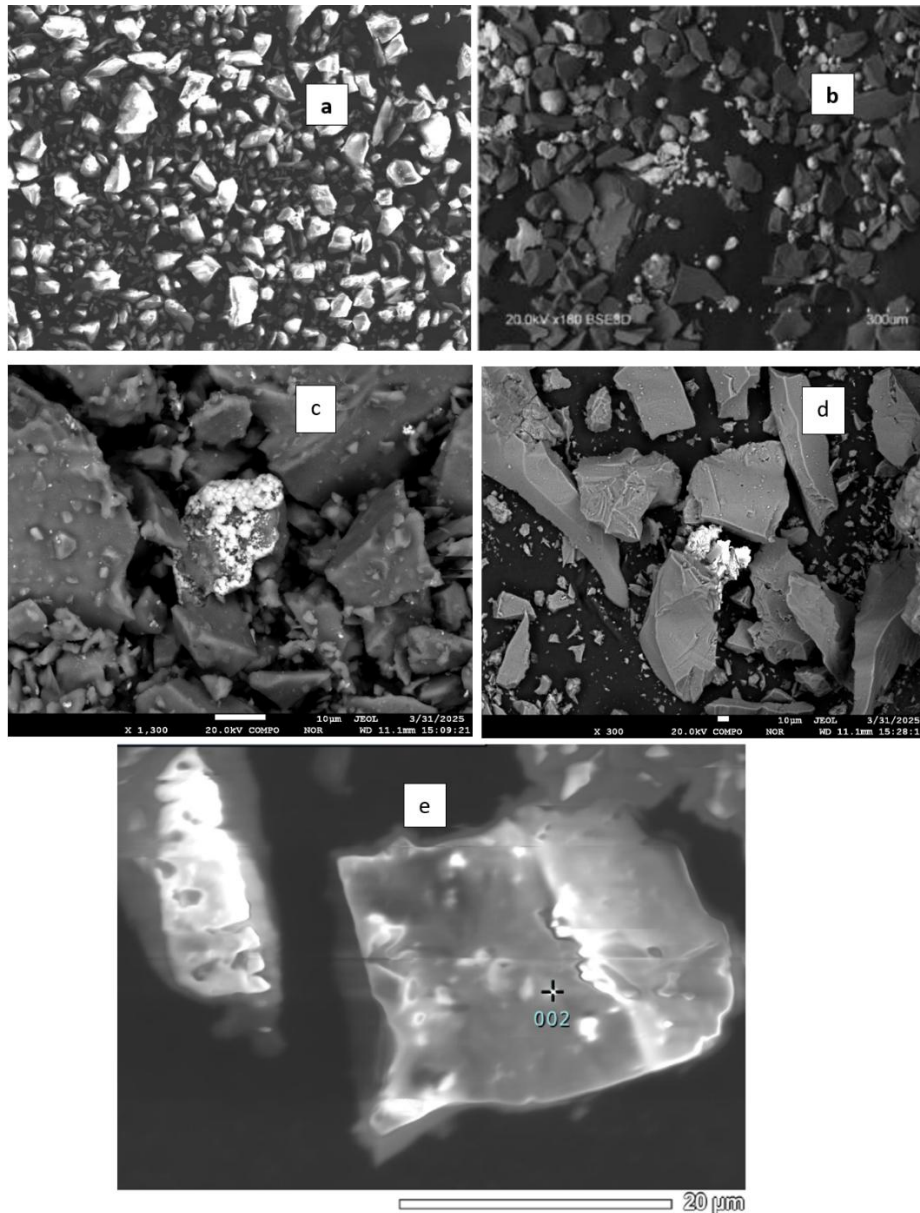


Рисунок 1 – СЭМ-изображения частиц кварца после ЭИД. (б) Обычный диэлектрический кварц: угловатые блоки с раковистыми поверхностями излома и узким распределением по размерам [15]. (а, с–е) МПГ-содержащий кварц Такыр-Кальджира: рваная ячеистая морфология и широкий разброс гранулометрического состава (от мелких осколков до крупных фрагментов), указывающие на множественные центры инициирования разряда через перколяционную сеть нанокластеров.

(2) **Температурный порог и кинетика формирования в диагенетическом окне.** Модель предлагает физический механизм ускоренного массопереноса в поверхностном слое: солитон-опосредованный транспорт и поверхностное предплавление становятся значимыми при $T \gtrsim 0,2 T_m$ (для Pd порядка 350 К), что соответствует реальным условиям диагенеза $\sim 100\text{--}200$ °С. Это снимает ключевую кинетическую проблему — как сформировать связные наноплёнки/перемычки без высокотемпературных магматических режимов.

(3) **Контроль подложки и роль кварца как “идеальной” матрицы.** Наноплёнки требуют низкой межфазной энергии и наличия поверхностных дефектов/микротрещин, обеспечивающих центры нуклеации и высокую эффективную площадь. Кварц удовлетворяет этим условиям; оценка $\gamma_{Pd-SiO_2} \approx 0,5 \text{ Дж/м}^2$ указывает на благоприятную межфазную энергетику, а развитая трещиноватость и силанольные группы обеспечивают химическое закрепление предшественников и дальнейшую миграцию адатомов. Точное значение межфазной

энергии $\gamma_{\text{Pd-SiO}_2}$ зависит от состояния поверхности и химии интерфейса и требует отдельной оценки. В качестве порядка величины используем $\gamma \sim 0.1\text{--}0.5$ Дж/м², что согласуется с типичными диапазонами межфазных энергий/адгезии для металлических и металл-оксидных интерфейсов ($\gamma \sim 0.05\text{--}0.5$ Дж/м²) [19] и с тем, что для металл-оксидных границ адгезия часто имеет масштаб Дж/м² [19]; кроме того, расчеты показывают, что SiO₂ может обеспечивать существенно более сильную адгезию металла по сравнению с более ионными оксидами

(4) Проверяемые предсказания модели. Модель предсказывает (i) наличие двух режимов роста (кластеризация при низком потоке металла и плёночные перемишки при повышенном потоке/подвижности), (ii) сильную чувствительность морфологии к дефектности кварца и параметрам поверхностной химии, (iii) возможность перколяционной связности металлической подсистемы за счёт сочетания 0D- и 2D-компонент. Эти выводы принципиально

проверяемы методами СЭМ/ТЕМ, поверхностной спектроскопии и физическими тестами (электрогидравлическое дробление, магнитные измерения), что делает модель не описательной, а предсказательной.

Недавние *in situ* наблюдения в жидкостной ячейке ПЭМ [20] показали, что на границе «минерал-вода» могут формироваться локальные межфазные микросреды (так называемые плотные жидкие межфазные слои), в которых происходит зарождение и рост наночастиц золота даже из крайне разбавленных (ppb-уровня) водных растворов Au. Хотя в указанной работе рассматривалась система «пирит-вода», общий вывод важен шире: нуклеация наночастиц может эффективно запускаться за счёт межфазной локализации вещества и интерфейсно-индуцированных химических/редокс-градиентов. Этот принцип можно рассматривать как возможную аналогию для интерпретации образования и перестройки наночастиц благородных металлов в силикатной (кварцевой) матрице — без привлечения сульфид-специфичных механизмов.

Заключение

1. Разработана квантовая модель формирования ультратонких наноплёнок МПП (нанометрового уровня) на основе фундаментальной длины $R_n \approx 0,7\text{--}0,8$ нм, определяющей квантовый поверхностный слой с дискретными электронными состояниями.

2. Идентифицированы механизмы низкотемпературного массопереноса: солитон-опосредованная диффузия со сниженной энергией активации ($\sim 0,1\text{--}0,3$ эВ) и поверхностное предплавление, обеспечивающие коалесценцию при 100–200°C.

3. Геохимические данные Такыр-Кальджира ($\Sigma\text{REE}+\text{Y} = 326$ ppm, Y/Ho = 22,9, КК As = 16,2, КК Sb = 11,0, обеднение Cu-Ni) подтверждают гидротермальный транспорт Pd/Pt окисленными F/Cl-содержащими флюидами.

4. Эксперименты ЭИД дают прямое доказательство перколяционной проводимости через сеть нанокластеров МПП: аномальная «рваная» морфология указывает на туннельный/прыжковый транспорт.

5. Месторождение Такыр-Кальджир установлено как новый «транзитно-аккумулятивный» тип минерализации МПП, требующий наномасштабных диагностических подходов.

6. Первое применение квантовой модели поверхностного слоя металлов к геологии и экспериментальное обнаружение перколяционной проводимости.

7. Модель задаёт новый вектор поиска месторождений; метод ЭИД предлагается как экспресс-тест; результаты важны для технологий извлечения нанодисперсных МПП.

Благодарности

Работа посвящена памяти профессора В.М. Юрова, скончавшегося в сентябре 2025 г. Его пионерские идеи в квантовой физике поверхностей составляют теоретический фундамент исследования.

Литература

1. К. Жангозин, Proposed new geo-industrial subtype "Taqr-Qalzhyr Quartz-Hosted Fluid-PGE-REE", *Zenodo*, October 20, (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17401399> (in Russ).
2. R.G. Sawthorn, The platinum group element deposits of the Bushveld Complex, *Platinum Metals Rev.* **54**(4), 205–215 (2010). <https://doi.org/10.1595/147106710X520222>

3. T. Oberthür, The fate of platinum-group minerals in the exogenic environment, *Minerals* **8**(12), 581 (2018). <https://doi.org/10.3390/min8120581>
4. S.F. Sluzhenikin and A.V. Mokhov, Gold and silver in PGE–Cu–Ni ores of Noril'sk, *Miner. Deposita* **50**(4), 465–492 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
5. S.A. Wood, B.W. Mountain, and P. Pan, The aqueous geochemistry of Pt, Pd and Au, *Can. Mineral.* **30**(4), 955–982 (1992).
6. V.M. Yurov et al., Quantum structure of the surface layer of metals, *Recent Contrib. Phys.* **90**(3), 93–107 (2024). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2024v90i3-012>
7. V.M. Yurov et al., Quantum properties of atomic-smooth metal surfaces, *Int. J. Appl. Fund. Res.* **12**, 52–57 (2024). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13682>
8. J.J. Paggel, T. Miller, and T.C. Chiang, Quantum-well states in thin-film interferometer, *Science* **283**, 1709–1711 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.283.5408.1709>
9. P.J. Feibelman, Relaxation of hcp (0001) surfaces, *Phys. Rev. B* **53**, 13740-13746 (1996). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.13740>
10. S.V. Dmitriev et al., Phonon states of strained graphene, *Comput. Mater. Sci.* **53**, 194–203 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.11.032>
11. F.M. Russell and J.C. Eilbeck, Moving breathers in layered crystal at 300 K, *EPL* **78**, 10004 (2007). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/78/10004>
12. B. Pluis, D. Frenkel, and J.F. Van der Veen, Surface-induced melting: Landau model, *Surf. Sci.* **239**, 282–300 (1990). [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(90\)90664-R](https://doi.org/10.1016/0039-6028(90)90664-R)
13. Y. Xiong and S.A. Wood, Hydrothermal solubility of ReO₂, *Chem. Geol.* **169**, 17–33 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00226-3)
14. S.S. Sun and W.F. McDonough, Chemical systematics of oceanic basalts, *Geol. Soc. London Spec. Publ.* **42**, 313–345 (1989). <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
15. Л.Г. Ананьева и др., Электроимпульсное дробление для высокочистого кварца, *Фунд. прикл. вопр. горн. наук* **9**(1), 126–132 (2022). [L.G. Anan'eva et al., *Elektroimpul'snoye drobleniye dlya vysokochistogo kvartsa, Fund. prikl. voпр. горн. наук* **9**(1), 126–132 (2022)]. (in Russ).
16. M. Bau and P. Dulski, Distribution of Y and REE in iron-formations, *Precambrian Res.* **79**, 37–55 (1996). [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
17. A. Migdisov et al., Hydrothermal transport of REE, *Chem. Geol.* **439**, 13–42 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.016>
18. S. Pedalino, B.E. Ramirez-Galindo, R. Ferstl, K. Hornberger, M. Arndt, and S. Gerlich, Probing quantum mechanics with nanoparticle matter-wave interferometry, *Nature* **649** (2026). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09917-9>
19. D. Seymour, Edouard Quérel, Rowena H. Brugge, Federico M. Pesci, and Ainara Aguadero. Understanding and Engineering Interfacial Adhesion in Solid-State Batteries with Metallic Anodes Ieuan. *ChemSusChem*. 2023, 16, (1-41) <https://doi.org/10.1002/cssc.202202215>
20. Hang, H., Xian, H., Deng, T., He, Z., Li, S., Yang, Y., Liao, H., Jiang, Y., Xi, J., Zhu, J., He, H. (2026). In situ observations of gold deposition in a dense liquid layer at the pyrite–water interface. *PNAS*, 123(4), e2517918123. <http://doi.org/10.1073/pnas.2517918123>.

Информация об авторах:

Юров Виктор Михайлович – профессор, ВНС ТОО «ТСК-Восток», (Астана, Казахстан, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Жангозин Канат Накошевич – ВНС, директор ТОО «ТСК-Восток», (Астана, Казахстан, e-mail: tskvstk@gmail.com)

Авторлар туралы мәлімет:

Виктор Юров – профессор, жетекші ғылыми қызметкер, «ТСК-Восток» ЖШС, (Астана, Қазақстан, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Канат Жангозин – аға ғылыми қызметкер, «TSC-Vostok» ЖШС директоры, (Астана, Қазақстан, e-mail: tskvstk@gmail.com)

Information about authors:

Viktor Yurov – Professor, Leading Researcher, LLP “TSK-Vostok”, (Astana, Kazakhstan, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Kanat Zhangozin – Leading Researcher, Director of TSC-Vostok LLP, (Astana, Kazakhstan, e-mail: tskvstk@gmail.com)

История статьи: поступила: 2 февраля 2026; принята: 28 апреля 2026.

Мақала тарихы: түсті: 2 ақпан 2026; қабылданды: 28 сәуір 2026.

Article history: received: 2 February 2026; accepted: 28 April 2026.