УДК 553.411:552.54(571.5)
© А.И.Иванов, 2017

Роль метаморфических условий преобразования углеродистых карбонатно-терригенных отложений для формирования золотого оруденения на разных этапах коллизионной эпохи развития Байкало-Патомской металлогенической провинции

А.И.ИВАНОВ (Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Обосновано на фактическом материале проявление зонального метаморфизма углеродистых карбонатно-терригенных отложений Байкало-Патомской металлогенической провинции на каждом этапе коллизионной эпохи развития региона – линейного складкообразования, гранито-гнейсового куполообразования (регионального зонального метаморфизма) и гранитоидного магматизма. Выявлено, что рудноподготовительные (формирование золотоносных рудоконтролирующих зон железомагнезиальной карбонатизации) и рудные процессы (с концентрированием золота) протекают в *PT*-условиях «зоны хлорита». Показана необходимость учета условий метаморфических преобразований пород при прогнозировании золотого оруденения.
Ключевые слова: коллизионная эпоха, этапы метаморфизма, метаморфизм линейного складкообразования, региональный метаморфизм, сингранитный метаморфизм, зоны складчато-разрывных деформаций, флюидная проницаемость, линейные отрицательные магнитные аномалии, зоны бурошпатизации, метаморфическая зональность, золотое оруденение.

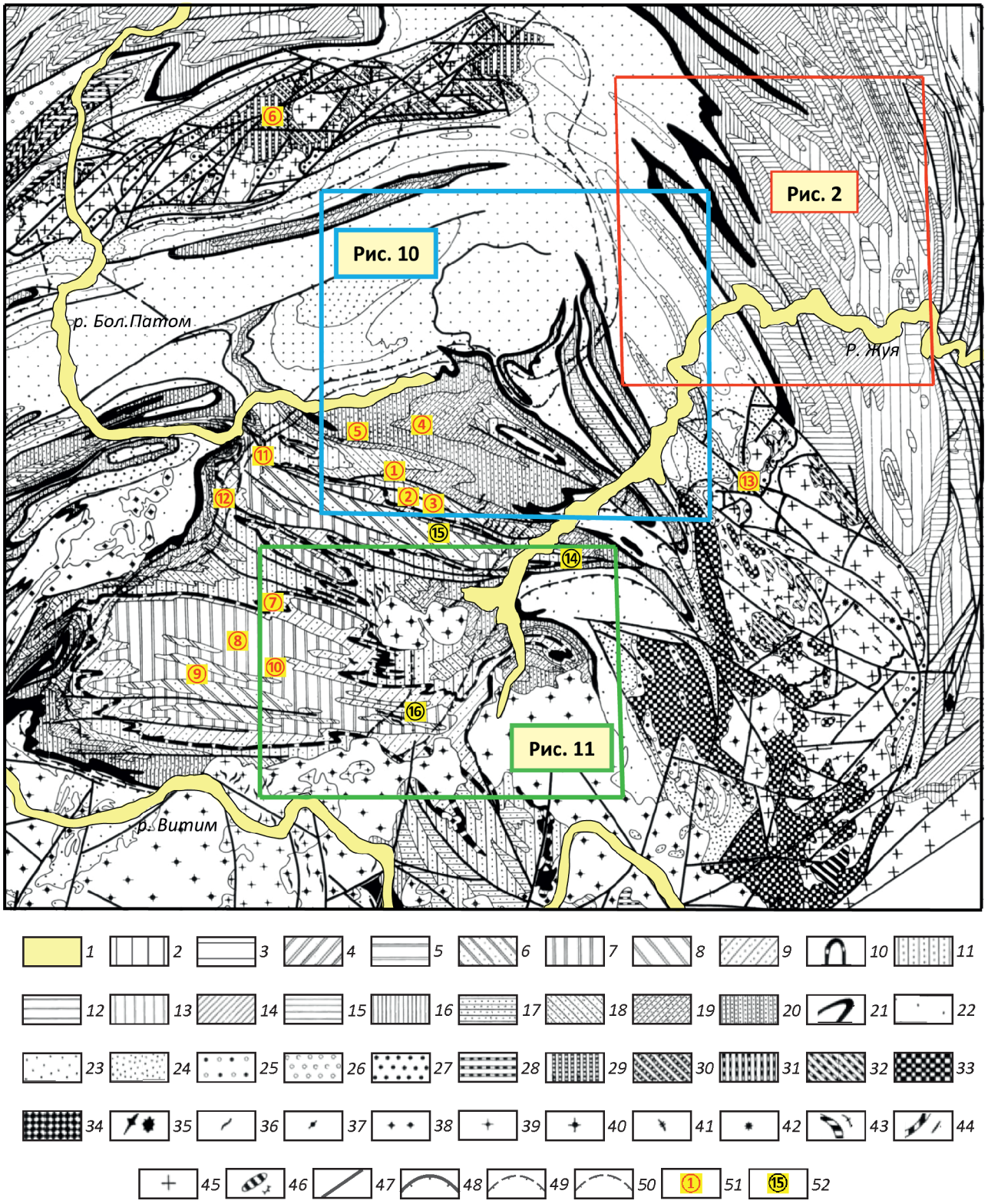
Иванов Анатолий Иннокентьевич a.ivanov@tsnigri.ru

The role played by metamorphic transformation conditions of carbonaceous carbonate-terrigene deposits for gold mineralization formation at various stages of collisional epoch of Baikal-Patom metallogenic province development

A.I.IVANOV

Factual proof is presented for zonal metamorphism of carbonaceous carbonate-terrigene deposits of Baikal-Patom metallogenic province at each stage of collisional epoch of the regions's development – linear fold formation, granite-gneiss dome formation (regional zonal metamorphism) and granitoid magmatism. It is found that premineral (formation of gold-bearing ore-controlling zones of ferromagnesial carbonatization) and mineralization processes (including gold concentration) occur in PT conditions of the «chlorite zone». It is necessary to take into account the conditions of metamorphic rock transformations in forecasting of gold mineralization.
Key words: collisional epoch, metamorphism stages, metamorphism of linear fold formation, regional metamorphism, syngranite metamorphism, zones of fold-rupture deformations, fluid permeability, linear negative magnetic anomalies, brown spathization zones, metamorphic zoning, gold mineralization.

Наибольшей золотоносностью в Байкало-Патомской металлогенической провинции (БППр) характеризуется ее северо-восточная часть, где почти 170 лет эксплуатируются россыпные месторождения золота, и к настоящему времени установлено более десяти золоторудных месторождений (рис. 1). Геологическая структура региона сформировалась в основном в течение рифейско-палеозойского тектономагматического цикла [13]: рифейско-вендские осадки, накопившиеся в окраинно-континентальных условиях на сиалическом раннепротерозойском основании, в венде–верхнем палеозое в коллизионную эпоху были преобразованы в течение трех последовательных этапов – линейной складчатости, гранито-гнейсового куполообразования и регионального метаморфизма, аллохтонного гранитообразования [13, 22, 32, 37 и др.]. С рифейско-позднепалеозойским тектономагматическим циклом связано образование большей части полезных ископаемых в пределах БППр [13].



Длительность и многоэтапность формирования геологической структуры региона сами по себе предполагают многоэтапность и метаморфических преобразований пород. Она установлена ранее рядом исследователей [13, 14, 22, 33, 34, 37], хотя общей точки зрения как на количество этапов метаморфизма, так и на его роль в формировании золотого оруденения выработано не было.

Л.И.Салоп [33] выделял два самостоятельных метаморфических этапа: к первому относил ранние мета-

Рис.1. Геологическая карта центральной части Байкало-Патомской металлогенической провинции:

отложения: *1* – четвертичные, *2–3* – кембрий: *2* – средний–верхний, 3 – нижний, *4–11* – венд: *4–5* – внешней зоны нагорья, свиты: *4* – тинновская и нохтуйская, *5* – жербинская, *6–11* – бодайбинская серия, свиты: *6* – илигирская, *7* – догалдынская, *8* – аунакитская, вачская, анангрская объединенные, *9* – анангрская, *10* – вачская, *11* – аунакитская, *12–13* – жуинская серия, свиты: *12* – ченчинская, *13* – никольская; *14–16* – дальнетайгинская серия, свиты: *14* – валюхтинская, *15* – баракунская, *16* – джемкуканская; *17–20* – ныгринская серия, свиты: *17* – хомолхинская и имняхская объединенные, *18* – имняхская, *19* – хомолхинская, *20* – бужуихтинская и угаханская объединенные; *21–24* – балаганахская серия, свиты: *21* – бодайбоканская (внутренняя зона) и мариинская (внешняя зона), *22* – бугарихтинская, *23* – хайвергинская, *24* – хорлухтахская; *25–27* – нижний рифей, свиты: *25* – пурпольская и медвежевская объединенные, *26* – медвежевская, *27* – пурпольская; *28–32* – нижне- протерозойские свиты: *28* – туюканская, *29* – михайловская, *30* – албазинская, *31* – ходоканская, *32* – илинакская свиты; *33–34* – архей: *33* – олонгдинская и *34* – чуйская свиты; *35–46– интрузивные комплексы*: *35* – алданский, *36* – кадали-бутуинский, *37* – аглан-янский, *38* – мамский и конкудеро-мамаканский объединенные; *39–40* – конкудеро-мамаканский, фазы: *39* – вторая, *40* – первая; *41* – дорогский, *42* – язовский, *43* – чайский, *44* – туюканский, *45* – чуйско-нечерский, *46* – тепраканский; *разломы*: *47* – крутопадающие, *48* – пологопадающие; *изограды*: *49* – биотита (бергштрихи направлены в сторону усиления метаморфизма), *50* – граната; *51* – золоторудные месторождения (1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Высочайшее, 5 – Угахан, 6 – Чертово Корыто, 7 – Красное, 8 – Догалдынская жила, 9 – Кавказ, 10 – Копыловское, 11 – Ожерелье, 12 – Ыканское, 13 – Ходоканское); *52* – рудопроявления в пределах рудных полей Светловского (14), Атырканского (15), Макалакского (16); показаны контуры рисунков 2, 10, 11

соматические явления – пиритизацию и железомагнезиальную карбонатизацию, во второй этап объединял процессы регионального и контактового метаморфизма. Он также выделил четыре зоны прогрессивного регионального метаморфизма: неметаморфизованных пород; начального метаморфизма; метаморфических сланцев (хлорит-серицитовая субфация фации зеленых сланцев); кристаллических сланцев (от биотитовой субфации фации зеленых сланцев до амфиболитовой фации). Л.И.Салоп считал, что граниты являются крайними продуктами ультраметаморфического процесса, а «реоморфизованные массы, поднимаясь из глубоких зон тектогена, несут с собой в высокие структурные этажи большой запас энергии, который постепенно отдают вмещающим породам, оказывая на них контактовое воздействие» [33, с. 185]. Такой метаморфизм, характеризующийся постепенными переходами его региональной и контактовой составляющих, Л.И.Салоп предложил называть «ареально-контактовым». Им впервые в регионе описаны гранитогнейсовые купола, сформированные при региональном метаморфизме и деформирующие линейные складки [36].

Л.И.Салоп рассмотрел и роль метаморфизма в формировании золоторудной минерализации, связав первичную золотоносность с генетически связанными близко-одновременными эпигенетическими гидротермальными процессами – пиритизацией и железомагнезиальной карбонатизацией терригенных пород. Он привел фактические данные о более позднем образовании порфиробластов сидерита относительно сланцеватости [33, с. 171] и их метаморфических преобразованиях при региональном зональном метаморфизме [33, с. 176]. Данные факты послужили доказательством дорегионально-метаморфического возраста золотоносных пиритизированных пород. По мнению Л.И. Салопа, при региональном зональном метаморфизме этих золотоносных пород в связи с переходом пирита в пирротин в условиях зоны биотита образуется значительное количество сульфата окиси железа, нагретый раствор которого растворял тонкодисперсное золото и мигрировал из зон высокого метаморфизма во внешние зоны метаморфического ореола, где и переотлагал уже крупное золото преимущественно в углеродистых или известковистых сланцах. Эти сланцы и становились рудными источниками крупного золота для россыпей, так как, по мнению ученого, «кварцевые жилы отсутствуют или же так редки, а золото в них находится в таком незначительном количестве, что связывать с ними широко распространенные и богатые россыпные месторождения просто невероятно» [33, с. 192]. Хотя данная гипотеза формирования рудных источников россыпей при региональном зональном метаморфизме не подтверждается современными материалами, как и не может быть поддержана точка зрения об отнесении метасоматических процессов пиритизации и железомагнезиальной карбонатизации терригенных пород к проявлениям метаморфизма, огромной заслугой Л.И.Салопа можно считать два выдвинутых им положения: формирование «первично-золотоносных» пород обусловлено проявлением генетически связанных процессов – железомагнезиальной карбонатизации и пиритизации терригенных пород; эти процессы и, соответственно, «первичная золотоносность» имеют дорегионально-метаморфический возраст.

В.А.Буряк [2–5] относил золотое оруденение района к метаморфогенно-гидротермальному типу. По его мнению, формирование структуры региона обусловлено длительно развивавшимися (со стадии седиментации) гранито-гнейсовыми куполами с областями гранитизации в центральных частях, обусловившими формирование линейной складчатости в межкупольных прогибах и проявление зонального регионального метаморфизма. Согласно точке зрения В.А.Буряка, золото мобилизовывалось из пород при гранитизации

с накоплением в палингенном расплаве, из которого с метаморфогенными гидротермами мигрировало из зон высокого метаморфизма в зону их разгрузки – зеленосланцевую фацию. Вместе с золотом выносились сера, мышьяк, уран, углекислота, вода, что обусловливало интенсивный магнезиально-железистый карбонатный метасоматоз и сульфидообразование. Осаждение золота происходило в структурных ловушках (с учетом литолого-стратиграфических факторов). В.А.Буряк считал, что гранитоиды орогенного («батолитового») этапа были пострудными. Как будет показано ниже, данная точка зрения не соответствует полученным в последние десятилетия фактическим данным.

В результате многолетних исследований геологи ЦНИГРИ под руководством Ю.П.Казакевич [22] выделили пять последовательных этапов метаморфических преобразований: ранний метаморфизм; проявление углекислого и сернистого метасоматоза (бурошпатизация и сульфидизация); метаморфизм с образованием кристаллических сланцев вплоть до формирования гранит-пегматитов; диафторические преобразования кристаллических сланцев и контактовый метаморфизм в связи с формированием гранитных массивов тельмамского и конкудеро-мамаканского комплексов. К раннему метаморфизму ими отнесено формирование хлорита и мусковита на додеформационной стадии (по-видимому, предполагался метаморфизм «погружения» еще в стадии преобразования осадка). Вслед за Л.И.Салопом геологами ЦНИГРИ к метаморфическим процессам были отнесены железомагнезиальная карбонатизация и сульфидизация, предшествовавшие формированию кристаллических сланцев (собственно региональному зональному метаморфизму). В качестве самостоятельного четвертого этапа выделен диафторический, заключающийся в низкотемпературных преобразованиях высокометаморфизованных пород и установленный на локальных участках. Пятый этап контактового метаморфизма с формированием роговиков проявился в экзоконтактах гранитных интрузий, прорывающих слабометаморфизованные породы (Константиновский и Джекдокарский массивы). С углекислым метасоматозом связывалось формирование незолотоносных кварцевых жил, а интенсивное золотое оруденение связывали с посторогенным этапом развития региона и гранитоидами конкудеро-мамаканского (тельмамского) комплекса. При этом к нему относили в основном гранитоиды зон слабого метаморфизма, в результате чего перспективными на выявление золоторудных месторождений также считались только области развития слабометаморфизованных пород. Этими исследователями в целом верно намечена последовательность процессов, хотя отнесение метасоматических процессов пиритизации и железомагнезиальной карбонатизации терригенных пород к проявлениям метаморфизма представляется некорректным.

В 1970–1980-х гг. на территории региона проводились интенсивные планомерные геолого-съемочные, тематические и поисковые работы, обобщение и анализ материалов которых позволили уточнить вышеприведенные представления предшествующих исследований по этапности формирования геологической структуры от эпохи осадконакопления до коллизионной эпохи, включающей этапы линейной складчатости, гранито-гнейсового куполообразования и регионального метаморфизма, «батолитового» гранитообразования [13–17, 20, 32, 38 и др]. Этими исследованиями также обоснована полигенность и полихронность золотого оруденения.

Автором настоящей статьи при изучении истории формирования геологической структуры региона выделено три этапа проявления метаморфизма: синхронный линейной складчатости, региональный (гранито-гнейсового куполообразования) и синтектонический (завершающего этапа формирования месторождений золота) [13–17]. Проявление «раннего метаморфизма», как отмечала Ю.П.Казакевич [22], хотя и соответствует мнению ряда исследователей [24], что метаморфические преобразования углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных осадков начинаются еще в стадию осадконакопления при их погружении на глубины свыше 7 км (при температуре более 190°С), фактическим материалом не обосновываются в связи с проявлением более позднего и более интенсивного метаморфизма коллизионной эпохи развития складчатой области.

Метаморфизм, синхронный линейной складчатости, восстанавливается по участию метаморфических минералов в образовании кливажа осевой поверхности линейных складок, который обусловлен субпараллельной ориентировкой чешуек пластинчатых минералов – хлорита, мусковита, серицита и др. [9, 13–15, 18, 29, 30 и др.]. Соответственно, ***минеральный парагенезис, формирующий кливаж осевой поверхности, фиксирует РТ-условия этого этапа***.

В северо-восточной части региона (рис. 2, А) по мере приближения в восточном направлении к окраине складчатой области (и, соответственно, к Сибирской платформе) сквозной (то есть развитый во всех литологических разностях пород) кливаж осевой поверхности линейных складок сменяется селективным кливажем (рис. 3), сформировавшимся только в глинистых породах [13–15]. При этом меняется и состав минералов, образующих кливажную анизотропию – хлорит и мусковит сменяется хлорит-гидрослюдистым агрегатом.

Первая ассоциация соответствует низкотемпературной части («зона хлорита») зеленосланцевой фации, вторая – пренит-пумпеллиитовой фации, характеризующейся, по В.А.Глебовицкому и др. [8], распространением метатерригенных аспидных (хлорит-гидрослюдистых) сланцев. Одновременно, как видно на рис. 2, Б, изменяются и магнитные свойства пород на уровне земной поверхности: область развития хлорит-мусковитового парагенезиса характеризуется развитием



Рис. 2. Геологическая карта (А) и карта магнитного поля ΔТ (Б) северо-восточной части Байкало-Патомской металлогенической провинции:

1 – отрицательные аномалии поля ΔТ; *2* – положительные аномалии поля ΔТ; *3* – граница на уровне денудационного среза зон развития хлорит-мусковитового (с моноклинным магнитным пирротином) и хлорит-гидрослюдистого (с гексагональным немагнитным пирротином?) минеральных парагенезисов, формирующих кливаж осевой поверхности линейных складок; показаны места фотографий для рис. 3; остальные услов. обозн. см. на рис. 1

линейных субсогласных простиранию пород отрицательных аномалий магнитного поля, тогда как область развития хлорит-гидрослюдистого парагенезиса – спокойным недифференцированным магнитным полем. Граница магнитных полей в общем совпадает с достаточно резким «уступом» зеркала линейных складок амплитудой более 2 км [15], то есть наряду с тенденцией уменьшения степени синскладчатого метаморфизма по направлению к платформе очевидно относительно резкое снижение уровня синскладчатого метаморфизма в породах на уровне земной поверхности за счет увеличения глубины залегания раннепротерозойского фундамента и, соответственно, вскрытия на уровне денудационного среза более молодых и менее метаморфизованных отложений.

Отрицательные аномалии магнитного поля локализуются чаще в зонах разломов (зоны складчато-разрывных деформаций – ЗСРД), характеризующихся повышенной деформированностью пород и представляющих собой зоны синскладчатого рассланцевания и, как следствие, зоны повышенной флюидной проницаемости.

Как показали исследования автора и его коллег в районе золоторудного месторождения Сухой Лог (рис. 4, скв. 17) и других частях БППр [13, 16], в пределах площадей развития пород, метаморфизованных в *PT*-условиях «зоны хлорита» зеленосланцевой фации, на участках со слабо дифференцированным магнитным полем формируется сквозной кливаж осевой поверхности, образованный параллельной ориентировкой пластинок хлорита, мусковита, а также уплощенных (деформированных) в процессе складкообразования зерен кварца (рис. 5).

Изучение керна скважин, пробуренных в пределах линейных отрицательных магнитных аномалий (см. рис. 4, скв. 306) показало, что они приурочены к интенсивно деформированным породам в зонах складчато-разрывных деформаций (рассланцевания), сформированных в процессе линейного складкообразования [13]. Здесь в «плоскости» кливажа осевой поверхности («усиленного» за счет позднескладчатой активизации в зонах рассланцевания) сформировались пластинчатые порфиробласты моноклинного магнитного пирротина (рис. 6, А–Б). Именно одинаковая ориентировка пластинок пирротина и их однотипная намагниченность объясняет природу отрицательных линейных аномалий магнитного поля. При изучении минерального состава пород в скважине 306 в шлифах установлено, что кливаж осевой поверхности образован мусковитом и биотитом, в плоскости которого сформированы линзовидные порфиробласты пирротина (см. рис. 6, В). Таким образом, отрицательные аномалии магнитного поля фиксируют синскладчатые зоны рассланцевания, характеризующиеся более высокими, относительно окружающих территорий («зона хлорита»), температурами флюидов (условия «зоны биотита» зеленосланцевой фации) в связи с их повышенной флюидопро-

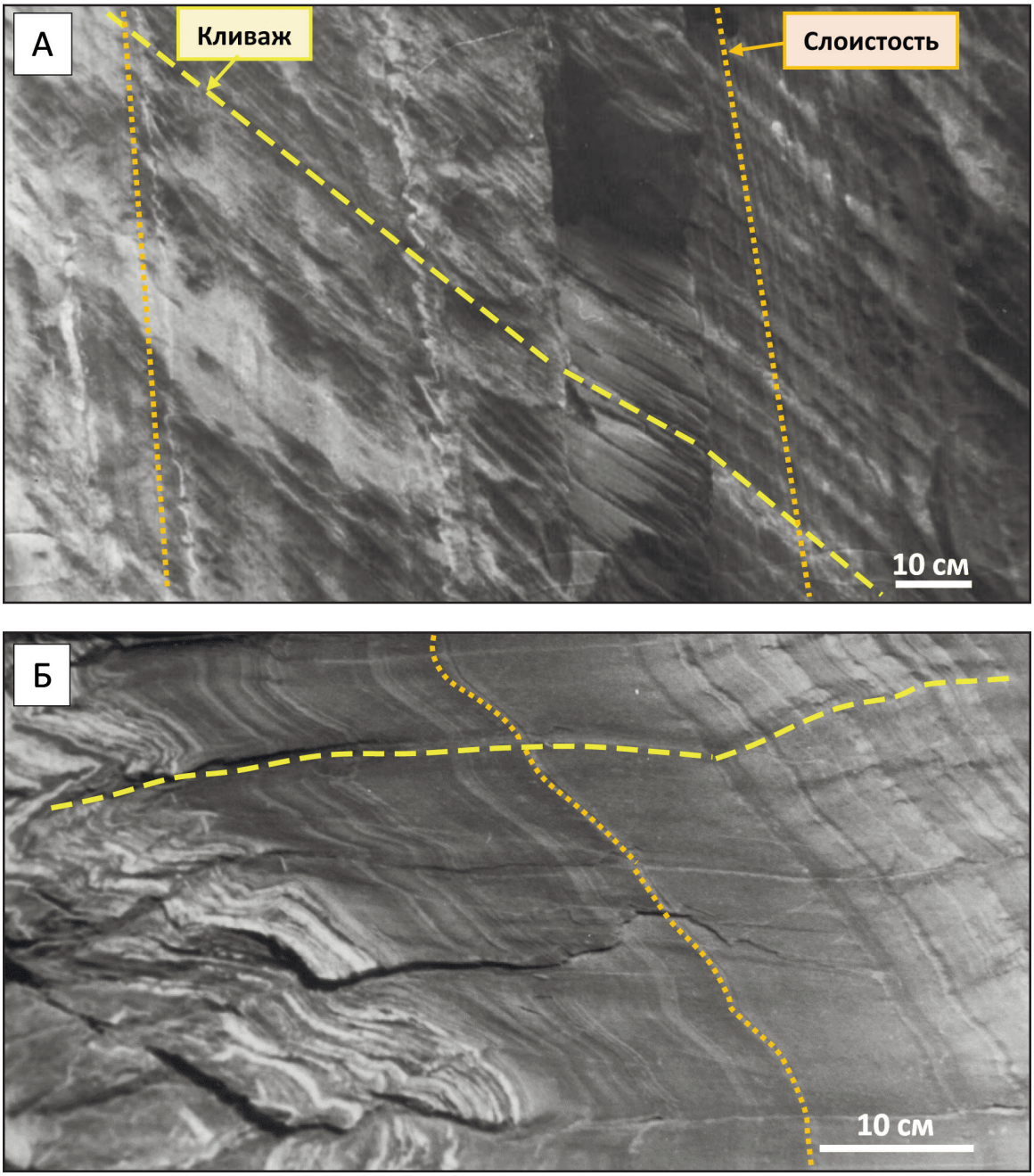


Рис. 3. Характер проявления кливажа осевой поверхности линейных складок, сформированного в условиях пренит-пумпеллиитовой фации синскладчатого метаморфизма субпараллельной ориентировкой чешуек хлорита, гидрослюд:

А – сквозной кливаж в тонкопереслаивающихся глинистых сланцах и алевросланцах валюхтинской свиты; видно преломление (рефракция) кливажа в разных слойках и сложная мелкая складчатость изгиба без формирования кливажа относительно «жесткого» слойка алевропесчаника (селективный кливаж); Б – селективный кливаж в пласте переслаивания известняков (светлые слойки), мергелей и известковистых глинистых сланцев; видна дискретность его проявления в относительно более «жестких» слойках и рефракция

ницаемостью [23 и др.]. Это обстоятельство объясняет формирование пирротин-мусковит-биотитового парагенезиса, формирующего кливажную анизотропию (рис. 6, В). Таким образом, метаморфизм, синхронный линейной складчатости, в центральных частях региона достигал уровня «зоны биотита» зеленосланцевой фации и в целом был зональным. Эта зональность во многом контролировалась температурой синскладча-

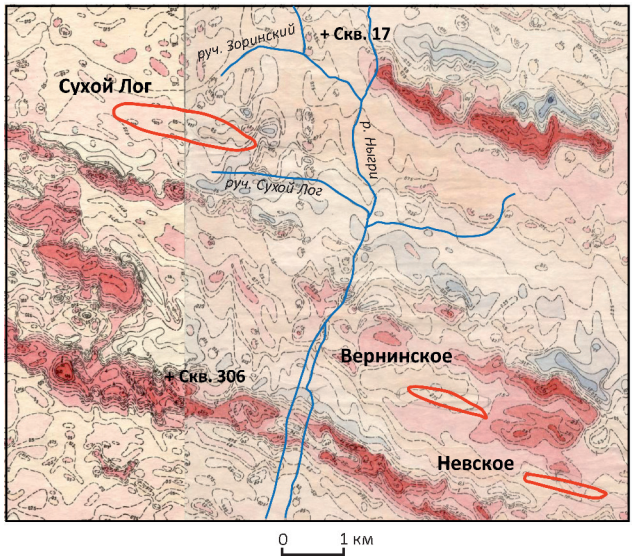


Рис. 4. Положение золоторудных месторождений Сухой Лог, Вернинское и Невское на карте магнитного поля:

красным цветом обведены контуры рудных зон на уровне земной поверхности; показано расположение скважин для рисунков 5 и 6; остальные услов. обозн. см. на рис. 2

тых флюидных систем, и изограда биотита «затекала» вверх по разрезу по наиболее флюидопроницаемым зонам рассланцевания.

Количество пирротина в породах обычно не превышает 3–5%. Источником вещества для пластинок моноклинного пирротина могло быть как привнесенное глубинными флюидами, так и сингенетичное сульфидное вещество, достаточно широкое распространение которого в регионе установлено автором ранее. В породах оно представлено как пиритовыми, так и пирротиновыми сингенетичными прослоями, участвующими в строении седиментационных текстур – оползневых складок, косой слоистости и др. [17, с. 133–137]. На месторождении Угахан (см. рис. 1), рудные зоны которого локализованы в «нормальном» крыле запрокинутой антиклинали третьего порядка, в рудовмещающей песчано-сланцевой флишоидной толще широко распространены сингенетичные пирротиновые слойки, наблюдаемые в обоих крыльях складки. К запрокинутому крылу антиклинали приурочена интенсивная отрицательная аномалия магнитного поля, к «нормальному» крылу – слабо дифференцированное магнитное поле низкой интенсивности. В процессе складчатости сингенетичные пирротиновые прослои часто деформировались в мелкие складки, разлинзовывались в плоскости кливажа осевой поверхности аналогично в обоих крыльях и ядерной части антиклинали. В запрокинутом ее крыле в пределах отрицательной аномалии магнитного поля (скважины 13, 14) линзовидный пирротин в плоскости кливажа (см. рис. 6) не наблюдается, установлены только разлинзованные и перекристаллизованные прослои сингенетичного пирротина с ориентировкой линз и новообразованных (перекристаллизованных) линзовидных зерен по кливажу (рис. 7). При этом, как и в скв. 306, в формировании кливажной анизотропии наряду с хлоритом и мусковитом участвует биотит, количество которого возрастает в скважинах с глубиной по мере приближения к центральной части отрицательной магнитной аномалии. Это, по-видимому, свидетельствует о частичном (?) переходе «первичного» гексагонального пирротина в моноклинный (как известно, они могут сосуществовать даже в одном зерне [11, 35 и др.]) в процессе линейного складкообразования в запрокинутом крыле в условиях «зоны биотита» и «сохранении» гексагонального в «нормальном» крыле антиклинали в условиях «зоны хлорита».

Как известно [1, 10, 11, 25, 36 и др.], переход гексагонального пирротина, являющегося антиферромагнетиком, в моноклинный (ферромагнетик) осуществляется при повышении температуры до 220°–260°, которая соответствует нижней температурной границе зеленосланцевой фации (по данным разных авторов от 250° до 300°) – существованию хлорит-мусковитового (с биотитом) парагенезиса, формирующего вместе с пластинками пирротина кливаж осевой поверхности (см. рис. 3). С этих позиций становится понятным, что в зонах рассланцевания с синскладчатой минерализацией моноклинного пирротина (в том числе за счет дополнительного привноса серы?) температура флюидов при его формировании была относительно более высокой по сравнению с участками, где сохранился и(или) сформировался гексагональный пирротин.

Необходимо отметить, что формирование моноклинного пирротина возможно не только при его переходе из гексагонального, но и в результате метаморфического преобразования пирита в пирротин вблизи биотитовой изограды регионального метаморфизма (при температуре более 275°С), как это установлено в Яно-Колымском золотоносном поясе [6, 7], Енисейском кряже [19] и ранее – в пределах Байкало-Патомской металлогенической провинции [33]. Учитывая, что в рассматриваемом регионе в различных стратиграфических подразделениях установлена сингенетичная пиритовая минерализация [17, рисунки 58–60], вероятен вариант формирования моноклинного пирротина, в том числе в результате преобразования (и перераспределения) такого пирита.

В пределах зон линейных отрицательных аномалий магнитного поля, сформированных при линейной складчатости, не установлены золоторудные месторождения (см. рис. 6) и сколько-нибудь значимая золотоносность пирротинсодержащих пород и связанных с ними кварцево-жильных образований. По-видимому, это объясняется тем, что относительно повышенная температура («зона биотита») в зонах рассланцевания

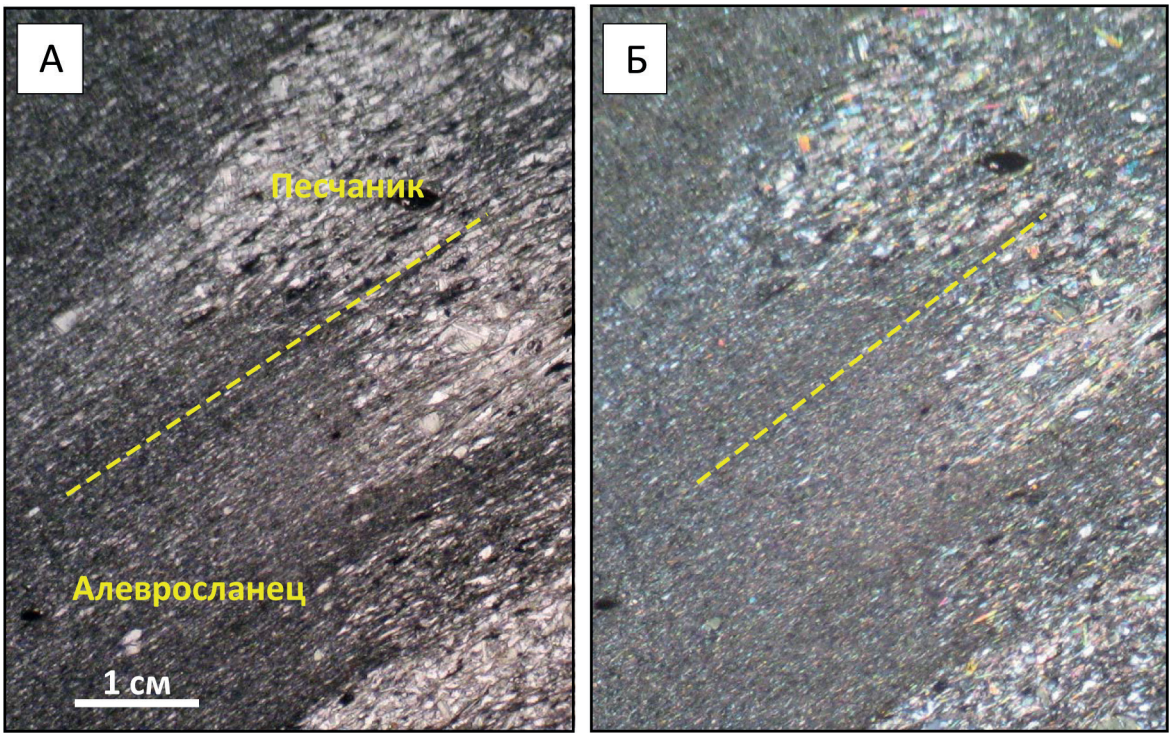


Рис. 5. Кливаж осевой поверхности (его ориентировка – желтый пунктир), сформированный субпараллельной ориентировкой чешуек хлорита, мусковита, уплощенных зерен кварца в переслаивающихся алевросланцах и песчаниках имняхской свиты:

фото шлифов из скв. 17 на рис. 4: А – николи II, Б – николи +); видна сложноскладчатая деформация слоистости по кливажу

при формировании моноклинного пирротина неблагоприятна для локализации золота.

В завершающую стадию линейного складкообразования кроме зон складчато-разрывных деформаций с моноклинным пирротином формировались зоны складчато-разрывных деформаций (рассланцевания) с проявлением золотоносной порфиробластической железомагнезиальной карбонатизации (бурошпатизации по В.А.Обручеву и А.П.Герасимову [12, 26–28]). Порфибласты формировались в *PT*-условиях «зоны хлорита» [16 и др.] – они накладываются на кливажную анизотропию, сформированную субпараллельной ориентировкой хлорита и мусковита (рис. 8). Поэтому очевидно, что железомагнезиальная карбонатизация в какой-то степени является более поздней и относительно формирования моноклинного пирротина и биотита, участвующих в формировании кливажной анизотропии, и, соответственно, линейных отрицательных аномалий магнитного поля. В то же время существуют отчетливые эмпирические закономерности взаимосвязи зон бурошпатизации и зон с моноклинным пирротином: во-первых, в пределах зон рассланцевания, трассирующихся линейными контрастными отрицательными аномалиями магнитного поля (с моноклинным пирротином и биотитом) не установлена порфиробластическая железомагнезиальная карбонатизация (бурошпатизация), и они характеризуются отсутствием каких-либо признаков золотоносности; во-вторых, бурошпатизация проявлена в пределах конкретных зон рассланцевания, расположенных в общем случае параллельно отрицательным аномалиям магнитного поля с образованием зон бурошпатизации (объем порфиробластов бурых шпатов в терригенных породах «стандартно» составляет 15–30%, достигая 40–50%). Эти зоны трассируются вторичными ореолами рассеяния золота и мышьяка, то есть являются золотоносными (рис. 9) [17, с. 172–173 и др.]. Золоторудные месторождения установлены только в пределах таких зон бурошпатизации с проявлением синскладчатого зеленосланцевого метаморфизма «зоны хлорита», которым свойственно слабо дифференцированное магнитное поле низкой интенсивности (см. рис. 4).

Приведенные факты позволяют сделать вывод о том, что зоны рассланцевания с развитием моноклинного пирротина и зоны бурошпатизации формировались близко-одновременно при различных температурах флюидных систем (более высокая температура в зонах с моноклинным пирротином и биотитом) и, по-видимому, при их различном составе. Это обусловило

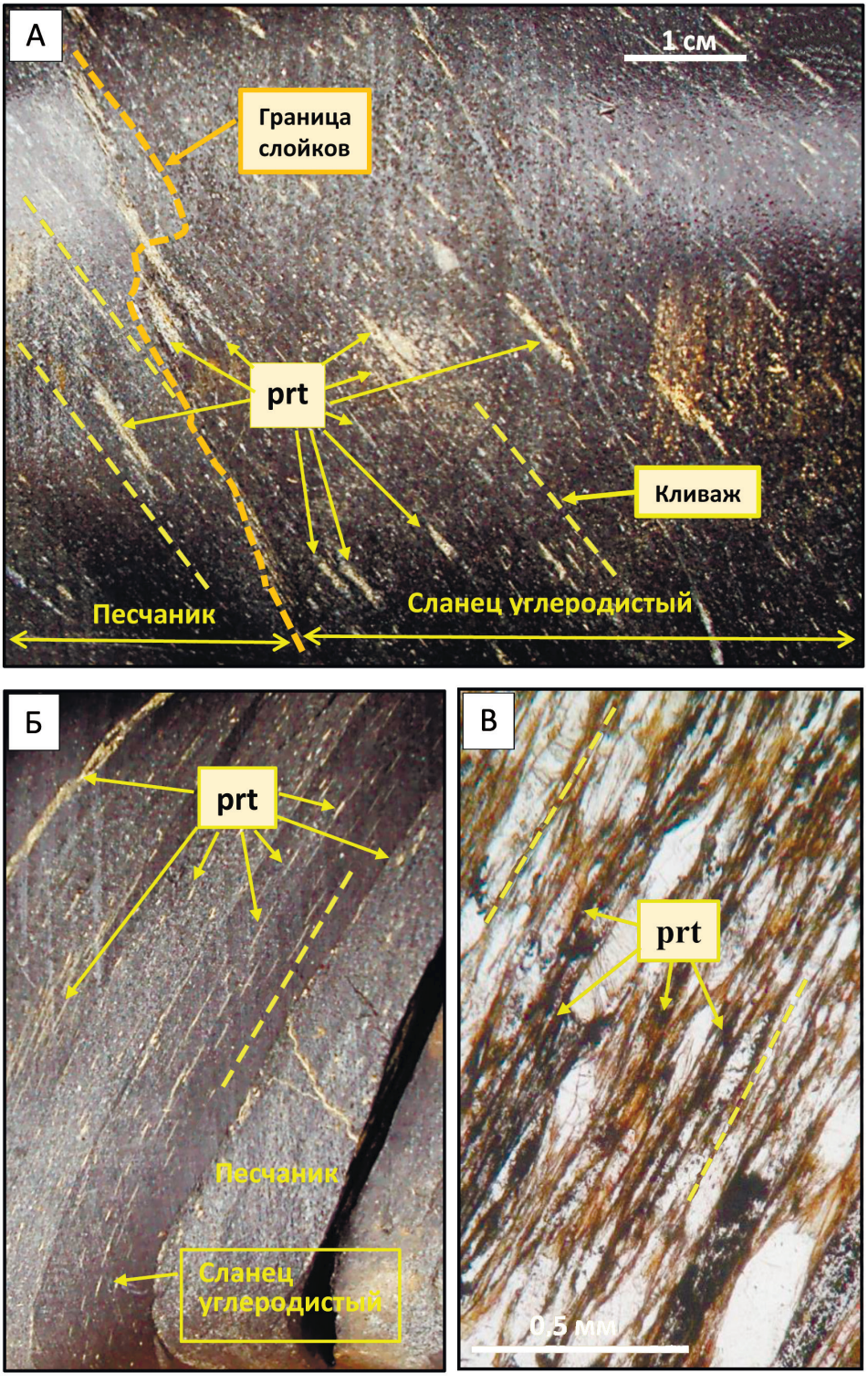


Рис. 6. Фотографии: А, Б – керна (скв. 306) – выделение линзовидного моноклинного (магнитного) пирротина (prt – светло-желтый) при линейном складкообразовании в переслаивающихся углеродистых сланцах и песчаниках в *PT*-условиях «зоны хлорита» и В – шлифа (скв. 306):

А – в плоскости кливажа осевой поверхности (видна мелкоскладчатая деформация слоистости по кливажу), Б – в плоскостях кливажа осевой поверхности и послойного кливажа; В – видно формирование кливажа субпараллельной ориентировкой чешуй биотита (бурый), мусковита, хлорита, линзочек пирротина (**prt** – черные) и уплощенными (деформированными при кливажеобразовании) зернами кварца и полевых шпатов (светлые) в метапесчанике; николи II

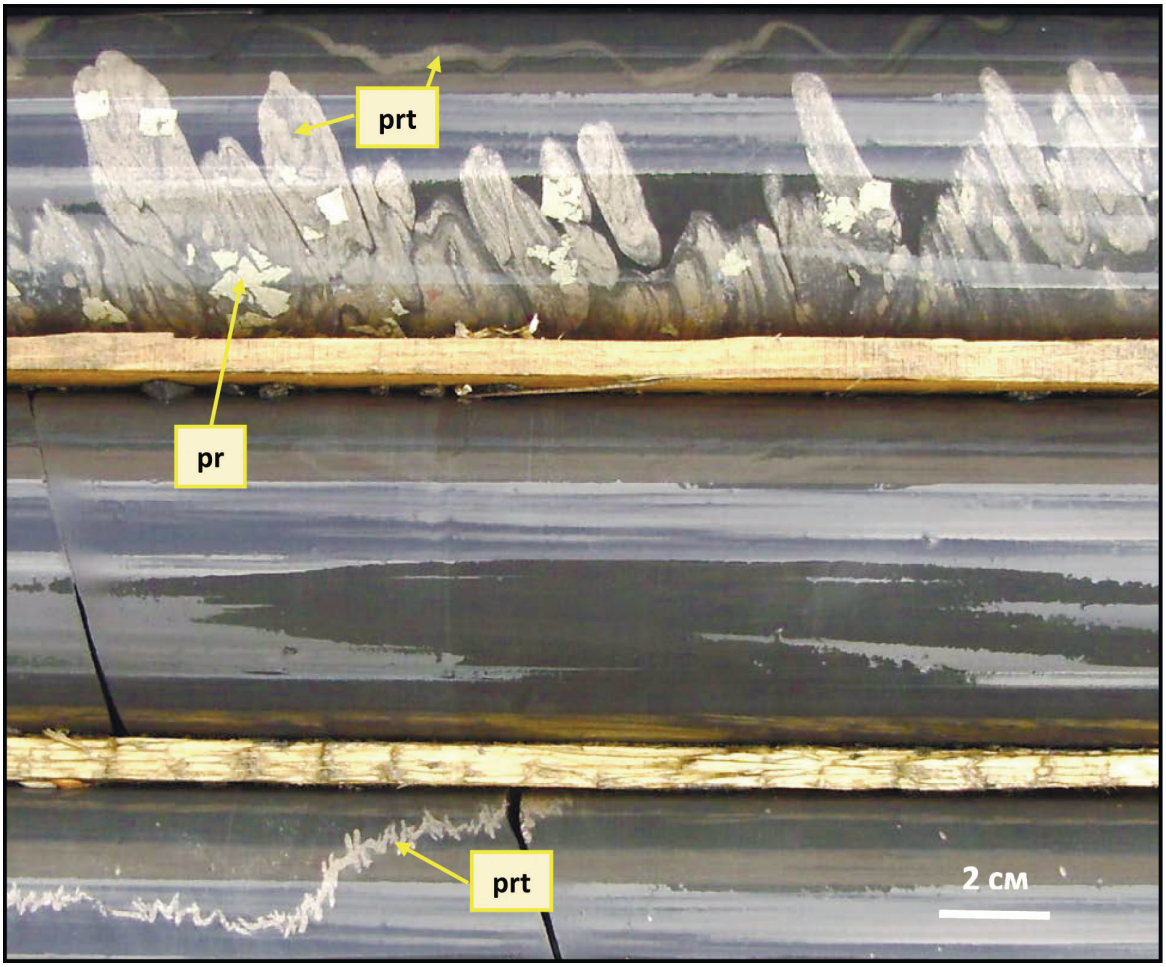


Рис. 7. Деформация и тектоническое разлинзование при линейном складкообразовании сингенетичных пирротиновых слойков в углеродистых кварц-хлорит-мусковитовых алевросланцах с одновременной перекристаллизацией пирротина (prt) и с ориентировкой его зерен в плоскости кливажа:

в нижней части фотографии видно формирование уплощенных зерен пирротина в плоскости кливажа; видно более позднее формирование порфиробластов пирита (**pr**); месторождение Угахан, скв. 13

золотоносность зон бурошпатизации (зон С-флюидного метасоматоза по Ф.А.Летникову [23]) и отсутствие признаков золотоносности зон рассланцевания с развитием моноклинного пирротина и биотита.

Зоны бурошпатизации не установлены и на территориях, где линейные складки формировались в относительно низкотемпературных условиях пренит-пумпеллиитовой фации и, соответственно, не формировался синкливажный моноклинный пирротин (им свойственно недифференцированное магнитное поле) (см. рис. 2). В их пределах отсутствуют россыпи золота и какие-либо поисковые признаки проявления золоторудной минерализации, что свидетельствует о формировании золотоносных зон бурошпатизации при линейном складкообразовании в довольно узком диапазоне *PT*-условий, соответствующем «зоне хлорита».

Таким образом, потенциально перспективная на выявление месторождений рудного золота территория определяется положением в пространстве линейно-складчатых комплексов с появлением синскладчатого метаморфизма «зоны хлорита» (кливаж осевой поверхности складок сформирован субпараллельной ориентировкой хлорита и мусковита), где в зонах складчато-разрывных деформаций (рассланцевания) могла проявляться золотоносная железомагнезиальная карбонатизация (бурошпатизация).

Региональный прогрессивный полифациальный метаморфизм (от «зоны хлорита» зеленосланцевой фации до амфиболитовой) проявился позднее линейной складчатости, что обусловило секущее положение изоград кианита, граната и биотита к простиранию пород и деформацию линейных складок

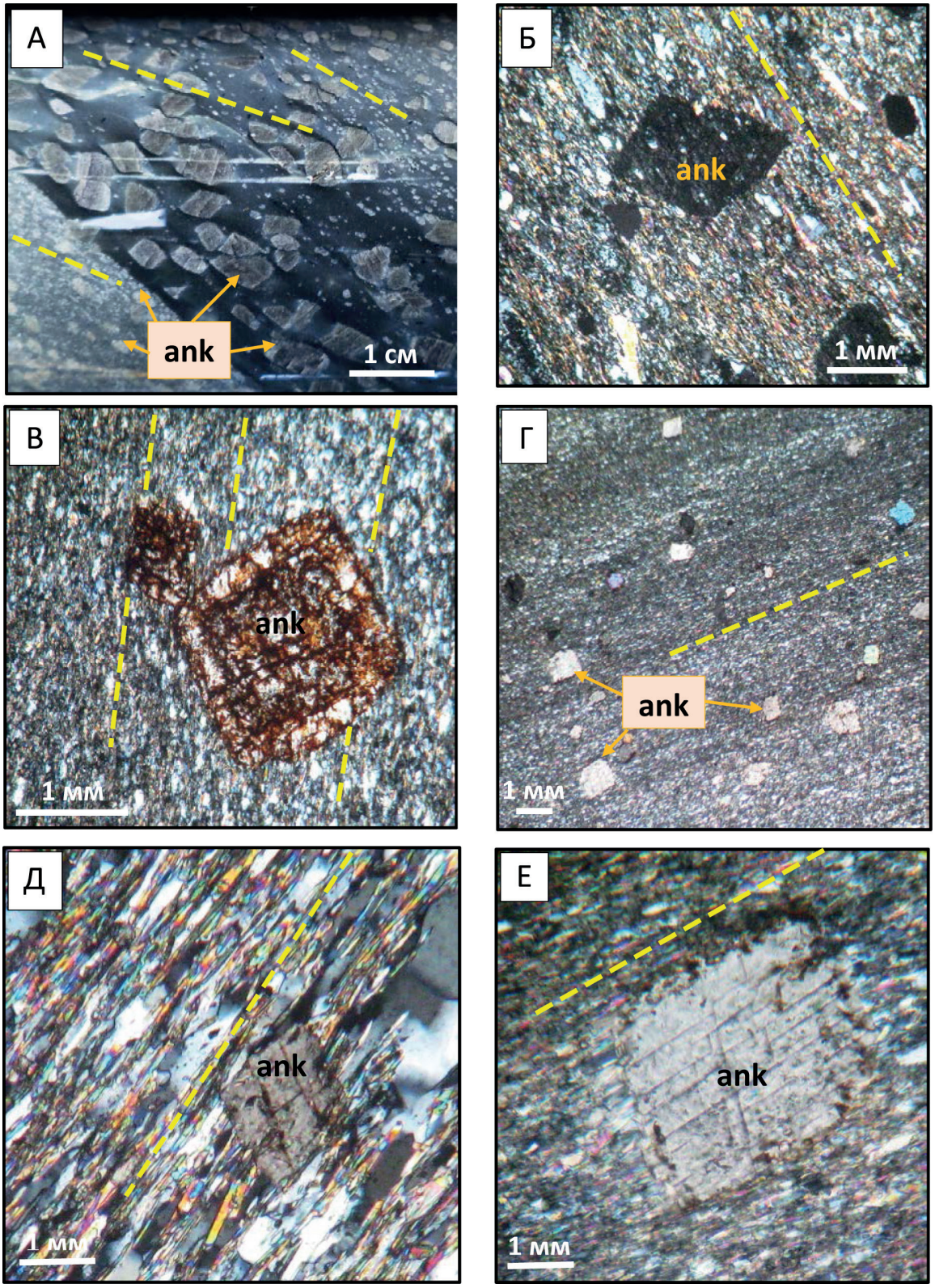


Рис. 8. Порфиробласты (ромбоэдры) анкерита (ank), сформировавшиеся после кливажа осевой поверхности, образованного субпараллельной ориентировкой чешуек хлорита и мусковита (его ориентировка – желтый пунктир):

А – фото керна скв. 61 (Макалакское рудное поле, см. рис. 1); Б – фото шлифа из скв. 14 (месторождение Угахан, см. рис. 1); В–Е – фото шлифов (николи +) из скв. 17 (Сухоложское рудное поле, см. рисунки 1 и 4)

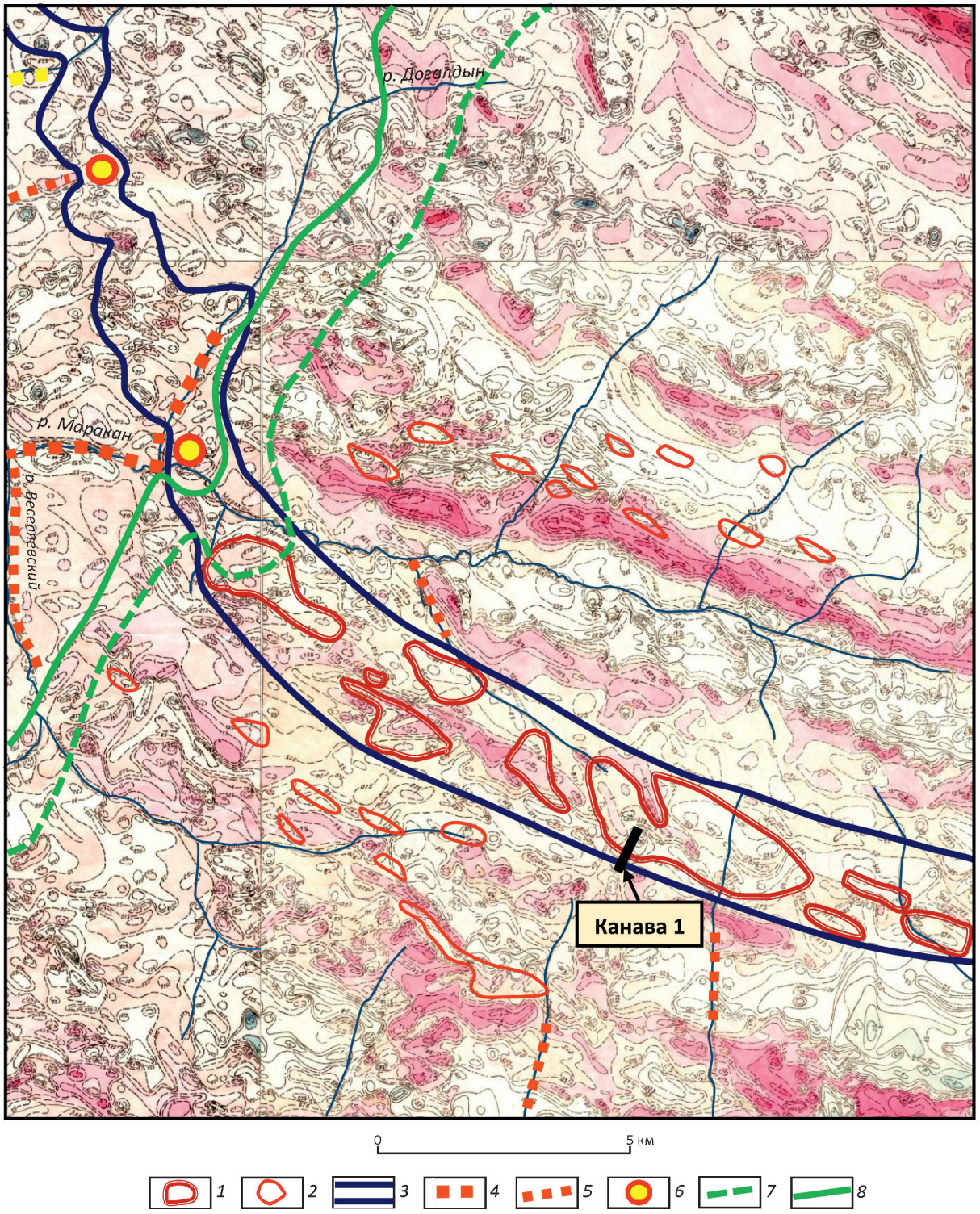


Рис. 9. Карта золотоносности, совмещенная с картой магнитного поля бассейна р. Маракан:

1 – высококонтрастные комплексные вторичные ореолы рассеяния золота (до 0,1–3 г/т) и мышьяка (до 0,01–0,05%); *2* – вторичные ореолы рассеяния золота (до 0,01–0,1 г/т); *3* – Ровнинская рудоконтролирующая зона складчато-разрывных деформаций (рассланцевания) и бурошпатизации; *4–5* – промышленные россыпи золота: *4* – высокопродуктивные, *5* – прочие; *6* – рудные зоны месторождения Ожерелье; *7–8* – изограды регионального метаморфизма: *7* – биотита, *8* – граната; остальные услов. обозн. см. на рис. 2

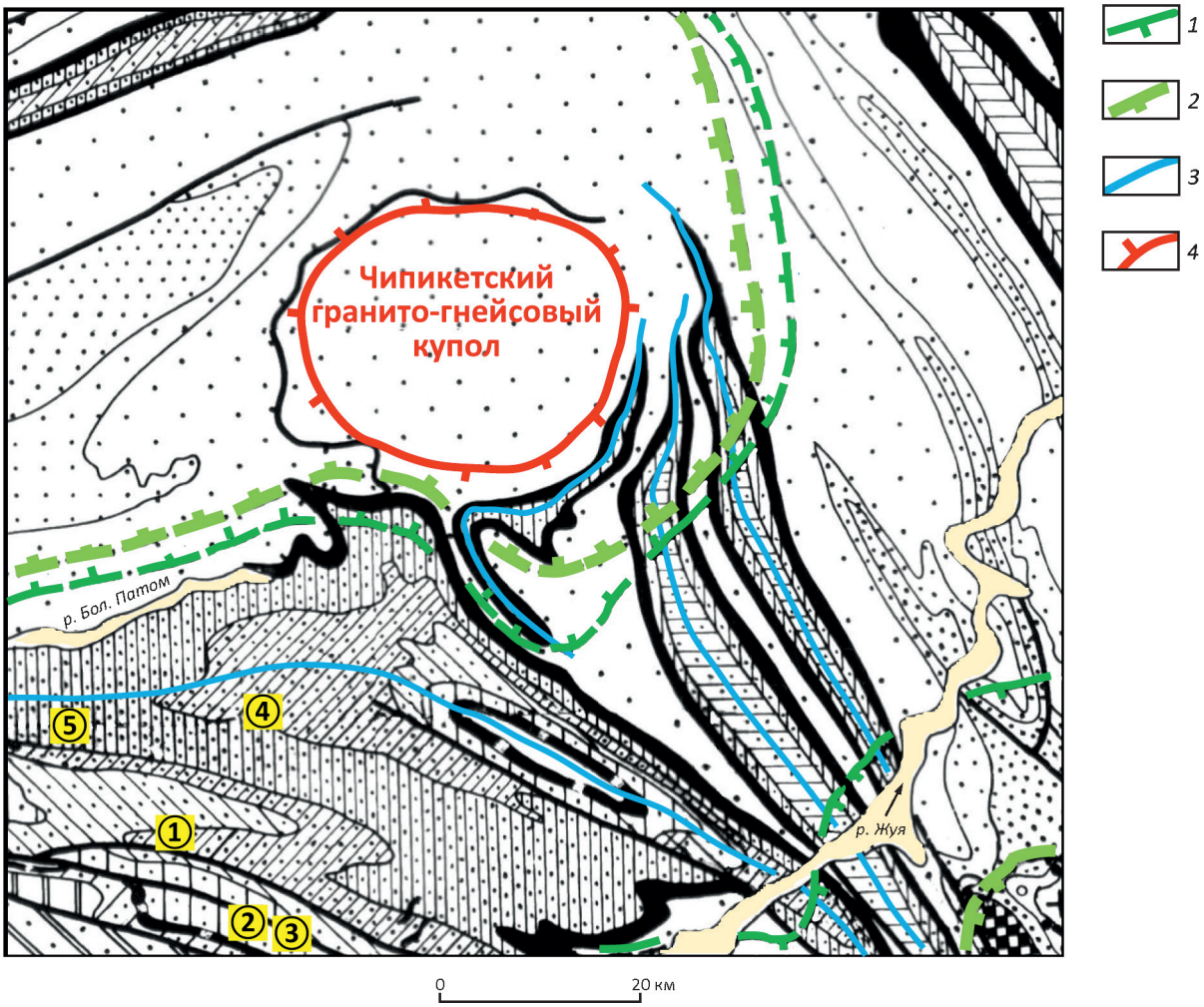


Рис. 10. Геологическая карта верховий р. Большой Патом:

деформация линейных складок Чипикетским гранито-гнейсовым куполом: *1–2* – изограды регионального метаморфизма: *1* – биотита, *2* – граната; *3* – оси основных синклиналей; *4* – контур центральной части гранито-гнейсового купола; остальные услов. обозн. см. на рисунках 1 и 2

гранитогнейсовыми куполами (рисунки 10, 11). Образующиеся в этот этап метаморфические порфиробластические минералы секут ранее сформированные кливажи осевой поверхности линейных складок (рис. 12, А) и порфиробласты бурого шпата (см. рис. 12, Б). На территориях, где региональный метаморфизм в целом соответствовал «зоне хлорита» зеленосланцевой фации, активизация в этот этап ранее сформированных зон рассланцевания в связи с их повышенной флюидопроницаемостью [23] осуществлялась в относительно более высокотемпературных условиях, что приводило к формированию в их пределах относительно более высокотемпературных минералов (биотита на фоне «зоны хлорита») (см. рис. 12, В). В связи с этим изограда биотита «клиньями» вдается в слабометаморфизованные породы (см. рис. 9). Температурные условия, при которых в региональ-но-метаморфический этап начиналось формирование биотита, соответствовали «точке Кюри» для моноклинного пирротина (температура потери ферромагнитных свойств – 325°С) в связи с его переходом снова в гексагональную модификацию [11]. Поэтому на изограде биотита происходит исчезновение линейных отрицательных магнитных аномалий (см. рисунки 9, 11). Этот факт дополнительно подчеркивает более позднее проявление регионального метаморфизма относительно линейной складчатости.

Значительные минеральные преобразования пород в этот этап происходили за изоградой биотита. Наряду с появлением различных метаморфических минералов

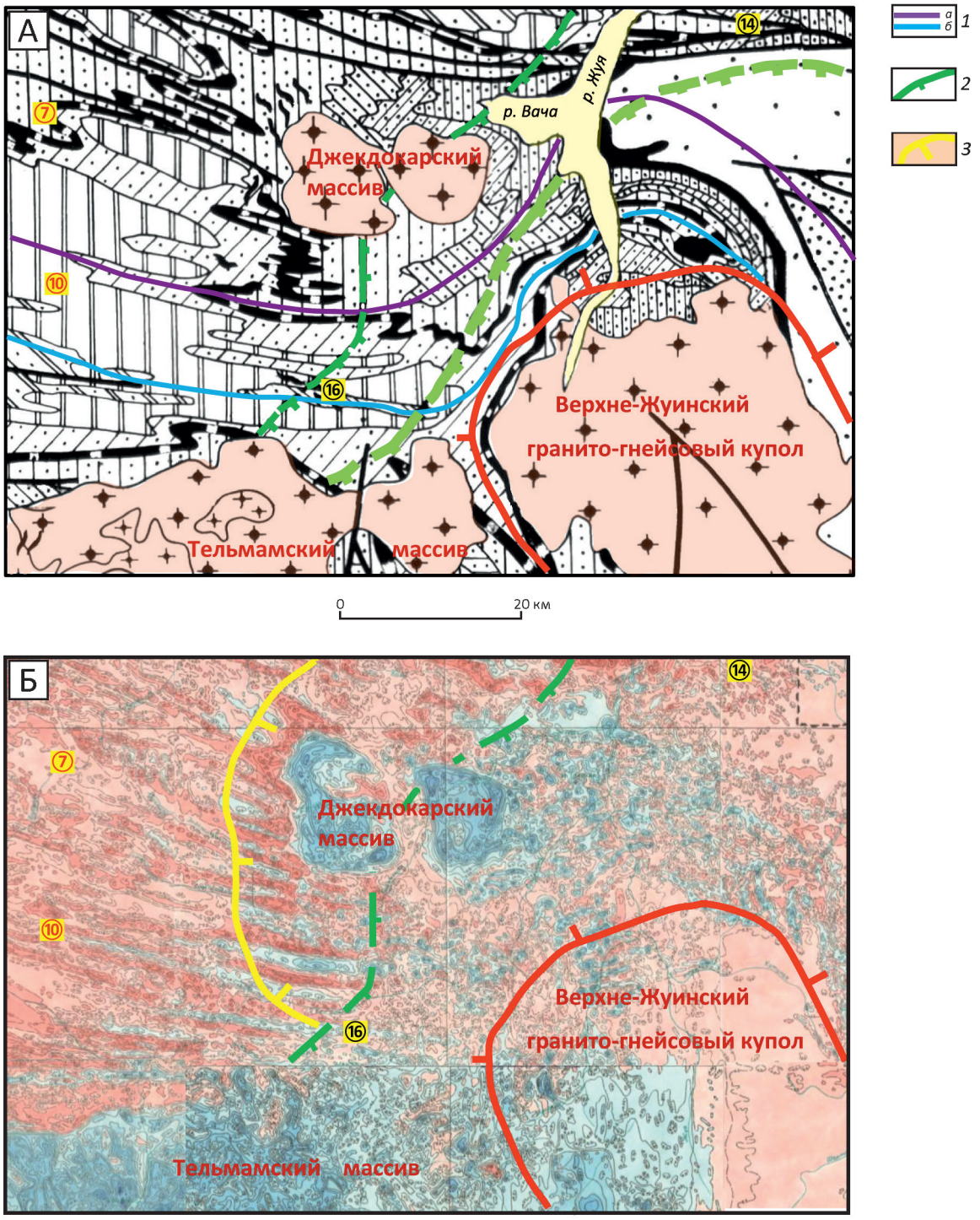


Рис. 11. Геологическая карта (А) и карта магнитного поля ΔТ (Б) центральной части Байкало-Патомской металлогенической провинции:

А – деформация линейных складок Верхне-Жуинским гранито-гнейсовым куполом и прорывание складчатых комплексов послерегионально-метаморфическими гранитоидами (Джекдокарский и Тельмамский массивы); Б – преобразование магнитного поля на изограде биотита с «исчезновением» линейных отрицательных аномалий за счет потери ферромагнитных свойств пирротином в «точке Кюри» и усиление интенсивности отрицательных аномалий в термальном ореоле Джекдокарского гранитоидного массива: *1* – оси основных антиклиналей (*а*) и синклиналей (*б*), *2* – изограда биотита регионального метаморфизма, *3* – контур площади термального воздействия гранитоидов Джекдокарского массива (происходит усиление ферромагнитных свойств моноклинного пирротина); остальные услов. обозн. см. на рисунках 1, 2, 10

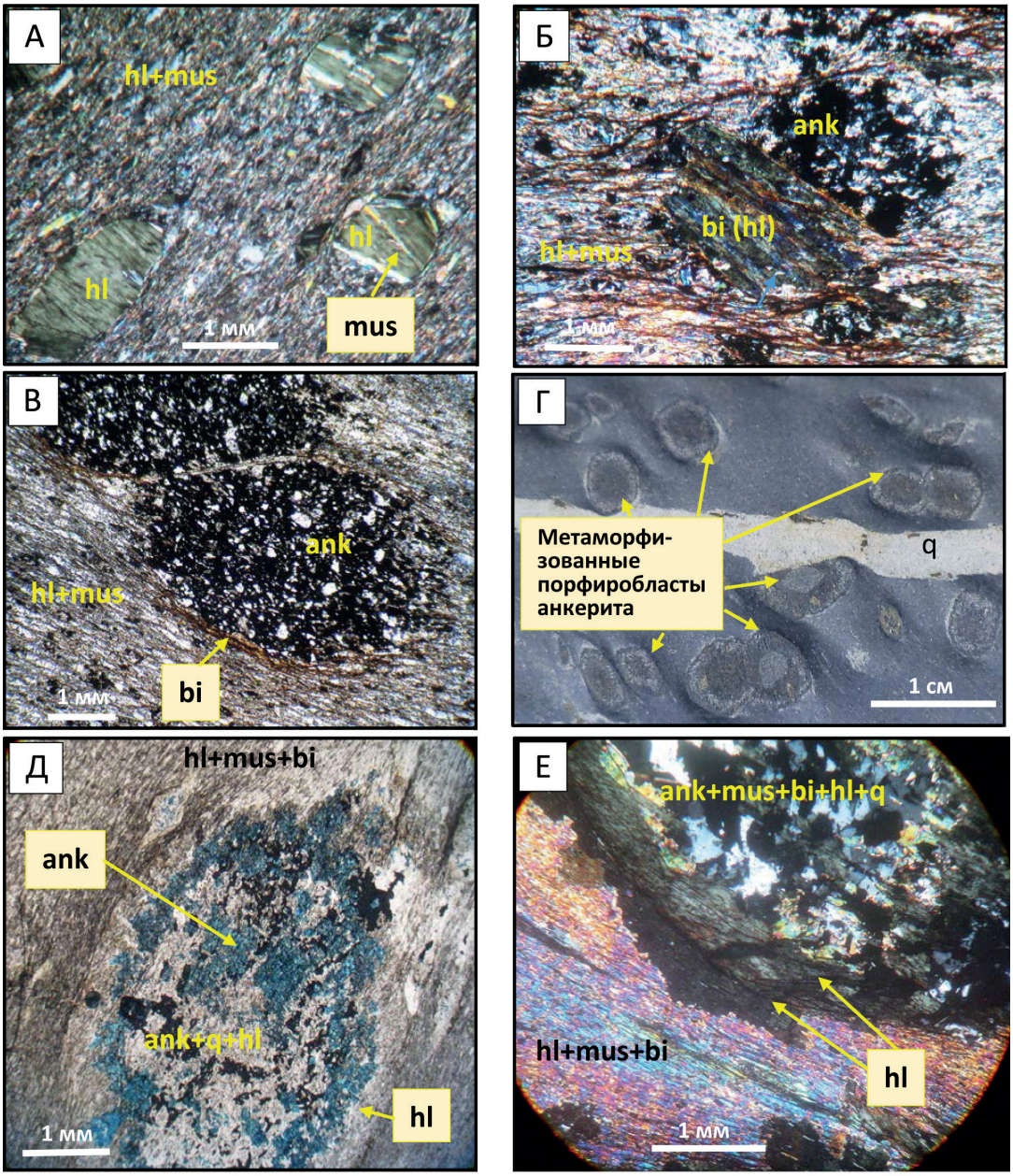


Рис. 12. Регионально-метаморфические преобразования:

А – фото шлифа (скв. 17, см. рис. 4, николи +) – видны регионально-метаморфические («зона хлорита» зеленосланцевой фации) «поперечные» порфиробласты хлорита (**hl**), хлорита и мусковита (**mus**), накладывающиеся на кливаж осевой поверхности линейных складок, образованный субпараллельной ориентировкой пластинок хлорита и мусковита (**hl+mus**); Б, В – фото шлифов из канавы 1 (Ровнинская зона рассланцевания, см. рис. 9, николи +): Б – порфиробласт биотита (хлоритизирован), формирующийся в регионально-метаморфический этап по более раннему порфиробласту анкерита (лимонитизирован); В – при дискретной активизации кливажа осевой поверхности линейных складок (**hl+mus**) в регионально-метаморфический этап происходит деформация («скругление») порфиробласт анкерита (**ank –** лимонитизирован) и формирование биотитовых (**bi**) зонок рассланцевания; Г – фото керна – видны регионально-метаморфические преобразования порфиробласт анкерита в «зоне биотита» с формированием зональной структуры, **q** –послерегионально-метаморфический золотоносный сульфидно-кварцевый прожилок (скв. 61, Макалакское рудное поле, см. рисунки 1, 11); Д, Е – фото шлифов (скв. 60, 61, Макалакское рудное поле): Д (николи II) – начальная стадия регионально-метаморфических преобразований в «зоне биотита» (сланцеватость образована субпараллельной ориентировкой хлорита, мусковита и биотита – **hl+mus+bi**) порфиробласт анкерита с формированием внешней хлоритовой и внутренней анкерит-кварц-хлоритовой (**ank+q+hl**) и анкеритовой «зонок», Е (николи +) – практически полная зональная псевдоморфоза по порфиробласту анкерита в «зоне биотита» (сланцеватость – **hl+mus+bi**) с формированием внешней хлоритовой (в том числе «экзоконтактовой») «зонки» и внутренней анкерит-мусковит-биотит-хлорит-кварцевой (**ank+mus+bi+hl+q**)

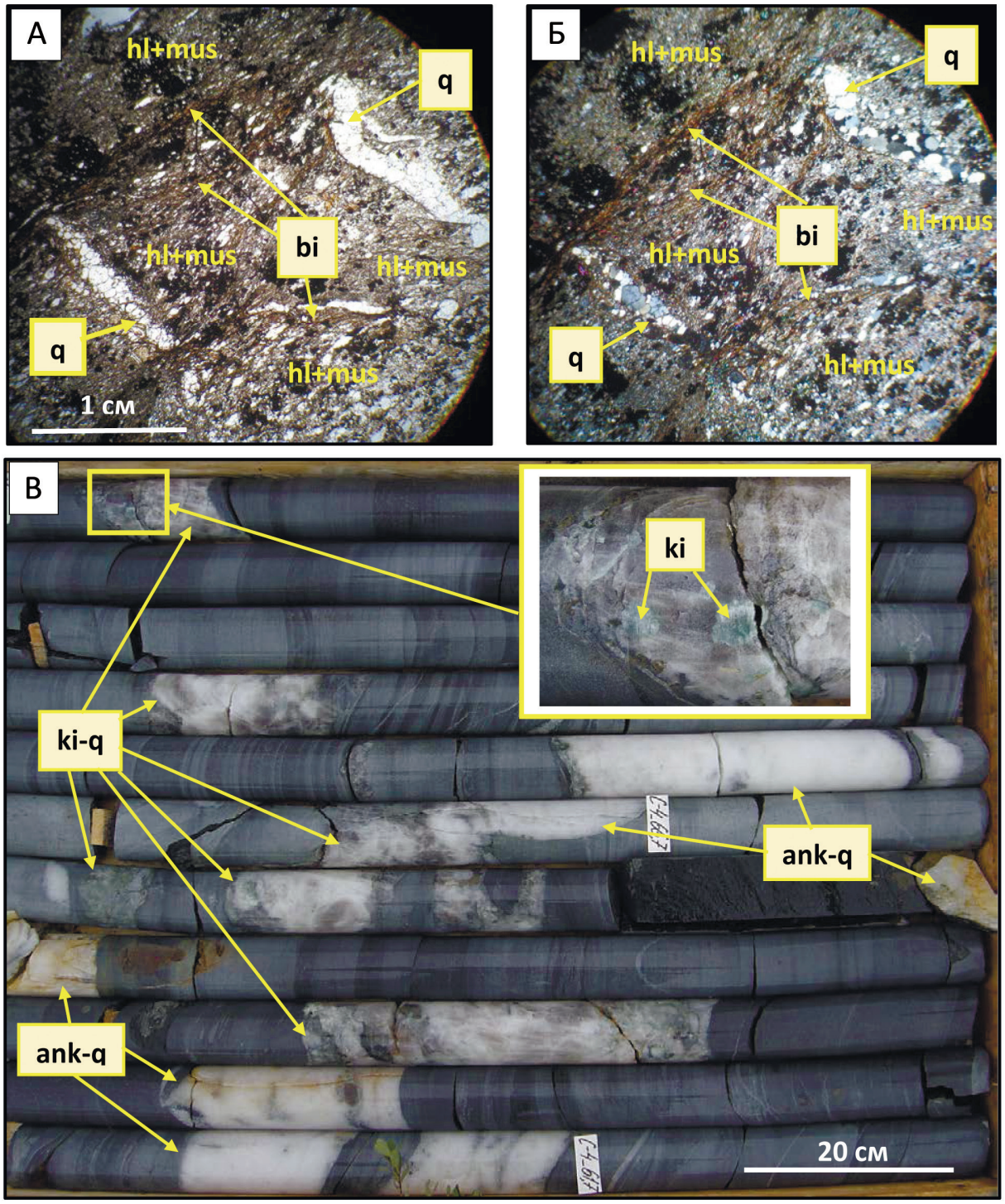


Рис. 13. Синрегионально-метаморфические кварцевые жилы и прожилки:

А, Б – фото шлифа (А – николи II, Б – николи +) метапесчаника (юго-восточный фланг месторождения Ожерелье, см. рис. 1): наблюдается дискретный характер активизации кливажа (сланцеватости) в регионально-метаморфический этап по отдельным зонкам с формированием биотита (**bi** – коричневые цвета) в их пределах (на «фоне» хлорит-мусковитового парагенезиса кливажа – **hl+mus**) и кварцевых (**q**) прожилков в отрывных трещинах между этими зонками; В – строение золоторудной жильно-прожилковой зоны месторождения Ожерелье: дорудные синметаморфические кианит-кварцевые (**ki-q**) жилы и прожилки, претерпевшие диафторические преобразования (полная мусковитизация кианита, перекристаллизация кварца) в собственно рудный этап при тектонической активизации зоны и формировании золотоносных анкерит-кварцевых (**ank-q**) жил в *PT*-условиях «зоны хлорита»

и потерей моноклинным пирротином ферромагнитных свойств, в ранее сформированных рудоконтролирующих зонах бурошпатизации происходило преобразование золотоносных порфиробласт сидерита и анкерита – они псевдоморфно замещались кварцем, биотитом и другими минералами [13, 17, 31, 33 и др.], часто приобретая зональное строение (см. рис. 12, Г–Е). Ранее [16, 17 и др.] автор обосновал, что в золотоносных бурых шпатах при минеральных превращениях субмикроскопическое золото укрупнялось и выделялось в свободном состоянии. Укрупненное самородное золото за счет гравитации просаживается в делювии на глубину не менее 0,7–1,0 м и не улавливается стандартным поверхностным опробованием по вторичным ореолам рассеяния, что в геохимическом поле создает эффект исчезновения рудоконтролирующих структур (см. рис. 9). Однако реально они продолжаются и в области высокого метаморфизма. Именно здесь выявлены рудные зоны месторождения Ожерелье (см. рис. 9), месторождения Ыканское, Светловского рудного поля (см. рис. 1).

В регионально-метаморфический этап в зонах разломных деформаций и рассланцевания формировалась кварцевая жильно-прожилковая минерализация. Наглядно это можно наблюдать в пределах зоны бурошпатизации на участке Ровном (см. рис. 9, канава 1). На рис. 13, А–Б в метапесчанике в условиях «зоны хлорита» видны многочисленные сближенные микрозонки рассланцевания с биотитом, между которыми образуются криволинейные (в том числе за счет продолжающегося рассланцевания и «расплющивания» породы) трещины с гранулированным метаморфогенным кварцем. В целом для синметаморфических кварцевых жил характерны нерезкие контакты, в их зальбандах отмечаются белый полевой шпат, кианит и биотит, в экзоконтакте – метаморфические минералы: биотит, гранат, амфибол и др. Рудная минерализация отсутствует, встречаются ильменит и вишневый рутил в виде крупных кристаллов. Такие жилы участвуют в строении рудных зон на месторождении Ожерелье, расположенном среди высокометаморфизованных пород. Здесь среди кварцевых жил автор различает син- и послеметаморфические. Синметаморфические жилы кианит-кварцевого состава, резко линзуются, иногда деформированы в сложные складки (см. рис. 13, В). Золоторудная минерализация связана с постметаморфическими анкерит-кварцевыми жилами, отличающимися резкими секущими контактами, рвущими кианит-кварцевые жилы (см. рис. 13, В) и формирующимися при активизации зоны окварцевания в рудный этап в низкотемпературных условиях (при диафторезе). При рассланцовке и деформации синметаморфических жил в стадии диафтореза метаморфические минералы в них хлоритизируются, мусковитизируются (кианит полностью замещается мусковитом, сохраняя «кианитовый» внешний облик и цвет), на участках дробления и трещиноватости появляются наложенные низкотемпературные сульфидные минералы и золото. Наличие в жильно-прожилковой зоне кианит-кварцевых жил свидетельствует об активизации синскладчатых зон рассланцевания в этап регионально-метаморфических преобразований пород и гранитогнейсового куполообразования. Именно при гранитогнейсовом куполообразовании и «развале» купольных структур [17, рис. 5] происходила активизация ранее сформированных зон рассланцевания (и бурошпатизации) в «ореоле» деформационного влияния куполов (в том числе в пределах слабо метаморфизованных пород – в «зоне хлорита»), сопровождающаяся образованием синметаморфических кварцевых жил и прожилков. Массовое опробование синметаморфических кварцевых жил, не подвергнувшихся диафторической переработке, свидетельствует об их безрудности.

Сингранитный метаморфизм связан с этапом «батолитового» гранитоидного магматизма – внедрением гранитоидов конкудеро-мамаканского комплекса [13]. Их послерегионально-метаморфический возраст уверенно устанавливается по геологическим данным – гранитоидные массивы секут изограды регионального метаморфизма (см. рисунки 1 и 11, А). Становление гранитоидных массивов происходило в различных структурно-магматических зонах, подробно рассмотренных автором ранее [13, 17], отличающихся различными *PT*-условиями и, соответственно, различающихся характером контактового метаморфизма. Контактовое воздействие гранитоидов на вмещающие породы в собственно золотоносной части региона, где преобладают слабо метаморфизованные породы, выражается, прежде всего, в ороговиковании пород [13, 22, 33, 37 и др.]. Эти ореолы, выявляемые геолого-петрографическими методами, как правило, имеют относительно небольшую ширину – до нескольких сотен метров. В то же время по геофизическим данным устанавливается значительно более масштабное термальное влияние гранитоидов на вмещающие породы. На рис. 11, Б на карте магнитного поля вокруг Джекдокарского массива отчетливо видна область преобразования вмещающих пород (желтый контур) по усилению интенсивности синскладчатых отрицательных аномалий. По-видимому, это усиление происходило за счет преобразования «сохранившегося» немагнитного гексагонального пирротина в ферромагнитный моноклинный, соответственно, с общим увеличением количества последнего при температурах 220°–250°С. На большем отдалении от гранитоидных массивов их контактово-метаморфическое воздействие на вмещающие породы также проявлялось, но так как оно было относительно низкотемпературным, то выражалось в виде диафторических преобразований ранее сформированных метаморфических минералов (хлоритизация биотита) (см. рис. 12, Б и др.), мусковитизации и альбитизации обломочных полевых шпатов, мусковитизации бурого шпата (рис. 14, А–Б) и др. Внедрение гранитоидов сопровождалось

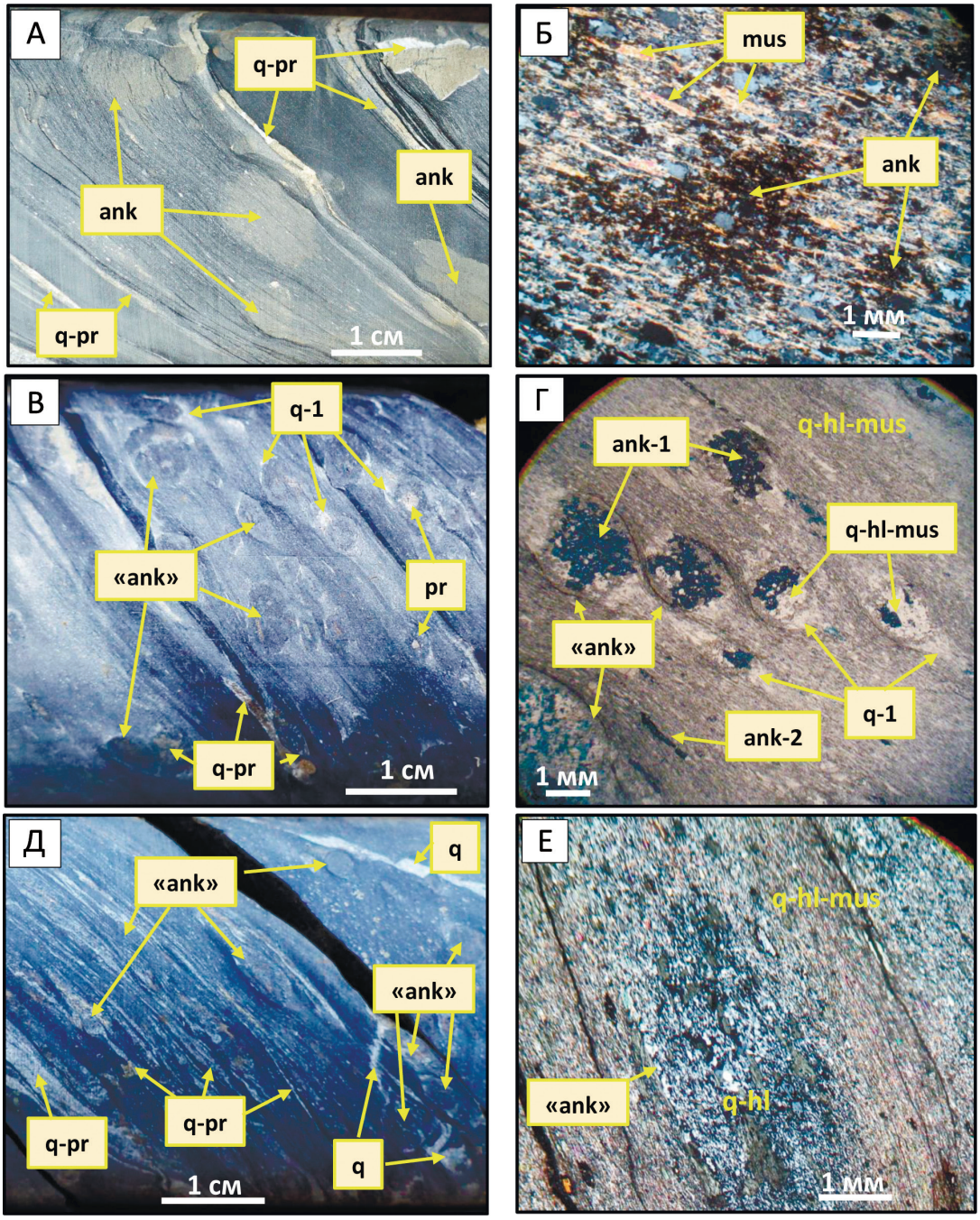


Рис. 14. Преобразования порфиробластов бурого шпата (анкерита) в рудный послерегионально-метаморфический этап:

А, Б – Атырканское рудное поле (см. рис. 1), скв. 14: А – фото керна, Б – фото шлифа (николи +) – рассланцевание и мусковитизация (**mus**) порфиробластов анкерита (**ank**, в шлифе – лимонитизированы) при их синрудном рассланцевании в *PT*-условиях «зоны хлорита» одновременно с формированием золотоносных кварц-пиритовых (**q-pr**) прожилков и порфиробластов; В–Е – Макалакское рудное поле (см. рис. 1), скважины 60, 61: В, Г – соответственно, фото керна и шлифа (николи II) синрудное рассланцевание и диафторическая анкеритизация (**ank-1**), хлоритизация и мусковитизация (**q-hl-mus**) метаморфизованных в регионально-метаморфический этап в «зоне биотита» порфиробластов анкерита (с образованием по ним зональных псевдоморфоз с различным соотношением в «кольцевых зонках» кварца, хлорита, биотита, анкерита (**«ank»**) и др.) одновременно с формированием золотоносных кварц-пиритовых (**q-pr**) прожилков и порфиробластов, образованием кварцевых «теней давления» (**q-1**), анкеритовых прожилков и линейно-вытянутых порфиробластов анкерита (**ank-2**) в плоскости рассланцевания; Д, Е – соответственно, фото керна и шлифа (николи +) регионально-метаморфизованные порфиробласты бурого шпата (**«ank»**) интенсивно деформированы и диафторированы (имеют кварц-хлоритовый состав – **q-hl**) с одновременным формированием золотоносных кварцевых (**q**) и кварц-пиритовых (**q-pr**) прожилков (Д)

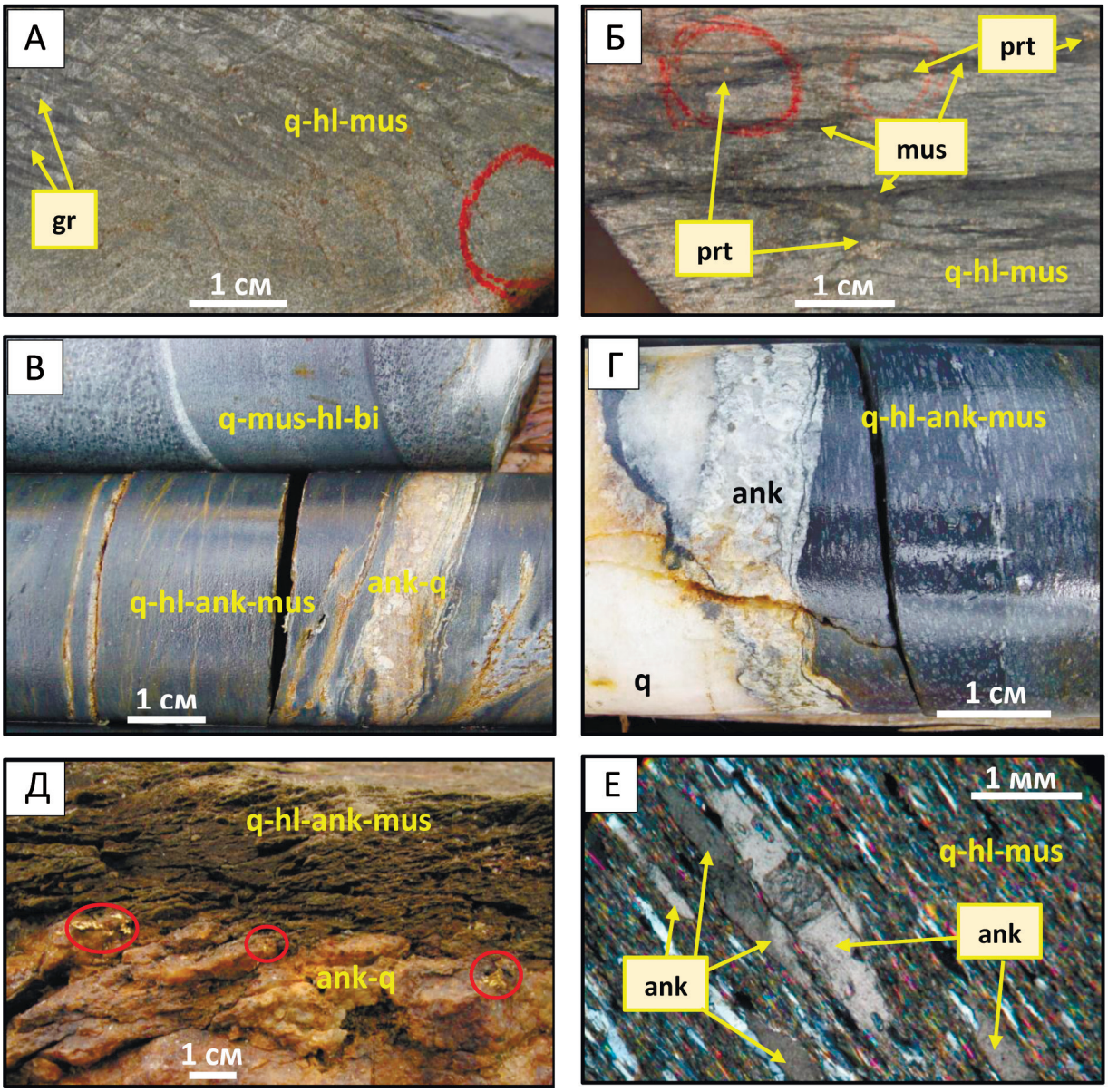


Рис. 15. Минерализованные золотоносные зоны диафтореза среди пород, метаморфизованных в этап регионального метаморфизма в условиях эпидот-амфиболитовой фации:

А, Б – фото керна из рудной зоны месторождения Ыканское (скв. 19 – красным обведены участки керна с видимым мелким золотом): А – кварц-хлорит-мусковитовые (**q-hl-mus**) диафториты по метапесчаникам (в нижней части) и существенно гранатовым сланцам (в верхней части) – видны псевдоморфозы кварц-хлорит-мусковитовые (**q-hl-mus**) по гранату с реликтами граната (**gr**) в некоторых из них; Б – хлорит-мусковитовые (**hl-mus**) и мусковитовые (**mus** – темные) диафториты с золотоносными пирротиновыми просечками (**prt**); В–Е – месторождение Ожерелье, рудная зона 1: В – на фото керна (скв. 5) кварц-хлорит-анкерит-мусковитовые (**q-hl-ank-mus**) диафториты с золотоносными анкерит-кварцевыми прожилками (нижний «столбик») по существенно биотитовым (**q-mus-hl-bi**, биотит – густая черная вкрапленность) сланцам и метапесчаникам (верхний «столбик»), Г – на фото керна (скв. 5) анкерит-кварцевая (**ank, q**) золотоносная жила среди углеродистых кварц-хлорит-анкерит (серые вкрапленники)-мусковитовых (**q-hl-ank-mus**) метасоматитов (диафторитов), Д – в стенке карьера анкерит-кварцевая жила с видимым золотом (обведено красным) в кварц-хлорит-анкерит-мусковитовых (**q-hl-mus**) диафторитах (буреют при выветривании анкерита), Е – фото шлифа (николи +) кварц-хлорит-анкерит-мусковитовых диафторитов: в кварц-хлорит-мусковитовом (**q-hl-mus**) сланце новообразованные синрудные порфиробласты анкерита **(ank**)

активизацией синскладчатых зон рассланцевания и бурошпатизации с участием как метаморфических, так и сингранитных (?) флюидов, в связи с чем в их пределах на фоне продолжающегося рассланцевания происходили наиболее интенсивные гидротермально-метаморфические процессы с формированием в том числе и золотоносных (сульфидно)-кварцевых жильно-прожилковых систем. Синскладчатые порфиробласты бурых шпатов, преобразованные в регионально-метаморфический этап в концентрически-зональные псевдоморфозы (см. рис. 12), в этот этап деформируются, рассланцовываются и претерпевают низкотемпературные преобразования (мусковитизация, хлоритизация) (см. рис. 14). За счет рассланцевания, хлоритизации и мусковитизации они или приобретают «теневые» формы (см. рис. 14, А–Б, Д–Е), или на начальных стадиях рассланцевания могут являться относительно «жесткими» включениями с формированием «теней давления» (см. рис. 14, В–Г). На рис. 14, Б наглядно видно рассланцевание и мусковитизация реликтового «первичного» (синскладчатого) порфиробласта бурого шпата. В подобном порфиробласте С.Г.Кряжевым установлено самородное пластинчатое золото, ориентированное согласно мусковитовым зонкам [20, рис. 73].

Золоторудные месторождения окончательно формировались в этот этап в пределах ранее сформированных золотоносных зон рассланцевания и бурошпатизации при их активизации в *PT*-условиях «зоны хлорита». При этом не только происходило «рудное» преобразование ранее сформированных концентраций, но и, по-видимому, отлагалось «дополнительное» золото из сингранитных флюидов. При активизации в условиях «зоны хлорита» золотоносных зон рассланцевания, в пределах которых в регионально-метаморфический этап породы были метаморфизованы в условиях «зоны биотита» зеленосланцевой фации, эпидот-амфиболитовой или амфиболитовой фаций, проявились процессы диафтореза (рис. 15) с преобразованием высокотемпературных минералов в низкотемпературные (мусковит, хлорит, кварц, новообразованные железомагнезиальные карбонаты и др.). Высокотемпературные метаморфические минералы могут сохраняться в реликтах (гранат на рис. 15, А) или, за пределами зон диафтореза, оставаться неизмененными (см. рис. 15, В). В случае интенсивного проявления диафтореза в рудных зонах формируются существенно мусковитовые (см. рис. 15, Б) или кварц-хлорит-анкерит-мусковитовые метасоматиты (см. рис. 15, В–Е), вмещающие золото-кварц-сульфидные просечки (см. рис. 15, Б) или анкерит-кварцевые жилы и прожилки, в том числе с видимым золотом (см. рис. 15, Д). Таким образом, одновременно с формированием диафторитов, происходила локализация золота в кварцевых, сульфидно-кварцевых, кварц-сульфидных и сульфидных образованиях.

Таким образом, выделение на уровне денудационного среза территорий, где метаморфические и гидротермально-метасоматические процессы в пределах рудоконтролирующих зон рассланцевания при их активизации в сингранитный этап протекали в условиях «зоны хлорита», лежит в основе определения границ площадей (рудных узлов и рудных полей), перспективных на выявление золоторудных месторождений.

В заключение следует отметить, что метаморфические условия коллизионных процессов определяют возможность проявления золотоносных процессов на каждом этапе преобразования золотоносных пород с концентрированием золота вплоть до формирования рудных зон. Поэтому составление прогнозно-поисковых моделей золоторудных узлов, полей и месторождений должно основываться на материалах по стадийности рудообразования с определением метаморфических условий образования и преобразования золотоносных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бродская С.Ю.* Пирротин как геотермометр повторного нагрева породы // Известия АН СССР. Физика Земли. 1980. № 3. С. 48–55.
2. *Буряк В.А.* Зависимость оруденения древних (докембрийских) формаций от региональной метаморфической зональности (Витимо-Патомское нагорье) // Доклады АН СССР. 1965. Т. 163. № 2. С. 435–438.
3. *Буряк В.А., Лобанов М.П., Хренов П.М.* К проблеме метаморфогенного рудообразования // Советская геология. 1967. № 5. С. 11–24.
4. *Буряк В.А.* Метаморфогенно-гидротермальный тип промышленного золотого оруденения. – Новосибирск: Наука, 1975.
5. *Буряк В.А.* Метаморфизм и золотое оруденение // Метаморфогенное рудообразование низкотемпературных фаций и ультраметаморфизма. – М.: Наука, 1981. С. 31–48.
6. *Ворошин С.В., Акинин В.В., Махоркина Т.И.* Преобразование пирита в пирротин при метаморфизме терригенных пород Верхоянского комплекса (Северо-Восток России): приложение к генезису золоторудных месторождений // Доклады РАН. 1993. Т. 330. № 6. С. 733–735.
7. *Ворошин С.В., Шарафутдинов В.М., Тюкова Е.Э.* Аномалии петромагнитных параметров, обусловленные сульфидной минерализацией, и прогноз оруденения в Яно-Колымском золотоносном поясе // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 5. С. 91–104.
8. *Геологическая* съемка метаморфических и метасоматических комплексов. Методическое пособие. – С-Пб: Изд-во ВСЕГЕИ, 1996.
9. *Геологические* структуры: пер. с англ. / Под ред. Т.Уемуры и Ш.Мицутани. – М.: Недра, 1990.
10. *Воган Д., Крейг Дж.* Химия сульфидных минералов / Под ред. И.Я.Некрасова. – М.: Мир, 1981.
11. *Генкин А.Д., Логинов В.П., Органова Н.И.* О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах // Геология рудных месторождений. 1965. № 3. С. 3–24.

12. *Герасимов А.П.* Геологические исследования в Ленском горном округе в 1903 г. // Геологические исследования в золотоносных областях Сибири. Ленский золотоносный район. Вып. IV. – Санкт-Петербург, 1907. С. 1–45.
13. *Докембрий* Патомского нагорья / А.И.Иванов, В.И.Лифшиц, О.В.Перевалов и др. – М.: Недра, 1995.
14. *Иванов А.И.* Закономерности формирования линейной складчатости северной части Байкало-Патомского нагорья // Автореф. дис. … канд. геол.-минер. наук. – Иркутск, 1984.
15. *Иванов А.И., Рязанов Г.В.* Структурно-кинематический анализ Патомского прогиба. – Новосибирск: Наука, 1992.
16. *Иванов А.И.* Закономерности формирования золоторудных месторождений Бодайбинского рудного района и новые аспекты их поисков // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 17–23.
17. *Иванов А.И.* Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). – М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014.
18. *Казаков А.Н.* Деформации и наложенная складчатость в метаморфических комплексах. – Л.: Наука, 1976.
19. *Колмаков Ю.В.* Золотосульфидное месторождение Благодатное (Енисейский кряж, Россия): природа геофизических аномалий, последовательность и причины образования петрофизической зональности // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 11. С. 1667–1681.
20. *Кряжев С.Г.* Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 28–38.
21. *Лебедева Н.Б.* Роль неоднородностей горных пород в процессе образования кливажа // Геотектоника. 1976. № 2. С. 31–43.
22. *Ленский* золотоносный район / Ю.П.Казакевич, С.Д.Шер, Т.П.Жаднова и др.: в 2-х томах. Т. 1: Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 85. – М.: Недра, 1971.
23. *Летников Ф.А.* Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования // Смирновский сборник-99. – М.: ВИНИТИ, 1999. С. 63–98.
24. *Лидер М.Р.* Седиментология: пер. с англ. – М.: Мир, 1986.
25. *Новиков Г.В., Егоров В.К., Соколов Ю.А.* Пирротины (кристаллическая и магнитная структура, фазовые превращения). – М.: Наука, 1988.
26. *Обручев В.А.* Геологическая карта Ленского золотоносного района. Описание листов IV-1 и IV-2. – Санкт-Петербург, 1907.
27. *Обручев В.А.* Металлогенические эпохи и области Сибири // Тр. института прикладной минералогии и металлургии. – М., 1926. Вып. 21.
28. *Обручев В.А.* Проблема золотоносности пиритизированных сланцев Лено-Витимского района // Проблемы советской геологии. 1935. Т. 5. № 1. С. 60–69.
29. *Очерки* структурной геологии сложнодислоцированных толщ / В.В.Белоусов, И.В.Кириллова, В.Н.Шолпо и др. – М.: Недра, 1977.
30. *Паталаха Е.И.* Механизм возникновения структур течения в зонах смятия. – Алма-Ата: Наука, 1970.
31. *Петров Б.В., Макрыгина В.А.* Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. – Новосибирск: Наука, 1975.
32. *Рундквист Д.В.* Особенности геологического развития байкалид // Основные проблемы рудообразования и металлогении. – М.: Наука, 1990. С. 44–65.
33. *Салоп Л.И.* Геология Байкальской горной области: в 2-х томах. – М.: Недра, 1967. Т. 2.
34. *Салоп Л.И.* К стратиграфии и тектонике докембрия Мамско-Чуйского слюдоносного района (Северо-Байкальское нагорье) // Проблемы геологии докембрия Сибирской платформы и ее складчатого обрамления: Тр. ВСЕГЕИ. Нов. сер. – Л.: ВСЕГЕИ, 1974. Т. 199. С. 83–143.
35. *Синкина Е.А., Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю.* Типоморфизм пирротина золоторудного месторождения Чертово Корыто // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 1. С. 58–65.
36. *Термокаппаметрия* природных сульфидов железа Северо-Востока России / П.С.Минюк, Е.Э.Тюкова, Т.В.Субботникова и др. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 4. С. 601–614.
37. *Шаров В.Н., Шмотов А.П., Коновалов И.В.* Метасоматическая зональность и связь с ней оруденения (Байкало-Патомское нагорье). – Новосибирск: Наука, 1978.
38. *Этапы* формирования крупномасштабной благородно-металлической минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П.Лаверов, И.В.Чернышев, А.В.Чугаев и др. // Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. № 2. С. 236–241.