

УДК 553.3:553.078

## ПОРФИРОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕКТОНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА ОТ УРАЛА ДО ТИХОГО ОКЕАНА

© 2024 г. А. С. Якубчук\*

*МГУ им М.В. Ломоносова, геологический факультет,  
Воробьевы горы ГСП-1, Москва, 119991 Россия*

*\*E-mail: slaurum@aol.com*

Поступила в редакцию 01.10.2023 г.

Подписана в печать 04.11.2023 г.

Принята к публикации 06.11.2023 г.

Наличие повышенных содержаний золота (0.1–1 г/т) в порфировых системах Северной Евразии делает их конкурентоспособными с Андами, несмотря на обычно меньшие объемы руды и более низкие содержания меди. Делается вывод, что порфировые системы Северной Евразии формировались в островодужных обстановках так же, как и порфировые системы западной части Тихого океана, в противовес окраинно-континентальным магматическим поясам Анд. Рассматриваются особенности структурного и тектонического контроля порфировых кластеров и трендов Северной Евразии, а также практические аспекты оценки эрозионного среза порфировых систем.

*Ключевые слова:* порфировые системы, золото, медь, молибден, Северная Евразия

**DOI:** 10.31857/S0016777024010021, **EDN:** zzeurt

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистике, порфировые месторождения содержат от 50 миллионов до нескольких миллиардов тонн прожилково-вкрапленных и брекчиевых руд при средних содержаниях 0.2–1.5% Cu, <0.01–0.3% Mo и <0.01–1 г/т Au (Dilles, John, 2021). Рудная минерализация сосредоточена как в гранитоидных интрузиях штокообразной или дайковой формы, так и во вмещающих породах. По соотношению металлов рудные системы делятся на медные, медно-молибденовые и молибденовые. При этом золото является важным металлом примерно в 25% систем. Несколько процентов порфировых систем также содержат олово и вольфрам. В качестве попутных продуктов иногда извлекаются серебро, свинец, селен и палладий (John, Taylor, 2016). С порфировыми интрузиями также связаны эпитермальные и скарновые месторождения (Sillitoe, 2010), получившие в российской литературе аббревиатуру ПЭРС (e.g., Плотинская, 2017).

Медно-порфировые рудники обеспечивают до 70% мировой добычи меди, включая самый крупный в мире медный рудник на базе медно-порфирового месторождения Эскондида в Чили. В 2020 году он произвел свыше 1 млн т

меди (Якубчук, 2022), что эквивалентно примерно 5% мирового рудничного производства меди или всему годовому производству рафинированной меди России в 2020 г. (Государственный ..., 2021). Из порфировых месторождений добывается почти весь мировой молибден, около 20% мирового золота, 80% рения, почти весь теллур и значительное количество серебра и цинка (Sillitoe, 2010; John, Taylor, 2016).

Всего в мире на 2022 г. известно свыше 1200 порфировых систем, данные о большинстве из которых опубликованы в открытой базе данных Геологической Службы США (Singer et al., 2008). В этой базе данных сделано много допущений, особенно в отношении региона Северной Евразии. Так, к порфировым месторождениям отнесено золоторудное в связи с гранитоидами Васильковское месторождение в Казахстане, а также Тарор и Джилау в Таджикистане и золоторудное месторождение Мокрско в Чехии, а на Камчатке предполагается наличие порфировой системы в районе эпитермального месторождения Кумроч. Кроме того, в базе данных учтены некоторые медные скарны и молибден-кварцевые жилы как потенциальные индикаторы порфировых систем.

Тем не менее эта база данных была мною принята за основу, постоянно обновляется, корректируется и дополняется на протяжении многих лет. В последнее время пополнение происходит за счет публикации информации из Северо-Восточного Китая, Внутренней Монголии и Сихотэ-Алиня. Всего в базе данных для Северной Евразии учтено 235 объектов, или около 18% от общего числа.

Наибольшее количество порфировых систем обнаружено в Андах и Кордильерах (фиг. 1), где они имеют преимущественно мезозойско-кайнозойский возраст (Seedorf et al., 2005). Там же располагаются все известные 15 супергигантов с ресурсами руды свыше 5 млрд т. При этом 5 из них с ресурсами свыше 10 млрд т обнаружены в Чилийских Андах. Геодинамически они приурочены к активной континентальной окраине обеих Америк, так или иначе формирующейся за счет субдукции океанических плит, расположенных к востоку от Восточно-Тихоокеанского поднятия и его продолжения на север.

На западной активной окраине Тихоокеанской плиты сформировались порфировые месторождения меньшего размера, среди которых присутствуют гиганты свыше 1 млрд т (во всей базе их 102) кайнозойского, мезозойского и палеозойского возраста. Палеозойские системы обнаружены в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса и на пока еще плохо обследованном Таймыре. Известны они и на востоке Австралии в Лахланском складчатом поясе (Singer et al., 2008). Кроме того, фанерозойские медно-золото-порфировые месторождения встречаются в поясе Тетис и варисцидах Европы.

Особенностью этих месторождений является приуроченность к юным и зрелым островным дугам, которые вошли в состав Евразии и Австралии, а не к окраинно-континентальным магматическим поясам андийского типа. Эти месторождения имеют меньшие объемы руды, чем на востоке Тихого океана, но более высокие содержания золота, что делает их конкурентоспособными.

Архейские и палеопротерозойские порфировые системы мало распространены, но они известны на каждом континенте (всего около 60). При этом в Африке известно наименьшее количество порфировых систем вообще. Среднепротерозойской паузе длительностью в сотни миллионов лет частично соответствуют железоксидно-медно-золоторудные месторождения (IOCG), которые некоторыми исследователями (Skirrow, 2022) рассматриваются как среднепротерозойские аналоги порфировых систем. Наиболее известными отрабатываемыми докембрийскими порфировыми

системами являются архейский золото-порфировый Боддингтон в Австралии (Turner et al., 2020) и палеопротерозойский Айтик (Singer et al., 2008) в Швеции, рудные ресурсы в каждом из которых превышают 1 млрд т.

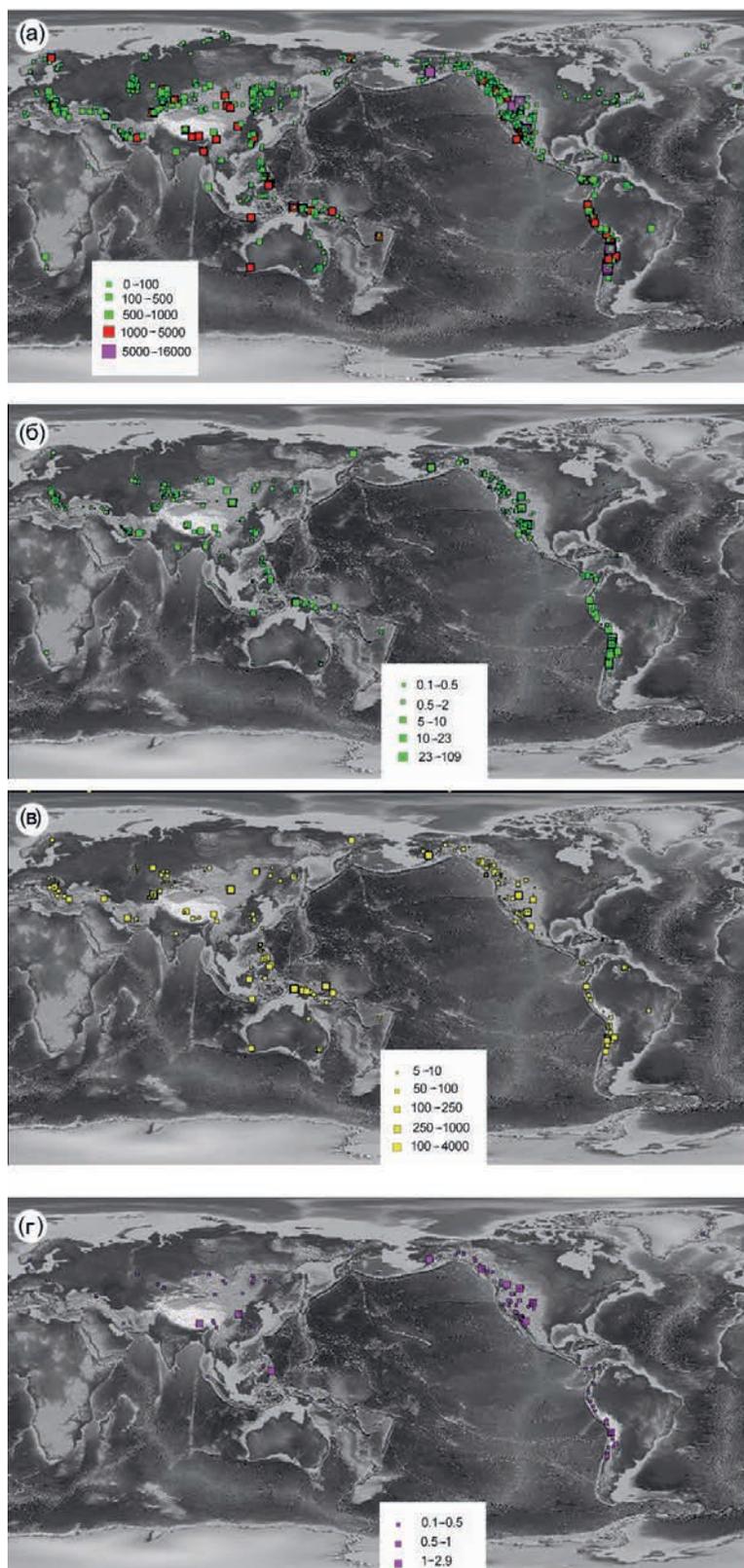
Таким образом, по совокупному количеству руды и металлов главными фанерозойскими порфировыми провинциями мира (в порядке значимости) являются Анды, Кордильеры, Индонезия-Филиппины, Центральная Азия, Западный Тетис и восточная Австралия. Каждая из них содержит хотя бы одно месторождение или проявление с ресурсами более 1 млрд т.

В СССР были найдены и частично разведаны многие порфировые месторождения и проявления. Однако добыча из таких месторождений была запущена в основном в Средней Азии и Закавказье. В Российской Федерации в советское время в разработку было запущено только Сорское порфировое месторождение в Кузнецком Алатау (в 1953 г.), где главным продуктом является молибден, а медь добывается в небольших количествах (Государственный ..., 2021).

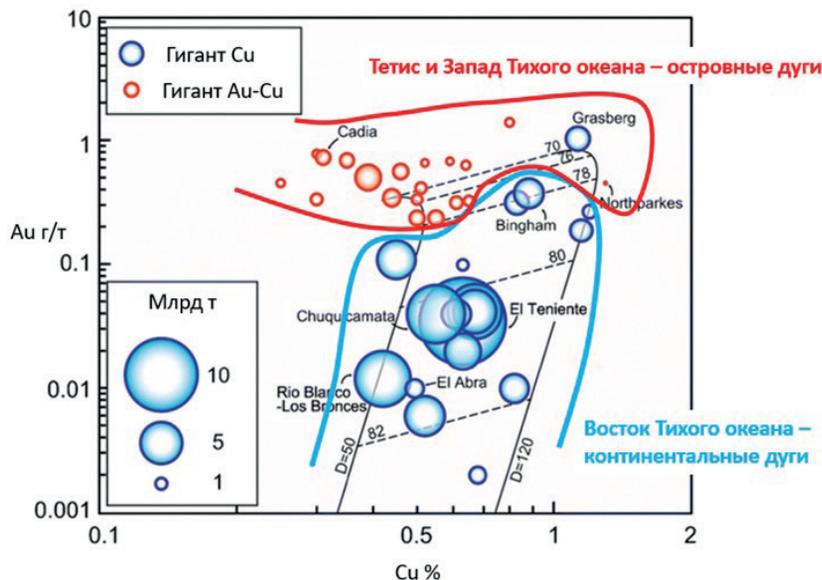
В России в советское время порфировые месторождения в силу их относительной бедности (~0.4% Cu) не выдерживали конкуренции с колчеданными и медно-никелевыми сульфидными месторождениями (>1% Cu) и после их открытия не продвигались до стадии добычи. По содержаниям меди порфировые системы бывшего СССР значительно уступают андийским. Однако в них, как и в порфировых системах западной части Тихого океана, присутствует золото с содержаниями 0.2–2 г/т, что и делает их экономически конкурентоспособными.

Содержания золота в порфировых системах на восточной активной окраине Тихого океана, как правило, составляют 0.01–0.1 г/т, что оказывается значимым только в медном концентрате при больших объемах переработки рудной массы. Таким образом, общее количество золота и на восточной, и на западной окраинах Тихого океана, включая Центральную Азию, может быть сопоставимым, но существенно различается по содержаниям (фиг. 2). Анализ закономерностей распределения трех главных полезных компонентов в порфировых системах показывает, что главным контролирующим фактором концентрации золота и меди является щелочность и кремнеземистость магм (Hollings et al., 2004; Cooke et al., 2005).

В данной статье рассматриваются порфировые системы Северной Евразии от Урала до Тихого океана, тектонически располагающиеся к востоку от Восточно-Европейского кратона и к северу от картонов Тарима и Северного Китая (Yakubchuk



**Фиг. 1.** Глобальное распределение медно-золото-порфировых месторождений и проявлений по: а — количеству руды (млн т), б — по количеству меди (млн т), в — по количеству золота (т) и г — по количеству молибдена (млн т). Составил А.С. Якубчук с изменениями по (Singer et al., 2008).



Фиг. 2. Содержания золота и меди в некоторых порфириновых системах континентальных дуг востока Тихого океана и островных дуг запада Тихого океана (изменено по (Cooke et al., 2005, 2007)).

et al., 2005, 2012; Seltmann et al., 2014). Большинство из них содержит как медь, так и золото, по соотношению которых выявляется две группы — более богатые и менее богатые обоими металлами (фиг. 3). На основе месторождений первой группы рудники были запущены до 2000 г. На основе второй это стало возможным только после 2010 г., после роста цен на медь и золото, хотя многие системы (Бозшаколь, Актогай) известны более 50 лет. Многие системы являются молибден-порфириновыми.

Важной особенностью порфириновых систем является наличие или отсутствие зон вторичного гипергенного обогащения как сульфидным материалом, так и медными окислами, которые особенно хорошо развиваются в условиях пустынного климата (Grimhall et al., 1985). Однако в порфириновых системах Северной Азии наиболее крупные запасы этого типа (свыше 1 млн т извлеченной меди) обнаружены только в порфириновых системах Коунрада (Казахстан) и Эрденета (Монголия). Зоны вторичного обогащения/окисления меньшего размера обнаружены в крупных порфириновых системах Алмалыкской группы (Узбекистан), Актогая (Казахстан) и Ою-Толгой (Монголия), где они присутствуют, но не имеют определяющего экономического значения.

В статье будут рассмотрены региональная зональность и практические аспекты морфологии и структурного контроля порфириновых кластеров. Уровень эрозионного среза порфириновых систем

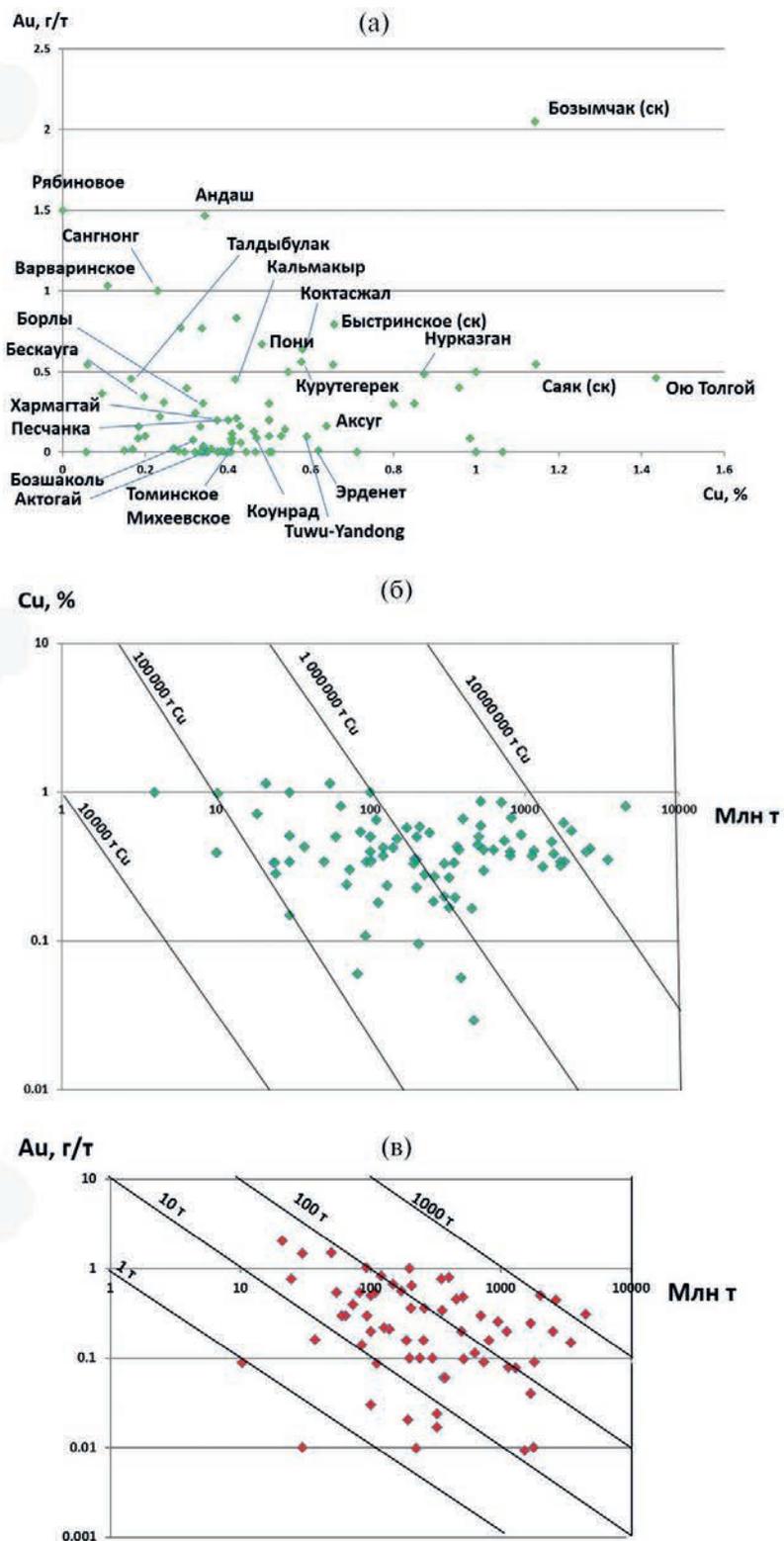
(ПЭРС) будет оцениваться по модели Ричарда Силлитое (Sillitoe, 2010).

### ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ПРОВИНЦИИ

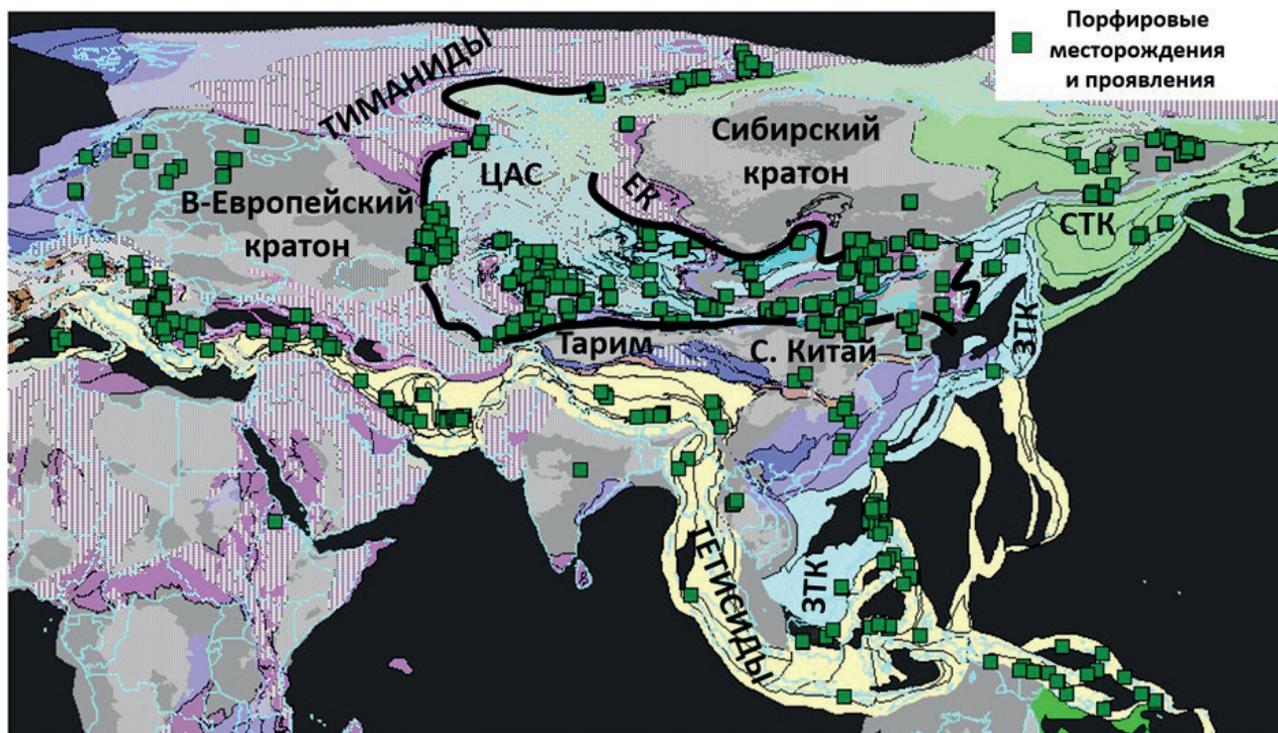
Порфириновые месторождения Северной Евразии располагаются в Центральном-Азиатском (ЦАС), Западно- и Северо-Тихоокеанском орогенных коллажах (фиг. 4), а также на Таймыре, разные части которого рассматриваются как продолжение Тиманид и Верхоянского складчатого пояса (Никишин и др., 2020). Практически все известные месторождения и проявления Северной Евразии приурочены к островодужным террейнам и запечатывающим их магматическим дугам, причлененным к Сибирскому и Восточно-Европейскому кратонам и находящимся внутри коллажей, а не к континентальным дугам андийского типа. Порфириновые системы Таймыра находятся на ранней стадии изучения и рассматриваются как раннемезозойские образования, наложенные на более древние орогенные пояса и север Сибирского кратона.

#### *Порфириновые месторождения Центрально-Азиатского суперколлажа*

В ЦАС выделяется 10 порфириновых провинций, увязанных с вмещающими тектоническими элементами и повторяющих очертания гигантских ороклинов, которые являются главной



Фиг. 3. Порфировые системы Северной Евразии: а — соотношение меди и золота; б — соотношение ресурсов руды и содержаний меди; в — соотношение ресурсов руды и содержаний золота. СК — скарн.



Фиг. 4. Орогенные коллажи и порфиновые месторождения и проявления Азии. Коллажи: ЕК — Енисейский, ЗТК — Западно-Тихоокеанский, СТК — Северо-Тихоокеанский, ЦАС — Центрально-Азиатский.

особенностью строения ЦАС (фиг. 5). Замковые части ороклинов обнажены в Алтае-Саянской области, Казахском нагорье и Центральной Монголии.

Самые древние порфиры ЦАС (возрастом около 505–510 млн лет) зарегистрированы в Алтае-Саянской провинции в Кузнецком Алатау (Сорское; Берзина и др., 2011; Soloviev et al., 2022) и в приамурской части Западно-Саянского ороклина (Аксуг и Кызык-Чад; Yakubchuk et al., 2012). По возрасту с ними может конкурировать предположительно позднерифейское порфирическое проявление Лекын-Талбей в Тименидах Полярного Урала (Плотинская, 2017), но его датировки требуют подтверждения.

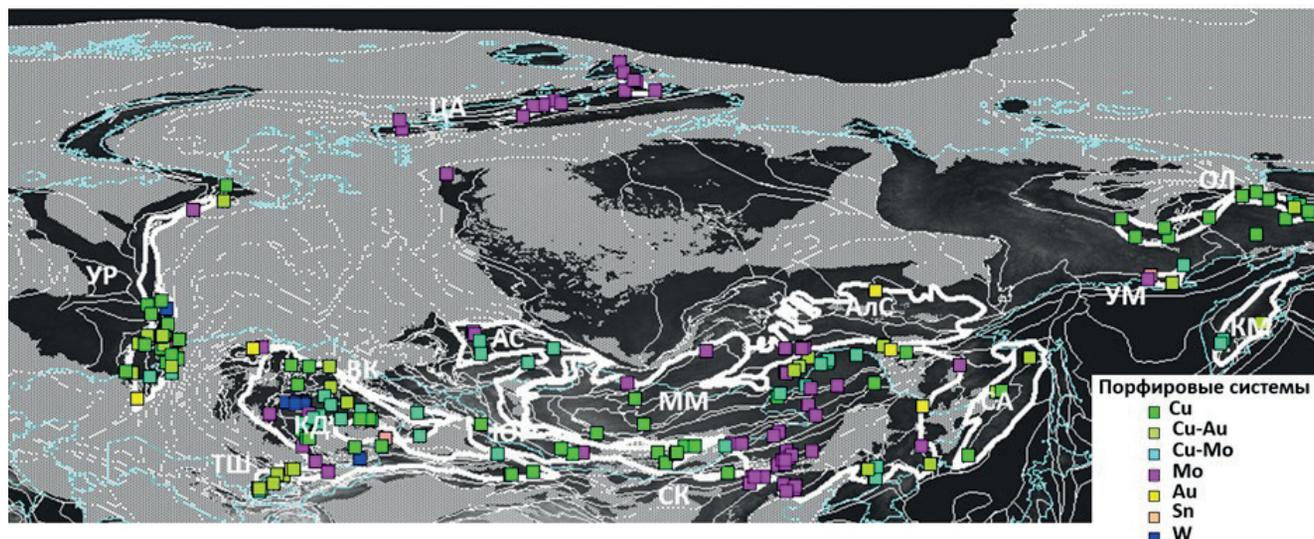
Для Казахстана-Джунгарской провинции регистрируется наибольшая концентрация порфирических месторождений, что отражает ее лучшую изученность. В эту провинцию также включены порфиры Северного Тянь-Шаня. Возраст порфиров омолаживается к центру Казахского ороклина от раннего палеозоя (491 млн лет) на северо-западе до позднего палеозоя (320 млн лет) на юго-востоке (Shen et al., 2016).

Восточное продолжение южного фланга Казахстана-Джунгарской провинции надежно не прослеживается. Однако на северной окраине

Северо-Китайского кратона известно медно-порфирическое месторождение Байнаимьяо (458 млн лет; Li et al., 2012), которое можно по тектонической позиции условно рассматривать как аналог Казахстана-Джунгарской провинции.

Южно-Гобийская провинция располагается на восточном продолжении северного крыла Казахстана-Джунгарской. В 1970-е гг. в ее пределах были открыты относительно небольшие порфирические объекты (Цаган-Суварга, Хармагтай). Повышенное внимание провинция получила после открытия слепой порфирической системы Ою-Толгой в конце 1990-х гг. К 2012 г. были разведаны ее гигантские масштабы как крупнейшего порфирического объекта Евразии (Crane, Kavalieris, 2012). Это открытие стимулировало повышенное внимание к Южно-Гобийской провинции и открытию молибден-порфирического Зуун Мод и прилегающих эпitherмальных месторождений (Roma, 2020), а также к доразведке и раскрытию крупного потенциала Хармагтая (Xanadu Mines, 2022).

В Тянь-Шаньской, Уральской и Восточно-Казахстанской провинциях порфирические кластеры располагаются в линейных орогенах, но и они по существу являются лишь внешними частями гигантского Казахского ороклина, разобнесенного мезозойско-кайнозойскими осадочными бассейнами.



**Фиг. 5.** Порфировые провинции и месторождения на фоне границ террейнов Северной Евразии. Провинции: АС — Алтае-Саянская, АлС — Алдан-Становая, ВК — Восточно-Казахстанская, КД — Казахстано-Джунгарская, КМ — Камчатская, ММ — Монголо-Маньчжурская, ОЛ — Олойская, СА — Сихотэ-Алиньская, СК — Северо-Китайская, ТШ — Тянь-Шаньская, УМ — Удско-Мургальская, УР — Уральская, СА — Центрально-Арктическая, ЮГ — Южно-Гобийская.

В Уральской провинции установлен широкий возрастной спектр ПЭРС (Грабежев, 2012; Плотинская, 2023) от силура (427 млн лет) до позднего карбона (300 млн лет), почти как в Казахстане, отражая сложную миграцию между террейнами Урала и Зауралья в соответствии с их геодинамической эволюцией (Плотинская, 2023). В Тянь-Шаньской и Восточно-Казахстанской провинциях развиты порфиры и/или скарны позднекаменноугольного-раннепермского возраста (Алмалык, Куру-Тегерек и другие в Тянь-Шане (Seltmann et al., 2014; Soloviev et al., 2018); Кызылкаин и другие в Восточном Казахстане).

В Монголо-Маньчжурской провинции самые древние порфиры имеют раннепалеозойский (Дубоашань — 484 млн лет; Zhao et al., 2018) и позднепалеозойский (Саран Уул — 327 млн лет; Guide ..., 1996) возраст. Но в восточной части палеозойские островодужные террейны большей частью скрыты под сшивающими дугами. Гораздо большее распространение имеют мезозойские вулканиты с наиболее продуктивными порфирами триасового (Эрденет — 240 млн лет, Баян Уул — 220 млн лет; Gerel et al., 2005) возраста в Центральной Монголии, но они полностью отсутствуют в замковой части орогена, возможно, из-за глубокого эрозионного среза. Еще более многочисленными являются юрско-меловые порфиры в восточной части провинции на территории Северо-Восточного Китая и Российского Забайкалья — Верхнего Приамурья. Они приурочены к сшивающей магматической

дуге Большого Хингана и его обрамления. Их возраст меняется от 185 до 111 млн лет (Сотников и др., 2007; Sun et al., 2022), обнаруживая сложную миграцию во времени и пространстве, которая увязывается с движением к северу Китайского кратона и закрытием Монголо-Охотского океана. По северной периферии провинции развиты юрско-раннемеловые медно-золото-порфировые (Лугоканское — 162 млн лет, Боргуликан — 123 млн лет), медно-золото-скарновые (Быстринское — 160 млн лет), медно-молибден-порфировые (Вулугету — 185 млн лет, Вунугетушань — 183 млн лет, Фукешань — 149 млн лет) и молибден-порфировые (Шахтаминское — 155 млн лет, Шинга — 130 млн лет) объекты.

В Алдано-Становой провинции, занимающей юго-восток Сибирского кратона, развит жильно-молибденовый пояс (Жирекен и Давенда — 160 млн лет), выделенный С.С. Смирновым (Смирнов, 1961). В его пределах можно ожидать открытие медно-порфировых месторождений. В настоящее время доказанным порфировым объектом считается Рябиновое месторождение золота (130 млн лет; Анисимова и др., 2017; Шатова и др., 2019) в центре провинции.

*Порфировые месторождения Западно-Тихоокеанского коллажа*

В Сихотэ-Алиньской провинции Западно-Тихоокеанского орогенного коллажа попытки обнаружить крупные медно-порфировые системы

предпринимались в российской части с 1990-х гг., исходя из потенциально благоприятной геологической ситуации и наличия эпитеpmальных месторождений (Белая Гора, Многовершинное). Реализовано это было в 2000-е годы открытием месторождения Малмыж (98 млн лет), а затем и осознанием потенциала близлежащего По-нийского (90 млн лет) порфиорового проявления (Soloviev et al., 2019; Петров и др., 2020). Оба месторождения увязываются с косо́й тектонической трансляцией к северу и ороклинным изгибанием Сихотэ-Алиньских террейнов после формирования Монголо-Охотской сутуры. С косо́й тектонической трансляцией связаны и менее крупные медно-порфиоровые проявления в других частях Сихотэ-Алинской провинции (Soloviev et al., 2019). В китайской части провинции присутствуют несколько более древние медно- и молибден-порфиоровые проявления (112–111 млн лет). На Северном Сихотэ-Алине также развиты эпитеpmальные системы палеоценового возраста (Многовершинное, Белая Гора). Эндогенное металлогеническое развитие провинции прервалось после раскрытия Японского моря.

#### *Порфиоровые месторождения Таймыра*

Молибден-порфиоровые системы Таймыра стоят особняком, располагаясь в Норильском районе Сибирского кратона (Болгохтох — ~250 млн лет; Туровцев, 2002) и в неопротерозойском орогене к северу от него (возраст минерализации 343, 255–250 и 241 млн лет; Проскурнин и др., 2021).

Триасовые датировки отвечают времени формирования сразу после траппов Тунгусской синеклизы, возможно, когда те были деформированы. Более древние датировки требуют своего объяснения. В любом случае их позиция относительно таймырских траппов нуждается в дальнейшей проработке.

#### *Порфиоровые месторождения Северо-Тихоокеанского коллажа*

В Северо-Тихоокеанском орогенном коллаже, протягивающемся на Северо-Восток России из богатых порфирами орогенов Аляски и Кордильер, наибольшую известность получили раннемеловые порфиоровые системы Баимского рудного района (Песчанка — 135 млн лет, Находка — 140 млн лет), открытые и осознанные как крупные объекты еще в 1970-е гг., но детально разведанные и оцененные лишь после 2008 г. (Звездов и др., 2011; Читалин и др., 2016). Они являются частью Олойского порфиорового района (Volkov et al., 2006), который потенциально может дать новые открытия в этом

географически удаленном районе, в том числе в пределах Уяндино-Ясачненской дуги (проявления Невидимка, Опыт, Кунаревское, Агынджа; Петров и др., 2019).

Бликие по возрасту порфиоровые проявления известны на полуострове Тайгонос (Лора — 136 млн лет) и в континентальной части юрско-раннемеловой Удско-Мургальской магматической дуги (Volkov et al., 2006). В пределах более молодого мел-палеоценового Охотско-Чукотского пояса, магматический фронт которого отступил в сторону континента, так же как и в Андах (Zonenshain et al., 1990), не известно порфиоровых проявлений соответствующего возраста на протяжении 3000 км, хотя известны золото-серебряные эпитеpmальные месторождения. Этот факт требует объяснения. Возможной причиной может быть слишком раннее прекращение субдукции после коллизии с Курило-Камчатской магматической дугой. Однако возможно, что мел-палеоценовые порфиоровые системы еще не вскрыты эрозией.

В Курило-Камчатской магматической дуге уже давно прогнозируются кайнозойские порфиоровые системы при обильном развитии неоген-четвертичных эпитеpmальных месторождений. Все попытки подтверждения порфиоровых объектов за последние 30 лет (Кирганик, Кумроч, Тымлат и др.) не привели к открытию месторождений (Soloviev et al., 2021).

#### *Пространственно-временные закономерности*

Таким образом, порфиоровые системы Северной Евразии формировались на протяжении 400 млн лет с раннего палеозоя до конца мезозоя и, возможно, кайнозоя на Камчатке, что тогда превысит 500 млн лет. Их пространственная позиция отражает общее омоложение вмещающих магматических дуг в направлении Тихого океана, за исключением Уральских, Тянь-Шаньских и Восточно-Казахстанских порфиоровых систем. Интересно, что порфиоровые системы не развиты в неопротерозойских орогенах на периферии ни Сибирского, ни Восточно-Европейского, ни Таримского или Северо-Китайского кратонов. Они также достоверно не известны в еще формирующихся кайнозойских орогенах на северо-западной активной окраине Тихоокеанской плиты.

Имеющиеся геохронологические датировки показывают, что формировались порфиоровые месторождения Северной Евразии пульсационно (фиг. 6). Периоды формирования в раннем палеозое охватывают до 100 млн лет, затем проявляясь в узком, но очень продуктивном интервале длительностью около 20 млн лет в среднем палеозое

и еще более продуктивном периоде длительностью около 50 млн лет в позднем палеозое. Последний приходится на начало сбора суперконтинента Пангея.

Общим в тектонической позиции всех рассмотренных порфировых систем Северной Евразии является их приуроченность к островодужным террейнам и сшивающим магматическим дугам, включая их пост-коллизийное развитие, а не к континентальным магматическим дугам Андийского типа. Даже если порфировые системы рассматриваемого региона и формировались на древней континентальной коре, часто классифицируемой как микроконтинент (например, Алмалык), все равно последняя входила в фундамент более зрелых дуг, а не являлась частью крупных континентов типа Южной Америки. Ороклины являются характерной чертой всех неопротерозойско-палеозойских и мезозойско-кайнозойских островных дуг и ЦАС, и Северо- и Западно-Тихоокеанского орогенных поясов. Этапность ороклинных изгибов фиксируется хорошо поверхностями несогласий, а также миграцией сшивающих островодужных комплексов во времени. Форма некоторых островных дуг западной части Тихого океана свидетельствует, что ороклинное изгибание может начинаться еще на стадии магматической активности островных дуг.

#### *Морфология порфировых систем, их кластеризация и оценка их деформированности*

Порфировые интрузии Северной Евразии имеют как классическую штокообразную (Коунрад в Казахстане, Талдыбулак в Кыргызстане), так и дайкообразную (Михеевское на Урале в России, Коктасжал в Казахстане) морфологию. Как правило, порфировые интрузии формируют кластеры. Причем кластеры, в том числе крупные (>500 млн т руды), тоже имеют разную форму, подчиняющуюся структурному контролю. Расшифровка такого контроля имеет большое значение для обнаружения новых порфировых интрузий в уже открытом рудном кластере, так как статистически отдельные порфиры располагаются в кластере в пределах нескольких километров друг от друга (Sillitoe, 2010).

Новые открытия, однако, часто ведут к смене поисковой парадигмы и, как правило, к приросту ресурсов, часто на порядок. Интерпретация формы систем и кластеров зависит от соотношений с разломами и расшифровки их кинематики как при формировании, так и при последующей пострудной истории. Наиболее ярко это произошло, например, при разведке гигантских

месторождений группы Ою-Толгой в Монголии (Crane, Kavalieris, 2012), Пebbл на Аляске (Lang et al., 2012) и Чукару Пеки в Сербии (Goddard et al., 2017).

#### *Площадные кластеры*

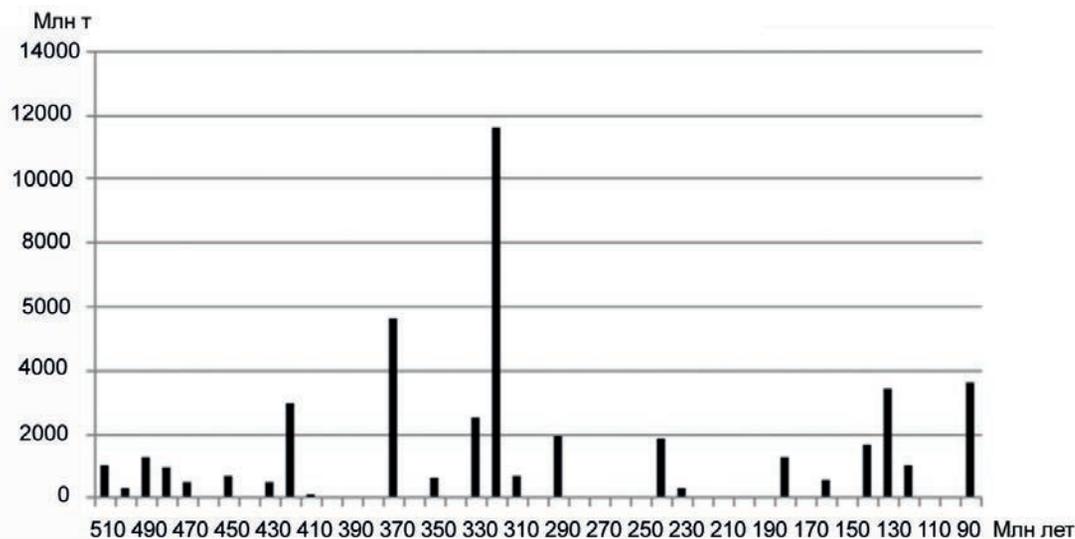
Площадные кластеры долгое время считались наиболее распространенными. Они характерны, например, для типовых порфировых систем на юго-западе США или в Чили (Sillitoe, 2012), т.е. в континентальных магматических дугах восточной части Тихого океана. Такие кластеры содержат очень крупные и сверхкрупные ресурсы руды. Так, общие запасы месторождений кластера Эскондида превышают 144 млн т меди (Herve et al., 2012).

В Северной Евразии к площадным можно отнести крупные порфировые кластеры Малмыжской группы месторождений мелового возраста, занимающих площадь  $15 \times 8$  км в Хабаровском крае России (общие ресурсы 12.09 млн т Cu, 478 т Au; Фиг. 7А; Soloviev et al., 2019), и Актогайского рудного узла каменноугольного возраста площадью  $10 \times 3$  км в Казахстане (>12.5 млн т Cu, >140 тыс. т Mo, >80 т Au; Фиг. 7Б; Yakubchuk et al., 2012). В Малмыжском кластере, имеющем вытянутую форму, отдельные порфиры не образуют четкого линейного тренда.

Алмалыкская группа порфиров также на первый взгляд обнаруживает площадное распределение. Ее общие ресурсы свыше 10 млн т меди и более 2000 т золота публиковались для Кальмакыра и Дальнего (Golovanov et al., 2005; Звездов и др., 2018). Эта медно-золото-порфировая система была крупнейшей в Евразии до открытия Ою-Толгой и остается одной из крупнейших в мире порфировых систем по количеству разведанного в ней золота.

Алмалыкский кластер ( $5 \times 2$  км) состоит из нескольких сближенных порфировых интрузий (Кальмакыр, Дальнее, Карабулак, Северо-Западный Балыкты, фиг. 7в; Golovanov et al., 2005; Звездов и др., 2018), чьи минерализованные оболочки первоначально сливались, но в современной структуре они смещены по пострудным разломам с кажущимся смещением около 1 км и более. Тем не менее, они обнаруживают четкую северо-западную вытянутость.

В 6 км к юго-востоку от Алмалыкского располагается Саукбулакский порфировый кластер (Звездов и др., 2018) площадью  $3 \times 1$  км (Кызата, Нижнекаульдинское, Сарычеку; фиг. 7в), части которого также смещены по пост-рудным разломам. Эти два кластера образуют тренд северо-западной ориентировки длиной около 12 км,



Фиг. 6. Возрасты и тоннаж минерализованной массы порфировых систем Северной Евразии.

который совпадает с пониженными значениями магнитного поля той же ориентировки, т.е. весь кластер имеет уже линейный характер. Подобный линейный характер имеет порфировый кластер Чукикаматы, протягивающийся более чем на 20 км (Rivera et al., 2012). Сама Чукикамата считается классическим порфировым объектом.

#### *Линейные тренды и кластеры*

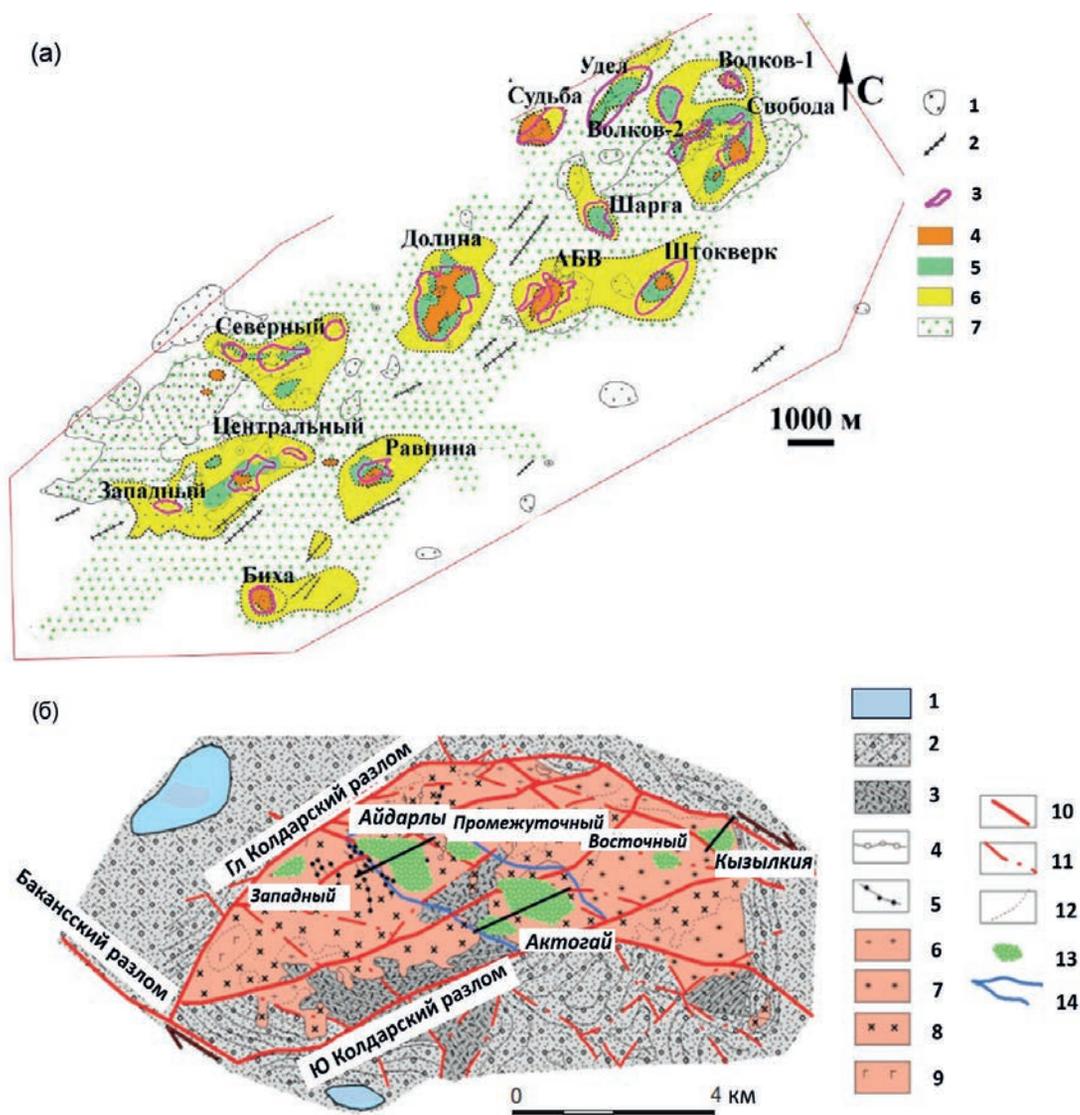
Среди них можно выделить региональные линейные тренды и локальные кластеры. Для региональных трендов характерно линейное распределение классических изолированных порфиров, как это регистрируется в случае уже упомянутой Чукикаматы (Rivera et al., 2012). В локальных кластерах порфировые интрузии сближены настолько, что их рудные оболочки сливаются в линейную систему. И тренды, и кластеры могут иметь как продольное, так и секущее положение по отношению к вмещающим террейнам или сшивающим магматическим дугам.

В Северной Евразии к линейным региональным трендам можно отнести протяженный тренд (170 км), включающий каменноугольные порфировые месторождения и проявления Северного Прибалхашья (Приозерное, Коунрад, Борлы-Карabas и Жанет; фиг. 8; Yakubchuk et al., 2012).

Рассмотрение региональных данных позволяет считать, что для позднепалеозойских порфировых трендов Центрального Казахстана можно выявить наиболее четкий структурный и тектонический контроль. Так, Коунрадский тренд контролируется северо-восточной границей Актау-Моинтинского

метаморфического террейна с окружающими ранне- и среднепалеозойскими аккреционными террейнами, почти полностью перекрытой сшивающей Балхаш-Илийской магматической дугой позднепалеозойского возраста (фиг. 8). Примерно в 90–100 км к юго-западу от Коунрада располагается кажущийся изометричным порфировый кластер (Сокуркой, Каратас IV, Каратас Северный) такого же возраста, а в 170 км к юго-западу от Коунрада находится еще один кажущийся изометричным порфировый кластер (Восток, Каскымыс и др.), полностью скрытый кайнозойскими отложениями Илийской впадины. Эти два кластера располагаются на противоположных берегах озера Балхаш. Поиски регионального тектонического контроля показывают, что они располагаются вдоль юго-западной границы Актау-Моинтинского террейна в фундаменте Балхаш-Илийской дуги, т.е. в целом аналогично Коунрадскому.

В 50 км к востоку от Коунрада известно несколько медно-порфировых проявлений (Каскырказган, Кепчам и др.), которые образуют тренд ССЗ простирания длиной 35 км. На его северном продолжении располагается несколько проявлений эпитермального золота среди вулканитов Балхаш-Илийского пояса, а на северной периферии пояса — еще один кластер каменноугольных медных порфиров (Алмалы, Байназар, Батыстау) и далее крупная вольфрам-порфировая система Верхнего Кайракты (Yakubchuk et al., 2012). Таким образом, общая длина этого тренда составляет около 220 км с постепенной сменой рудной специализации от медной на юго-востоке на

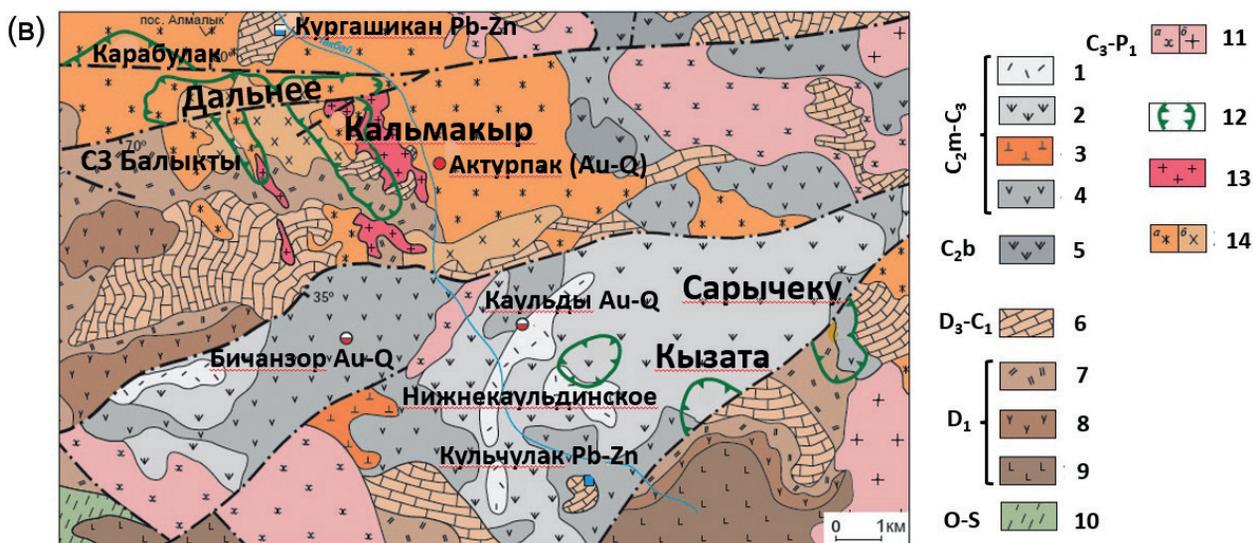


**Фиг. 7.** Схема геологического строения Малмыжского, Актогайского и Алмалык-Саукбулакского порфировых кластеров.

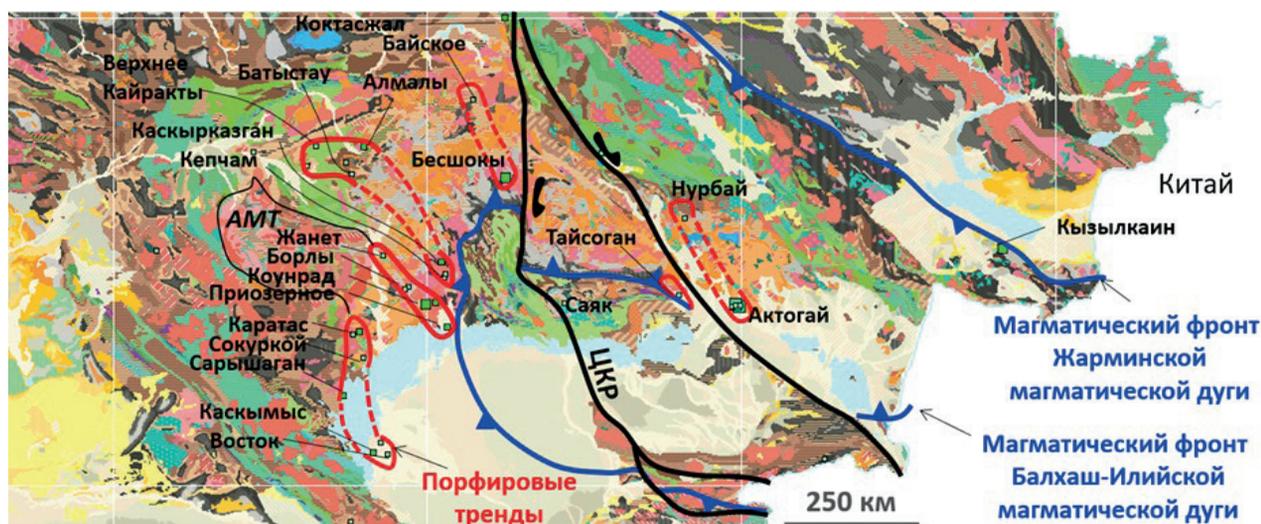
а — Малмыжский кластер (по Е.К. Игнатьеву и др., из Буханова, 2020). 1–2 — диоритовые порфиры, диориты, кварцевые диориты, гранодиориты в штоках (1) и дайках (2); 3 — кварц-сульфидные штокверки; 4–7 — гидротермальные изменения: калиевые (4), кварц-серицит-хлоритовые (5), кварц-серицитовые (6), пропилиты (7).

б — Актогайский кластер (цитируется по Yakubchuk et al., 2012). 1 — юрские терригенные образования; 2 — верхнекаменноугольно-нижнепермские обломочные породы, туфы, игнимбриты; 3 — средне- и верхнекаменноугольные дацитовые туфы и игнимбриты; 4 — пострудные гранодиорит-порфировые дайки; 5 — плагิโอгранит-порфиры; 6 — биотитовые гранит-порфиры; 7 — гранодиорит-порфиры; 8 — кварцевые порфиры; 9 — габбро-диориты; разломы главные (10) и второстепенные (11); 12 — фациальные границы интрузий; 13 — меднопорфировые месторождения и проявления; 14 — пиритовый ореол.

в — Алмалык-Саукбулакский кластер (упрощенно по Звездов и др., 2018). 1–4 — средне-(московский ярус)-позднекаменноугольные ( $C_2m-C_3$ ) вулканы: 1–2 — андезит-дациты, 3 — экструзивные андезит-дациты, 4 — андезит; 5 — среднекаменноугольные (башкирский ярус) трахибазальт-трахиандезит-дацит-риолиты ( $C_2b$ ); 6 — верхнедевонско-нижнекаменноугольные ( $D_3-C_1$ ) доломиты и известняки; 7–9 — нижнедевонские: 7 — риодациты, 8 — дациты, 9 — андезит-базальты; 10 — ордовикско-силурийские терригенные и вулканогенно-терригенные породы; 11 — позднекаменноугольно-раннепермские габбро-монцидиориты (а), гранодиорит-адамеллиты (б); 12 — рудные штокверки; 13 — средне (московский ярус)-позднекаменноугольные рудоносные гранодиорит-порфиры и кварцевые монзонит-порфиры; 14 — среднекаменноугольные сиенит-диориты главной фазы (а) и диориты (б).



Фиг. 7. Окончание



Фиг. 8. Металлогенетические тренды порфировых месторождений в Балхаш-Илийской магматической дуге Казахстана. АМТ — Актау-Моинтинский террейн, ЦКР — Центрально-Казахстанский разлом. Геологическая основа по (Seltmann et al., 2009).

медно-молибденовую в центре и вольфрамовую на северо-востоке.

Еще в 120 км восточнее в Балхаш-Илийской магматической дуге известны порфировые проявления (Байское, Бесшоқы), располагающиеся в 100 км друг от друга, но контролируемые региональным разломом ССЗ простирания. На юго-востоке тренд срезается меридиональным Центрально-Казахстанским сдвигом мезозойского возраста с правосторонним смещением на 70 км (Зайцев, 1984; Читалин, 2018).

В 75 км восточнее располагается еще один тренд СЗ простирания длиной 170–180 км. Он представлен большей частью золото-эпитермальными и бедными медно-порфировыми проявлениями, среди которых особо следует отметить проявления группы Жарык-Тайсоган на крайнем юго-востоке. Учет смещения по Центрально-Казахстанскому разлому может добавить к этому тренду медно-золото-порфировое месторождение Коктасжал, располагающееся к западу от разлома.

Наконец, еще в 70 км восточнее Тайсогана находится уже рассмотренный выше кластер порфировых месторождений Актогая. Геологические и геофизические (магнитные) данные позволяют полагать, что Нурбайское медно-порфировое проявление в 120 км на северо-запад от Актогая может находиться на одном тренде с последним.

Все эти тренды разной степени достоверности располагаются как вблизи замковой части, так и на крыльях Казахского орогена с неравномерным шагом 50–70–120 км. Секущее положение трендов по отношению к Балхаш-Илийскому поясу указывает на их формирование при изгибании орогена. При этом часть трендов контролируется в том числе и границами разнородных террейнов в фундаменте Балхаш-Илийского пояса, а самые крупные и лучше минерализованные порфировые системы, на базе которых были созданы горнодобывающие предприятия (Коунрад, Борлы, Актогай и Коктасжал), располагаются на крыльях орогена.

Для среднепалеозойских и раннепалеозойских медно-порфировых систем Центрального Казахстана структурные тренды такого же масштаба, как для позднего палеозоя, не выявляются, но локальный контроль присутствует.

В масштабе всего Центрального Казахстана можно утверждать, что для его западной части, где преобладают докембрийские метаморфические террейны, порфировые системы не характерны, тогда как в восточной “бездокембрийской” части, где развиты островодужные террейны и сшивающие их магматические дуги, они, наоборот, широко развиты. Однако самые крупные по минерализованной массе медно-порфировые месторождения (Бозшаколь, Нурказган и Коунрад), независимо от возраста, располагаются непосредственно или в относительной близости к восточной границе докембрийских метаморфических террейнов.

На Урале, восточный склон которого обнажен фрагментарно (Puchkov, 2017), порфировые кластеры более-менее хорошо выражены для систем возрастом 435–405 млн лет в структурном тренде длиной 140 км (Зеленый Дол, Томинское, Алапаевск) в восточной части Тагило-Магнитогорского островодужного террейна параллельно его вытянутости. Восточнее, в Валериановской магматической дуге, располагаются несколько порфировых и скарновых объектов возрастом 335–320 млн лет (Бенкала, Баталы, Варваринское; Плотинская, 2023), которые также располагаются вдоль меридионального тренда параллельно дуге. Последняя является непосредственным продолжением Кураминской дуги, в которой находится Алмалыкский порфировый кластер.

На Алтае порфировые системы развиты (или выявлены?) ограниченно. Имеющиеся данные позволяют говорить о субмеридиональном тренде длиной около 230 км от раннепалеозойского Сорского Мо-порфирового месторождения до Агаскыра в Кузнецком Алатау, а близкие им по возрасту медно-золото-порфировые системы Аксуга и Казык-Чадра пока выглядят изолированно. Монгольская часть вмещающей Кузнецко-Хамсаринской дуги слабо изучена.

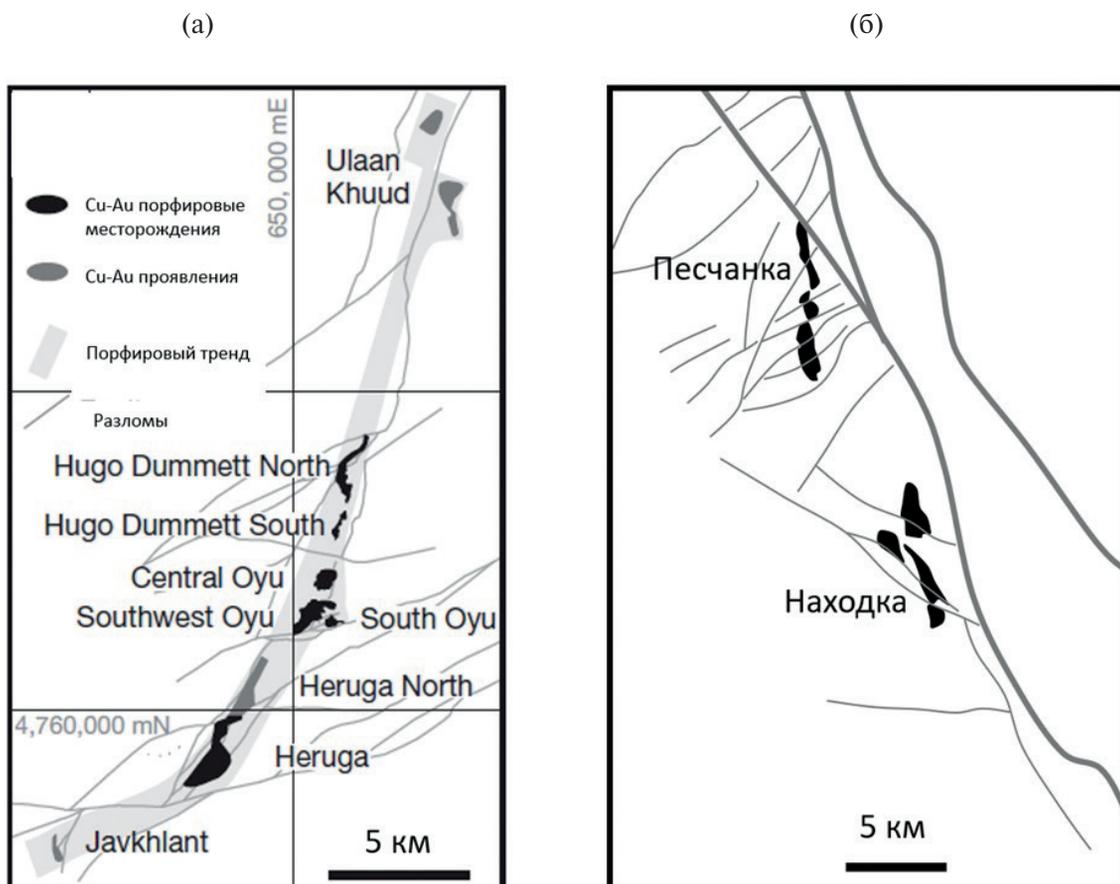
Сходную линейную позицию имеют скарновые и порфировые тренды Южного Забайкалья.

К локальным линейным кластерам относится гигантская система Ою-Толгой, являющаяся частью СВ тренда длиной более 225 км, тянущегося к месторождению Цаган-Суварга в секущем положении по отношению к широтной ориентировке островодужного террейна Гурван-Сайхан (Crane, Kavalieris, 2012).

Ою-Толгой — самая крупная по количеству содержащейся меди порфировая система Евразии (36 млн т Cu, 1400 т Au; Crane, Kavalieris, 2012). Она состоит из серии небольших порфировых штоков диаметром около 200 м, но располагающихся на протяжении >10 км так, что их минерализованные оболочки сливаются, образуя линейную систему северо-северо-восточного простирания. При этом рудный кластер Херуга смещен от Ою-Толгой по пострудным разломам (фиг. 9а).

Сходную линейную позицию можно выявить для ряда других порфировых кластеров Северной Евразии, таких как Боргуликан в Амурской области (Петров и др., 2019). В нем пока не выявлено больших объемов экономически значимых содержаний (Пересторонин и др., 2017).

Наибольшее структурное сходство с Ою-Толгой можно отметить для Баимского порфирового кластера протяженностью более 15 км (фиг. 9б), самого крупного в России по запасам порфировой меди. Для его меридиональной ориентировки на основе анализа прожилковой минерализации и разломной тектоники указывается право-сдвиговый контроль на стадии формирования штокверков (Читалин и др., 2016) в пределах Олойского островодужного террейна. Вместе с тем магнитные и структурные данные указывают, что структурный рисунок скорее соответствует пострудному левостороннему смещению, которое и обеспечивает сегментацию порфира или порфиров Песчанки не столько по разломам северо-восточного, сколько по пострудным левосторонним сдвигам северо-западного простирания, образовавшимся при сутурировании Южно-Ануйской зоны за



**Фиг. 9.** Линейное расположение порфирических месторождений в кластере Ою-Толгой в Монголии (а) протяженностью свыше 10 км (Crane, Kavalieris, 2012) и Баимки на Чукотке (б) составлено с использованием разномасштабных данных (Читалин и др., 2016).

счет приспособления к выступам на северной окраине Омолонского кратонного террейна.

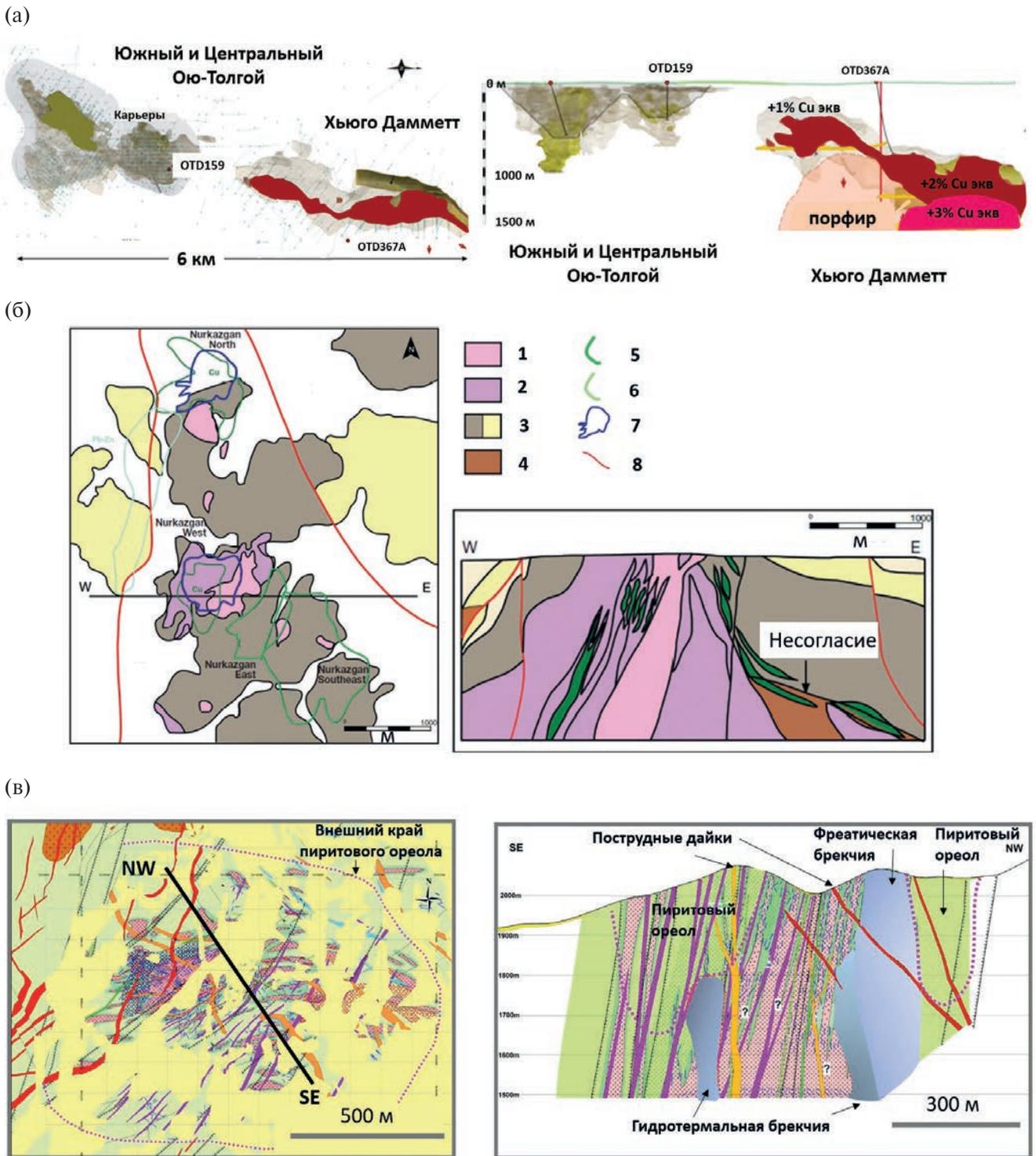
#### Оценка эрозионного среза

Оценка глубины эрозионного среза имеет ключевое значение для интерпретации поискового потенциала как конкретных порфирических интрузий, так и их кластеров. Для этого требуется расшифровка гидротермальной и породной зональности и сравнение с моделью (например, Sillitoe, 2010). При этом каждое месторождение и проявление несет индивидуальные черты, которые могут иметь существенные отклонения от модели, в том числе за счет неполного развития порфирической системы. Однако общая гидротермальная зональность, наличие штокверка и последовательность формирования прожилков нескольких генераций в минерализованных порфирах носят достаточно универсальный характер, т.к. контролируются *PT*-условиями остывающей порфирической интрузии (Sillitoe, 2010). Неправильная

оценка гидротермальной зональности, особенно затушеванной гипергенными процессами, может привести к недооценке или переоценке ресурсного потенциала.

Как было показано в предыдущем разделе, оценка эрозионного среза также зависит от совокупности таких факторов, как быстрое захоронение и сохранение магматической дуги и ее рудных систем под более молодыми отложениями, как это случилось в Казахском нагорье. Как было показано выше, учет пострудных тектонических перемещений может помочь в расшифровке современной структуры порфирических систем.

В Северной Евразии наиболее ярким примером является недавняя история открытия полуслепых месторождений группы *Ою-Толгой* и *Херуга* в Монголии. Детальное описание событий отражено в книге одного из первооткрывателей (Diakov et al., 2018). Ключевым перед первым полевым посещением Ою-Толгой явилось выявление иллитовой аномалии на спектрально-зонном спутниковом снимке. При полевым посещении



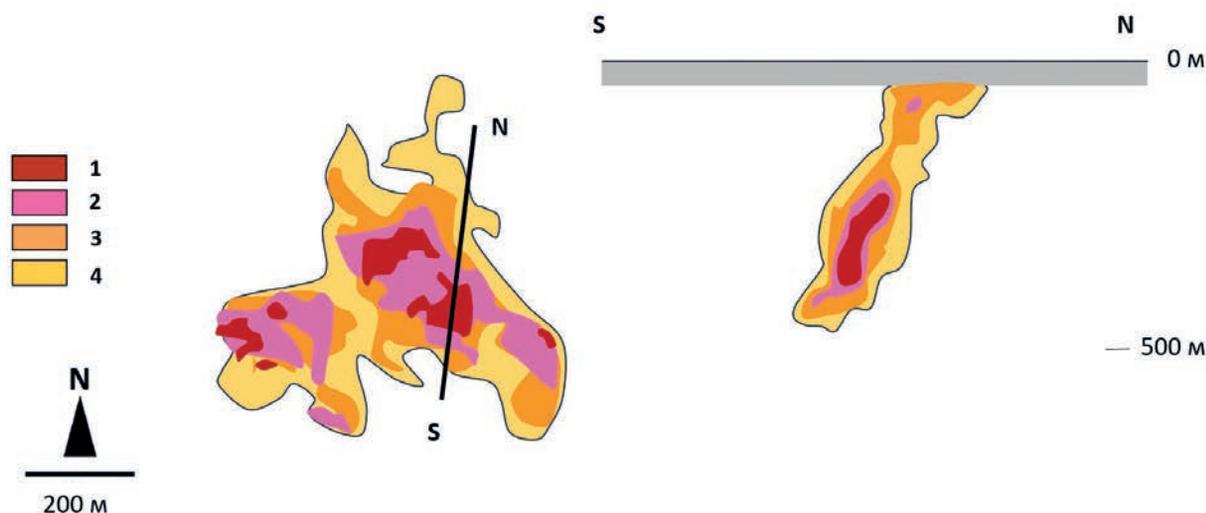
**Фиг. 10.** а — конфигурация медно-золотых оболочек кластера Ою-Толгой в плане и на разрезе до открытия месторождения Херуга (Crane, Kavalieris, 2012).

б — геологическая схема и разрез месторождения Нурказган (Yakubchuk et al., 2012). 1 — диоритовый порфир; 2 — гранодиорит; 3 — среднепалеозойские вулканогенно-осадочные породы; 4 — ордовикско-нижнесилурийские турбидиты; 5 — контуры медной минерализации; 6 — контуры полиметаллической минерализации; 7 — карьеры; 8 — главные разломы.

в — геологическая схема и разрез порфировой системы Талдыбулак (по данным К. В. Лобанова 2013 г.).

г — распределение содержаний меди в плане и на разрезе месторождения Бескауга (Underwood, Dumala, 2022). 1 — >0.75% Cu, 2 — >0.5% Cu, 3 — >0.4% Cu, 4 — >0.3% Cu.

(г)



Фиг. 10. Окончание

было обнаружено наличие небольшого холма (по-монгольски “толгой”), сложенного вторичными кварцитами среди впадины, заполненной рыхлыми отложениями мелового возраста. Одним из геологов вторичные кварциты было предложено считать бесперспективными на наличие продуктивной минерализации, а другой предположил, что они являются шляпой гипергенного выщелачивания порфировой системы, ниже которой возможно выявление зоны вторичного обогащения. Последующие геофизические и буровые работы показали наличие относительно небольшой зоны вторичного обогащения, а сама система в ее северной части оказалась слабоэродированной (фиг. 10а) и в некоторых ее частях сохранились все элементы вертикальной и латеральной зональности, осложненной пострудными разломными перемещениями. Кроме того, рудная система оказалась несколько наклоненной (tilted) за счет пострудных тектонических движений.

В Казахстане подобная ситуация имела место на группе месторождений Нурказган вблизи Караганды в пределах Среднепалеозойского пояса. Первоначальные работы в 1990-е гг. были сфокусированы на оценке медно-золотых ресурсов брекчиевой трубки (213 млн т с 0.82% Cu и 0.23 г/т Au; Yakubchuk et al., 2012), выходящей на поверхность среди слабоизмененных среднепалеозойских вулканитов. Этих ресурсов было достаточно для запуска карьерной добычи. Последующие геолого-разведочные работы в 2010 г., нацеленные на прослеживание трубки на глубину более 300 м, выявили наличие питающей порфировой

системы (фиг. 10б) с гораздо большими ресурсами (525 млн т с 0.78% Cu и 0.45 г/т Au; Yakubchuk et al., 2012), содержания металлов в которых позволили обеспечить подземную отработку.

Сопоставление с порфировой моделью Sillitoe (Sillitoe, 2010) дает противоречивые результаты. С одной стороны, минерализованные брекчиевые трубки хорошо вписываются в модель и означают довольно слабую эродированность системы. С другой стороны, обнаруженная порфировая минерализация распространена вдоль несогласия в основании вулканогенной толщи, имея, по существу, субстратиформное залегание. Как бы то ни было, важным конечным результатом является обнаружение крупных скоплений меди и попутного золота, которые пригодны к промышленной отработке.

В случае раннепалеозойского месторождения Талдыбулак в Кыргызстане порфировая система была закартирована на поверхности еще в 1967 г. Однако низкие средние содержания меди (0.2%) при высоких содержаниях золота (около 1 г/т), оцененные в 1977–1980 гг. в целом неглубоким бурением, не привлекли внимание к ее потенциалу. Дальнейшие работы в 1990-е гг. были сосредоточены на зоне окисления. Бурение 2006 г. также было в основном неглубоким. Полевое посещение выявило наличие всех признаков развитой порфировой системы, включая наличие исключительно серицитовых изменений на поверхности и калиевых изменений в некоторых скважинах на глубине. Это послужило основанием для бурения более глубоких разведочных скважин и выявления

значительных ресурсов (12 млн унций золотого экв. с содержанием 1 г/т золотого эквивалента; Yakubchuk et al., 2012). Дополнительной сложностью для понимания системы являлось широкое развитие разнообразных брекчий и пострудных даек, количество которых первоначально противоречиво недооценивалось или переоценивалось, особенно в косых сечениях. Учет этих факторов позволил проследить порфиоровую систему до глубины свыше 600 м и опуститься ниже зоны серицитовых изменений в калиевую зону с более высокими содержаниями меди (фиг. 10в).

На раннепалеозойском месторождении Бескауга в Казахстане (Underwood, Dumala, 2022) препятствием для прямого картирования системы служили рыхлые отложения. Поэтому ключевую помощь оказала электроразведка, которая выявила наличие зоны высокой поляризуемости, отвечающей калиевым изменениям. Эта зона с высокими содержаниями меди и золота в осевой части и более низкими на периферии (всего 203.8 млн т с 0.28% Cu, 0.5 г/т Au; Underwood, Dumala, 2022) оказалась наклонной при значительной вертикальной вытянутости (фиг. 10г) и, следовательно, большем ресурсном потенциале, чем изначально считалось.

Похожий подход, нацеленный на выявление базовой гидротермальной зональности и штокверкового оруденения, был применен при полевой оценке перспектив проявления Малмыж в Хабаровском крае. Плохая обнаженность в условиях таежной местности препятствовала прямому картированию системы. Однако наличие породных развалов с видимым штокверком позволило посчитать участок перспективным и применить магнитные и ВП методы, которые и выявили несколько перспективных поисковых участков, где затем были разведаны минеральные ресурсы.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрение порфиоровых систем Северной Евразии показало, что почти все они образовались в юных и зрелых островных, а не в континентальных магматических надсубдукционных поясах на краю крупных континентальных масс типа Южной или Северной Америки. По этому параметру порфиоровые системы ЦАС сходны с Западно-Тихоокеанским и частью Северо-Тихоокеанского орогенного коллажа. И в тех, и в других для них характерны в целом невысокие содержания меди (0.4–0.5%) при повышенных содержаниях золота (0.3–0.5 г/т).

Приведенные примеры демонстрируют, что палеозойские порфиры развиты шире, чем это

задокументировано в других орогенах мира. Формирование порфиоровых систем Северной Евразии происходило пульсационно, начиная с раннего палеозоя до конца мезозоя. Достоверных кайнозойских систем на данный момент не выявлено. Отсутствуют и неопротерозойские порфиры. Наибольшая рудная масса в порфиоровых системах Северной Евразии и их наибольшее количество сформировалось в конце палеозоя около 320 млн лет назад на начальных стадиях сбора суперконтинента Пангея.

В Северной Евразии преобладают линейные кластеры, хотя проявлены и площадные. Такая организация систем обнаруживается как в региональных трендах (100–200 км), так и в локальных (20 × 5 км) кластерах.

Проведенный анализ показывает, что порфиоровая модель (Sillitoe, 2010) в целом хорошо “работает” применительно к разновозрастным и морфологически разнообразным порфиоровым системам Северной Евразии. Очевидно, что в каждом конкретном случае требуется решать вопросы о степени эродированности системы, какие гидротермальные процессы отражают те или иные геофизические поля, а учет пострудной тектоники и перекрывающих комплексов позволяет выявить возможные неоткрытые порфиры в них. Успешное решение этой задачи возможно путем комплексирования и совмещения разных данных между собой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимова Г.С., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н. Золото-редкометальное (Au-Mo-Te-Bi) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 12–22.
- Берзина А.П., Берзина А.Н., Гимон В.О. Сорское медно-молибден-порфиоровое месторождение (Кузнецкий Алатау): магматизм, влияние мантийного плюма на развитие рудно-магматической системы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 12. С. 1974–1986.
- Буханова Д.С. Минералого-геохимические особенности Малмыжского золото-меднопорфиорового месторождения, Хабаровский край: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2020. 200 с.
- Грабежьев А.И. Рениеносные медно-порфиоровые системы Урала: геологическое положение, изотопно-петрогеохимическая и возрастная латеральная зональность // Литосфера. 2012. № 4. С. 190–207.
- Зайцев Ю.А. Эволюция геосинклиналей. М.: Недра, 1984. 208 с.
- Звездов В.С., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Прогнозно-поисковые модели комплексных рудно-магматических систем вулканоплутонических поясов Востока России // Отечественная геология. 2011. № 3. С. 13–21.

- Звездов В.С., Мигачёв И.Ф., Минина О.В.* Морфологические типы медно-порфировых штокверков и обстановки их формирования // Руды и металлы. 2018. № 4. С. 37–53.
- Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф., Родина Е.А., Посаментьер Х., Фулджер Дж., Глумов И.Ф., Морозов А.Ф., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Фрейман С.И., Афанасенков А.П., Безъязыков А.В., Дороница М.С., Никишин В.А., Сколотнев С.Г., Черных А.А.* Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов. М.: ГЕОС, 2021. 156 с.
- Пересторонин А.Е., Вьюнов Д.Л., Степанов В.А.* Месторождения золото-медно-молибден-порфировой формации Приамурской золотоносной провинции // Региональная геология и металлогения. 2017. № 70. С. 78–85.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. Петров Е.И. и Тетенькин Д.Д. (ред.). М.: Министерство Природных Ресурсов РФ, 2021. С. 165–186.
- Петров О.В., Киселёв Е.А., Шпикерман В.И., Змиевский Ю.П.* Прогноз размещения месторождений золото-меднопорфирового типа в вулcano-плутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80 С. 50–74.
- Петров О.В., Ханчук А.И., Иванов В.В., Киселёв Е.А., Шатов В.В., Змиевский Ю.П., Молчанов А.В., Терехов А.В., Сергеев С.А.* U-Pb SIMS геохронология рудносных магматических пород золото-меднопорфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье) // Региональная геология и металлогения. 2020. № 83. С. 41–56.
- Плотинская О.Ю.* Порфировые месторождения Урала: закономерности размещения, возраст, геотектонические обстановки // Металлогения древних и современных океанов, 2017. С. 54–57.
- Плотинская О.Ю.* Порфирово-эпитеpмальные системы Урала: источники вещества, эволюция и зональность: дисс. ... д-ра. геол.-мин. наук. Москва: ИГЕМ, 2023. 266 с.
- Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А.* Центрально-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфировый пояс // Региональная геология и металлогения. 2021. № 85. С. 31–49.
- Смирнов С.С.* Полиметаллические месторождения и металлогения Восточного Забайкалья. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 508 с.
- Сотников В.И., Сорокин А.А., Пономарчук В.А., Гумон В.О., Сорокин А.П.* Возраст Cu-Mo-(Au)-порфирового орудения и магматических комплексов Боргуликанского рудного поля (Верхнее Приамурье) // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 2. С. 229–237.
- Туровцев Д.М.* Контактный метаморфизм норильских интрузий. М.: Научный мир, 2002. 318 с.
- Читалин А.Ф.* Структурная эволюция Спасской меднорудной зоны, Центральный Казахстан. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018. 232 с.
- Читалин А.Ф., Николаев Ю.Н., Бакшеев И. А. и др.* Порфирово-эпитеpмальные системы Баимской рудной зоны, Западная Чукотка // Смирновский сборник. М.: Макс-Пресс, 2016. С. 82–115. [http://www.geol.msu.ru/news/smirnov\\_2016.pdf](http://www.geol.msu.ru/news/smirnov_2016.pdf).
- Шатова Н.В., Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В., Петров О.В., Сергеев С.А., Прасолов Э.М., Дворник Г.П., Леонтьев В.И.* Рябиновое медно-золото-порфировое месторождение (Южная Якутия): геологическое строение, геохимия изотопов благородных газов и изотопное (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) датирование околорудных метасоматитов и оруденения // Региональная Геология и металлогения. 2019. № 77. С. 75–97.
- Якубчук А.С.* Российская добыча меди – 30 лет. 2022. <https://gold.1prime.ru/reviews/20220112/438608.html>
- Brimhall G.H., Alpers C.N., Cunningham A.B.* Analysis of supergene ore-forming processes and ground-water solute transport using mass balance principles // Econ. Geol. 1985. V. 80. № 5. P. 1227–1256. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.5.1227>
- Cooke D.R., Hollings P., Walshe J.* Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls // Econ. Geol. 2005. 100. № 5. P. 801–818. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>
- Cooke D.R., Harris A.C., Braxton D.P., Simpson K.A.* Basins, breccias and basement – Diverse settings for porphyry deposits // Andrew CJ, et al. (ed.) Digging Deeper: Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting Dublin, Ireland. Irish Association for Economic Geology. 2007. P. 395–398.
- Crane D., Kavalieris I.* Geologic overview of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au-Mo deposits, Mongolia. SEG Spec. Publ. 16. 2012. P. 187–214.
- Diakov S., Sanjdorj S., Jamsrandorj G.* Discovery of Oyu Tolgoi. A Case Study of Mineral and Geological Exploration. Elsevier? 2018. 272 p.
- Dilles J.H., John D.A.* Porphyry and Epithermal Mineral Deposits // D. Alderton and S.A. Elias (Eds). Encyclopedia of Geology (Second Edition), V. 5. 2021. P. 847–866.
- Gerel O., Dandar S., Amar-Amgalan S., Javkhlanbold D., Myagamarsuren Se., Myagamarsuren Sa., Munkhsengel B., Soyolmaa B.* Geochemistry of granitoids and altered rocks of the Erdenet porphyry copper-molybdenum deposit, central Mongolia // Mao J. and Bierlein F.P. (Eds) Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 2005. P. 18–21.
- Goddard R., Pittuck M., Stenhouse P.* Geological observations, 3D interpretation and mining-economic considerations for estimating and reporting the mineral resource at Cukaru Peki. Applied Earth Science. 2017. V. 126. № 2. P. 59.

- Golovanov I.M., Seltmann R., Kremenetsky A.A.* The Porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia; 2. The Almak (Kalmakyr-Dalnee) and Saukbulak Cu-Au porphyry systems, Uzbekistan // Porter T.M. (Ed.). Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective. Adelaide: PGC Publishing, 2005. V. 2. P. 513–523.
- Hervé M., Sillitoe R.H., Wong C., Fernández P., Crignola F., Ipinza M., Urzúa F.* Chapter 3: Geologic Overview of the Escondida Porphyry Copper District, Northern Chile. SEG Special Publication 16, 2012. P. 55–78.
- Hollings P., Cooke D.R., Walshe J.* The characteristics, distribution and controls of giant porphyry Cu deposits. Gangue. 2004. 82 p.
- Guide to the geology and mineral resources of Mongolia. Jargalsaihan D., Kaziner M., Baras Z., Sanjaadorj D. (eds). Ulaanbaatar, Geological Exploration, Consulting and Services Co., 1996. 329 p.
- John D.A., Taylor R.D.* By-products of porphyry copper and molybdenum deposits // Verplanck P.L. and Hitzman M.W. (Eds). Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Reviews In Economic Geology 18, 2016. Society of Economic Geologists. P. 137–164.
- Lang J.R., Gregory M.J.* Chapter 8: magmatic-hydrothermal-structural evolution of the giant pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit with implications for exploration in Southwest Alaska. Special Publication 16, 2012. P. 167–185.
- Li W., Zhong R., Xu C., Song B., Qu W.* U-Pb and Re-Os geochronology of the Bainaimiao Cu-Mo-Au deposit, on the northern margin of the North China Craton, Central Asia Orogenic Belt: Implications for ore genesis and geodynamic setting // Ore Geol. Rev. 2012. V. 8. P. 139–150.
- Puchkov V.N.* General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why // Ore Geol. Rev. 2017. V. 85. P. 4–29.
- Rivera S.L., Alcota H., Proffett J., Díaz J., Leiva G., Vergara M.* Update of the Geologic Setting and Porphyry Cu-Mo Deposits of the Chuquicamata District, Northern Chile. SEG Special Publication 16, 2012. P. 19–54.
- Roma Mining and Associates Limited. Bayan Khundiy gold project feasibility study, Bayankhongor province, Mongolia // NI43-101 technical report for Erdene Resource Development Corporation. 2020. 302 p.
- Seedorff E., Dilles J.H., Proffett Jr., J.M., Einaudi M.T., Zurcher L., Stavast W.J.A., Johnson D.A., Barton M.D.* Porphyry deposits – Characteristics and origin of hypogene features. Society of Economic Geologists, Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005. P. 251–298.
- Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F.* Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review // J. Asian Earth Sciences. 2014. V. 79. P. 810–841.
- Seltmann R., Shatov V., Yakubchuk A.* Mineral deposits database and thematic maps of Central Asia: London, Natural History Museum, Centre for Russian and Central Eurasian Mineral Studies (CERCAMS), 2009. 143 p.
- ArcGIS 9.2, ArcView 3.2 and MapInfo 6.0 (7.0) GIS packages, scale 1:1,500,000, CD-ROM.
- Shen P., Pan H., Seitmuratova E., Jakupova S.* U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf-O isotopic constraints on age and origin of the ore-bearing intrusions from the Nurkazgan porphyry Cu-Au deposit in Kazakhstan // J. Asian Earth Sciences. 2016. V. 116. P. 232–248.
- Sillitoe R.H.* Porphyry-copper systems // Economic Geology. 2010. V. 105. P. 3–41.
- Sillitoe R.H.* Chapter 1: Copper Provinces. SEG Special Publication 16, 2012. P. 1–18.
- Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C.* Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models, 2008. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1155, version 1.0
- Skirrow R.G.* Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification // Ore Geol. Rev. 2022. V. 140. Paper 104569.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S.* Geology, mineralization, and fluid inclusion study of the Kuru-Tegerek Au-Cu-Mo skarn deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan // Mineralium Deposita. 2018. V. 53. № 2. P. 195–223.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S., Vasyukov V.E., Shumilin D.A., Voskresensky K.I.* The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics // Ore Geol. Rev. 2019. V. 113. Paper 103112.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Avilova O.V., Andreev A.V., Girfanov M.M., Starostin I.A.* The Lazurnoe deposit in the Central Sikhote-Alin, Eastern Russia: Combined shoshonite-related porphyry Cu-Au-Mo and reduced intrusion-related Au mineralization in a post-subduction setting // Ore Geol. Rev. 2019. V. 112. Paper 103063.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Shapovalenko V.N., Collins G.S., Dvurechenskaya S.S., Bukhanova D.S., Ezhov A.I., Voskresensky K.I.* The Kirganik alkalic porphyry Cu-Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: A shoshonite-related, silica-undersaturated mineralized system in a Late Cretaceous island arc setting // Ore Geol. Rev. 2021. V.128. Paper 103893.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Semenova D.V., Kalinin Y.A., Dvurechenskaya S.S., Sidorova N.V.* Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early Paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia, Russia: Toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system // Ore Geol. Rev. 2022. V. 142. Paper 104706.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706>
- Sun Y.-G., Li B.-L., Zhao Zhong-H., Sun F.-Y., Ding Q.-F., Chen X.-S., Li J.-B., Qian Y., Li Y.-J.* Age and petrogenesis of late Mesozoic intrusions in the Huoluotai porphyry Cu-(Mo) deposit, northeast China: Implications for

- regional tectonic evolution. *Geoscience Frontiers*. 2022. V. 13. Paper 101344.
- Turner S.J., Reynolds G., Hagemann S.G.* Boddington: An Enigmatic Giant Archean Gold-Copper (Molybdenum-Silver) Deposit in the Southwest Yilgarn Craton, Western Australia. *SEG Special Publications*, no. 23, 2020. P. 275–288.
- Underwood D., Dumala M.* Beskauga copper-gold project, Pavlodar Province, Republic of Kazakhstan // Amended & Restated NI 43-101 Technical Report. Prepared for Aras Minerals Corporation. 2022. 135 p.
- Volkov A.V., Savva N.E., Sidorov A.A., Egorov V.N.* Spatial distribution and formation conditions of Au-bearing porphyry Cu-Mo deposits in the Northeast of Russia // *Geology of Ore Deposits*. 2006. V. 48. № 6. P. 448–472.
- Xanadu Mines. Kharmagtai Copper-Gold Project. Scoping Study. 2022. 59 p.
- Yakubchuk A.S., Shatov V.V., Kirwin D. et al.* Gold and base metal metallogeny of the Central Asian orogenic supercollage. *Economic Geology*. 2005. 100th Anniversary Volume. P. 1035–1068.
- Yakubchuk A., Degtyarev K., Maslennikov V., Wurst A., Stekhin A., and Lobanov K.V.* Tectonomagmatic settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian copper province. *Society of Economic Geologists Special Publication* 16, 2012. P. 403–432.
- Zhao C., Qin K., Song G., Li G., Li Z., Pang X., Wang L.* Petrogenesis and tectonic setting of ore-related porphyry in the Duobaoshan Cu deposit within the eastern Central Asian Orogenic Belt, Heilongjiang Province, NE China // *J. Asian Earth Sciences*. 2018. V. 165. P. 352–370.
- Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M.* *Geology of the USSR: a plate-tectonic synthesis*. Washington, DC, American Geophysical Union, 1990. 242 p.