

**ПРИЧИНЫ И ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ БОНАНЦЕВ В РУДНЫХ ТЕЛАХ ЗОНЫ  
БАХМУТ ШТОКВЕРКОВОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПИОНЕР  
(ПРИАМУРЬЕ)**

*Н.С. Остапенко, О.Н. Нерода*

*ФГБУН Институт геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Рёлочный 1, г. Благовещенск, 675000;  
E-mail: [ostapenko\\_ns@mail.ru](mailto:ostapenko_ns@mail.ru)*

Поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

При изучении рудного столба в составе рудоносной зоны Бахмут с прожилково-вкрапленными золото-кварцевыми рудами мезотермального золоторудного штокверкового месторождения Пионер (Приамурье, Россия) на различных его горизонтах авторами выделены дискретные аномально богатые золотом участки (бонанцы). Цель исследования – выяснение причин и условий формирования бонанцев и благоприятствовавших этому факторов. Помимо анализа общего распределения золота в рудных телах, проведено детальное макро- и микроскопическое изучение особенностей распределения скоплений частиц самородного золота в образцах руд и природы самородного золота в них. Установлена гипогенная природа этих скоплений, в том числе и у поверхности. Богатое золото в зонах брекчированных пород накапливалось в одну главную продуктивную золото-кварцевую стадию телескопированно: показана отчетливая пространственная смещенность скоплений частиц самородного золота в проницаемый окварцованный цемент вышележащих брекчий относительно максимумов размещения прожилков и гнезд жильного кварца и почти полное их отсутствие в самих кварцевых телах. Вместе с этим установлена пространственная сближенность полей скопления золотин с заполненными кварцем, доминирующими по величине полостями раскрытия трещин и местами выклинивания раздувов их мощности. На основании этих результатов и проведенных лабораторных экспериментов обоснована модель естественной газовой флотации нанозарождений самородного золота в составе ассоциатов « $Au_{кр}$  + пузырьки газа» с формированием бонанцев в отмеченных благоприятных условиях на более высоких уровнях месторождения под различными малопроницаемыми экранами.

**Ключевые слова:** штокверковое месторождение золота, бонанцы, гетерогенизация флюида, ассоциаты « $Au_{кр}$  + газ», модель естественной газовой флотации  $Au_{кр}$ , Приамурье.

**ВВЕДЕНИЕ**

В рудоносных зонах мезотермального штокверкового месторождения Пионер золото-кварцевой формации Приамурской золотоносной провинции распределение золота в рудных телах неравномерное, а на отдельных участках рудных столбов – крайне неравномерное. Содержания его в пробах варьируют от 0.2 до 1830 г/т [2]. Поэтому представляет большой научный и практический интерес выяснить условия формирования локальных аномально богатых концентраций золота на некоторых участках рудных тел месторождения, а также какие геолого-структурные и физико-химические факторы способствовали этому.

Проведенное многими исследователями изучение состава флюидных включений в жильных квар-

цах из продуктивных на золото парагенезисов золоторудных месторождений различных регионов мира, в том числе месторождения Школьное (Россия), Слиппер (США) и многих других с бонанцевыми рудами [3, 25, 27, 35], показало, в основном, низкие содержания присутствующего в них растворенного золота – на уровнях  $\leq 10\text{--}30$  ppb. Близкие содержания золота установлены также и во многих современных геотермальных системах [20, 21, 27]. Формирование из таких растворов богатых руд с содержаниями золота, в многие сотни тысяч раз превышающими указанные содержания золота во флюидных включениях и в «исходных» глубинных геотермальных водах, весьма проблематично. Это позволяет предполагать наличие каких-то особых, благоприятствовавших этому

процессу факторов или механизмов переноса золота флюидами и концентрированного его отложения.

Проблема формирования рудных столбов и, особенно, бонанцев в золоторудных месторождениях до настоящего времени остается дискуссионной. В разные годы были опубликованы результаты большого количества экспериментов по растворимости золота в модельных гидротермальных растворах с лигандами на основе Cl, S (например, [4, 26] и многие другие) при различных физико-химических параметрах. В них были установлены зависимости растворимости различных комплексов золота от изменения давления и температуры в модельных флюидных системах, а также от изменения pH, Eh и  $fO_2$  флюидов. При значительных понижениях P и T флюидов в них наблюдались снижения устойчивости растворимых комплексов золота [4, 19, 26] и образование наночастиц и золей золота коллоидной размерности с последующей их коагуляцией [3, 18–21, 30, 33, 34]. Такой механизм зарождения наночастиц золота и обогащения ими флюидов установлен исследователями для геотермальных скважин на уровнях кипения глубинного флюида и снижения в процессе этого его температуры. В связи с этим, наряду с переносом золота в растворимых формах, ими предполагается и механический перенос напором восходящего флюида образующихся коллоидных частиц и золей золота на более высокие уровни от мест поступления и начала кипения глубинных пластовых и трещинных флюидов в геотермальных скважинах, вплоть до поверхности [3, 18, 20, 21, 30, 33, 34 и др.]. Многие исследователи [15, 18, 19, 23, 27, 28, 30–32] допускают участие такого твердофазного механического переноса коллоидных золей золота потоками водного флюида при формировании руд эпitherмальных жильных месторождений с бонанцами, а некоторые из них распространяют этот механизм переноса золота и на формирование его мезотермальных месторождений [24].

Считаем важным отметить, что многие исследователи геотермальных систем [18, 31–34] наблюдали отложения плёнок, мелких пластинок и других форм самородного золота на стенках скважин в зонах кипения флюида и на пробоотборниках при взятии из них водных проб, а также и на сливном оборудовании на устьях скважин. В работе [27] показано кристаллическое строение наночастиц овоидной формы и кластеров электрума в рудах эпitherмального месторождения Брюсджек (Brucejack, Канада).

Отметим также, что, признавая реальными явления гетерогенизации, фазового расслоения и дегазации флюида при снижениях его давления в процессе гидротермального рудообразования, преобладающая

часть исследователей, к сожалению, оставляет без внимания оценку возможности твердофазного переноса зарождающихся в зонах кипения флюида кристаллических частиц самородного золота одновременно образующимися с ними пузырьками газовой фазы. И это при том, что газофильность поверхности частиц золота давно известна [15, 16]. Нами такой механизм переноса (естественной газовой флотации нанозарождений золота) и их накопления обосновывался для рудных столбов жильных месторождений Приамурья [10, 11, 14] и предполагается для бонанцевых руд штокверкового месторождения золота Пионер.

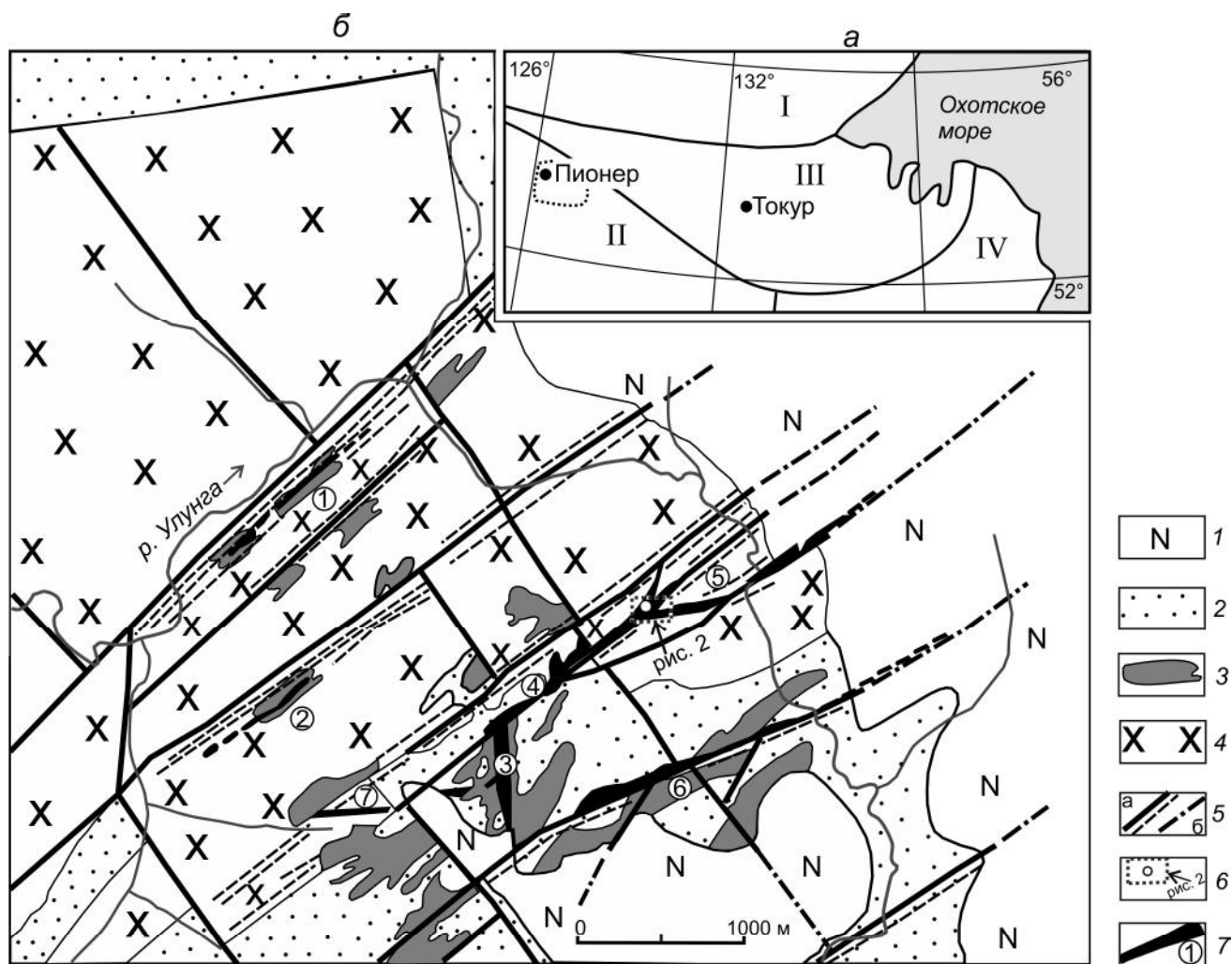
Цель нашего исследования минерализации месторождения Пионер – выяснить причины и геолого-структурные условия формирования аномально богатых золотом участков рудных тел (бонанцев), а также благоприятствовавшие этому факторы и механизмы переноса золота.

В процессе этого исследования нами решались следующие задачи: 1 – выяснение влияния изменчивости давления флюида на подвижность и отложение золота в рудном процессе; 2 – роль проницаемости пород и различных экранов в образовании высоких аномальных скоплений золота в рудных телах; 3 – роль геолого-структурных факторов, благоприятствовавших этому; 4 – роль процессов кипения, гетерогенизации и пересыщения флюидов в появлении твердофазной формы переноса золота и образовании его дискретных аномальных концентраций в рудах.

Для решения указанных задач нами использовались следующие методические подходы: 1 – анализ особенностей распределения золота в рудных зонах на примере типичной для месторождения Пионер рудоносной тектонической зоны Бахмут по материалам детальной её разведки и опробования выработок (канав, расчисток траншей) и керна буровых скважин; 2 – выяснение геолого-структурных условий локализации богатых золотом участков в рудных телах на поверхности и на более глубоких уровнях; 3 – анализ особенностей локализации самородного золота в рудах по наблюдениям в приполюрованных поперечных срезах большого числа отобранных образцов, а также в шлифах и аншлифах, изготовленных из наиболее информативных из них, и установление пространственно-генетических связей выделений самородного золота с минеральными парагенезисами.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПИОНЕР

Золоторудное месторождение Пионер размещается в западной части Приамурской золотоносной провинции [2, 17] на территории Тыгда-Улунгинско-



**Рис. 1.** Схемы размещения (а) и геологического строения (б) золоторудного месторождения Пионер Приамурской провинции, по [2].

а – на врезке – размещение месторождения Пионер в Тыгда-Улунгинской вулcano-тектонической структуре (пунктирный контур) относительно главных мегаструктур: I – Сибирский кратон; II – Амурский микроконтинент; орогены: III – Монголо-Охотский, IV – Сихотэ-Алинский; б – геологическое строение месторождения: 1 – озерно-аллювиальные отложения неогена; 2 – песчаники и алевролиты верхней юры; 3 – тела синрудных диоритовых порфиров буриндинского комплекса, ранний мел; 4 – диориты и гранитоиды дорудного гипабиссального плутона (Ольгинский массив), ранний мел; 5 – разломы: а – сопряженные с зонами трещиноватости, б – они же под рыхлыми отложениями; 6 – местоположение рисунка 2, белый кружок – место отбора богатых золотом образцов в бананце-2 рудного столба зоны Бахмут; 7 – крутозалегающие зоны прожилково-вкрапленных и жильно-прожилковых руд, цифры в кружках: 1 – Звёздочка, 2 – Западная, 3 – Южная, 4 – Промежуточная, 5 – Бахмут, 6 – Андреевская, 7 – Восточная.

го золотоносного узла, непосредственно на северо-восточной окраине Гонжинского выступа докембрия Буреинского срединного массива Амурского микроконтинента (рис. 1, а). В геодинамическом плане территория входит в зону сближения и коллизии в позднем палеозое и раннем мезозое Евразийской и Амурской континентальных плит и последующей её тектоно-магматической активизации в раннем мелу. В геологическом строении территории рудного поля (рис. 1, б) участвуют дислоцированные терригенные отложения поздней юры, прорванные телами трех

магматических комплексов: штоками и дайками крупнопорфировых гранит-порфиров позднеюрского магдагачинского комплекса; крупным уплощенным массивом гранитоидов (диориты, гранодиориты, гранит-порфиры) верхнеамурского комплекса раннемелового возраста; штоками и дайками диорит-порфиров буриндинского комплекса этапа раннемеловой тектоно-магматической активизации.

Золотоносное рудное поле месторождения Пионер размещается в эндо- и экзоконтактовых зонах юго-восточного фланга многофазного Ольгинского

гранитоидного массива. По геофизическим данным, это крупное уплощенное пологозалегающее интрузивное тело имеет мощность 1–2.5 км. Оно прорывает позднеюрские песчаники и алевролиты аякской свиты мощностью более 560 м. Глубже терригенных отложений располагается докембрийский комплекс метаморфитики Гонжинского выступа Буреинского срединного массива. В процессе сближения и коллизии указанных выше плит сформировалась серия крутозалегающих разломов северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений.

Наиболее хорошо развита и тектонически проработана доминирующая система сближенных (расстояния между ними 0.3–1.5 км) крутозалегающих (под углами 50–80°) разломов северо-восточного простирания, сосредоточенная в зоне юго-восточного контакта Ольгинского гранитоидного массива и вмещающих его терригенных пород. Эти разломы являются основными магмо- и рудоконтролирующими структурами. Таких параллельных сближенных зон разломов этого, а также других из указанных направлений, в рудном поле установлено около десятка. Из них наиболее рудоносными являются зоны разломов северо-восточного простирания центральной части рудного поля, тяготеющие к юго-восточной контактовой зоне Ольгинской гранитоидной интрузии (рис. 1, б, 2). В их числе зоны Бахмут, Промежуточная, Андреевская. Две первые из них залегают непосредственно в эндоконтактовой зоне интрузии и имеют северо-западное падение, а последняя – во вмещающих её терригенных породах, и имеет юго-восточное падение. Вместе с субмеридиональной зоной Южная эти зоны (по В.С. Дмитренко и др., 2007ф) содержат основные разведанные запасы золота (около 114 т). На этом же количественном уровне оцениваются и прогнозные ресурсы золота этого месторождения, включающие ещё не разведанные глубокие горизонты, а также фланги указанных и слабо изученных периферических зон [2].

### Минерализация и морфология рудных зон и тел

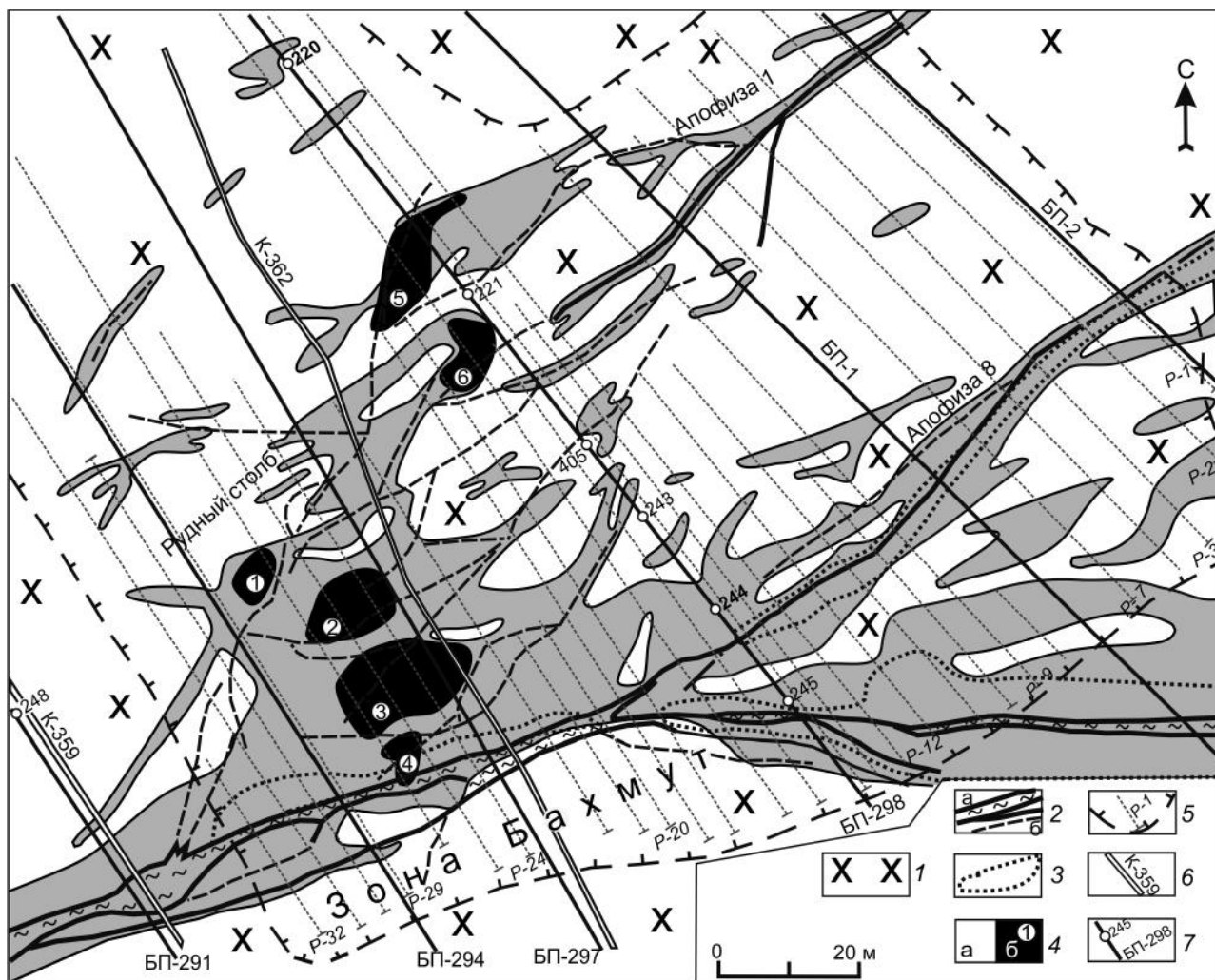
Рудная минерализация месторождения Пионер формировалась в четыре стадии – предрудных метасоматитов, раннюю золото-сульфидную, главную продуктивную золото-кварцевую и послерудную кварц-карбонатную. Помимо жильных минералов и самородных золота и серебра, в составе руд присутствуют доминирующий пирит (четыре генерации, по В.С. Дмитренко, 2007ф) и, в подчиненных количествах, пирротин, магнетит, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, антимонит, акантит, аргентит [2].

В гидротермально измененных породах всех упомянутых разведанных рудоносных и потенциаль-

но рудоносных зон месторождения с вкрапленностью сульфидов (в основном, на уровне 1–5 %) и прожилками кварца и карбонатов, распределение золота неравномерное, чаще всего невысокое, в пределах 0.2–3, реже более 4 г/т. В отдельных пробах или сближенных группах проб содержания достигают 50 г/т или даже нескольких сотен г/т. Рудные тела не имеют четких геологических границ и выделяются только по результатам опробования в границах бортового содержания 0.4 г/т. Вдоль тектонических нарушений с прожилками кварца и примыкающих к ним линзовидных тел брекчий на кварцевом цементе, а также выделяются контуры руд различного качества. В зависимости от средних содержаний в них золота оконтуриваются тела бедных (около 1 г/т), рядовых (1.63 г/т) руд и более богатых в рудных столбах ( $\geq 4$  г/т). Мощность их составляет 2–10, иногда достигает 20–40 м. Рудные тела имеют сложную, линейно-вытянутую либо линзовидную формы. Они залегают кулисообразно, либо косо причленяются (или ориентированы) к основным рудоносным зонам. Каждая протяженная рудоносная зона месторождения Пионер, по Н.Г. Власову с соавторами [2], включает от 5 до 15 таких рудных тел протяженностью от 21 до 1000 м (рис. 2).

Вмещающие породы всех золотоносных зон месторождения альбитизированы, хлоритизированы окварцованы, серицитизированы, пиритизированы, карбонатизированы в массе и рассечены прожилками кварца и послерудными прожилками карбоната. Минерализованные зоны включают истертые до глинистого состояния породы зон дробления. Тектониты окварцованы, пиритизированы, вмещают прожилки кварца. К ним примыкают тела брекчий с кварцевым цементом и сложной формы кварцевые штокверки с густой и умеренной сетью прожилков, соответственно, в количествах 50–100 и 30–50 на 1 погонный метр, а далее 10–30 и менее. По мере удаления от рудоконтролирующих разломов степень метасоматоза вмещающих пород, количества вкраплений пирита и прожилков кварца в них снижаются. Мощности прожилков кварца варьируют от  $< 1$  мм до 2–3 см, а их простирание изменчивое – от северо-западного и северо-восточного до широтного. Лишь единичные из них, так же малой протяженности, достигают мощности 10–15 см. Выдержанные и протяженные кварцевые жилы для золотоносных зон месторождения не характерны.

Отмеченное сходство условий локализации и строения всех рудоносных зон месторождения Пионер позволяет рассмотреть детали их строения и рас-



**Рис. 2.** Сопряжение рудного столба и апофиз № 1 и № 8 с золотоносной зоной Бахмут месторождения Пионер и положение бананцев № 1–№ 6.

1 – вмещающие диориты Ольгинского массива К<sub>1</sub>; 2 – разломы: а – рудоконтролирующий разлом Бахмут и оперяющие его разломы, контролирующие апофизы № 1 и № 8; б – более мелкие нарушения и тектонические швы; 3 – совмещенные поля брекчий на кварцевом цементе и поля густых прожилков кварца (50–100 на 1 п. м.); 4 – рудоносность: а – бедные и рядовые руды, б – бананцы и их номера; 5 – контур траншеи и линии расчисток и полотна (P-1–P-32); 6 – разведочные канавы; 7 – профили буровых скважин и их номера.

пределения золоторудной минерализации на примере одной из наиболее изученных из них – зоны Бахмут.

#### Распределение золота в рудах зоны Бахмут

Наложенная на гидротермально измененные тектониты продуктивная на золото прожилково-вкрапленная убого- и малосульфидная мезотермальная золото-кварцевая минерализация разного качества установлена на разведанном отрезке зоны длиной 1090 м [2]. Восточный фланг этой зоны, перекрытый толщей озерно-аллювиальных рыхлых осадков неогена мощностью 10–50 м, пока окончательно не изучен. Повышенная золотоносность руд наиболее характерна для центральной части этой зоны. Она

открыта канавами, скважинами, а наиболее богатый участок вскрыт широкой траншеей длиной более 150 м. В полотне траншеи через интервалы 8–10 м со сгущением до 4–5 м пройдены 32 поперечные расчистки с целью детальной документации и сплошного бороздового опробования минерализации. Как показано на рисунке 2, зона Бахмут характеризуется рядовыми и бедными рудами. Вдоль тектонической зоны, преимущественно со стороны висячего крыла, прослеживается кварцевый штокверк шириной около 15–35 м с содержанием золота в сечениях рудных тел от 0.4 до 3 г/т при средних значениях 0.9–1.7 г/т. Линзы брекчий с кварцевым цементом тесно ассо-

цируют здесь с основным рудоконтролирующим разломом невыдержанной мощности переменного простирания ( $50-90^\circ$ ), с густыми прожилками кварца. Висячем боку этой зоны вскрыты две апофизы и рудный столб.

#### Апофизы № 1 и № 8 зоны Бахмут

На отрезке дугообразного изгиба простирания тектонической зоны Бахмут с северо-восточного на широтное при правостороннем сдвиге во вмещающих диоритах висячего крыла сформировались оперяющие сложные сколы и сопряженные с ними трещины отрыва и тектонические швы притирания. Вследствие этого возникли дополнительные каналы инфильтрации глубинных металлоносных флюидов и значительно увеличилась ширина зоны метасоматизированных и минерализованных пород до 150 м и более. На двух сложных сколовых ответвлениях в висячем крыле основного рудоконтролирующего разлома сформировались две крутозалегающие рудоносные зоны – Апофизы № 1 и № 8 северо-восточного простирания (рис. 2 и 3), протяженностью более 100–300 м. Они представлены линейными штокверками переменной мощности с невысокими, как и в основной залежи Бахмут, варьирующими содержаниями золота. В этих дополнительных рудоносных зонах – апофизах – по результатам бороздового опробования также размещаются протяженные лентовидные и мелкие линзовидные сближенные золотоносные тела, в основном, с бедными и рядовыми рудами.

Наиболее сложная тектоническая обстановка при сдвиге по рудоконтролирующему разлому Бахмут возникла на сочленении зоны Бахмут и Апофиз № 1 и № 8. Блок диоритов висячего крыла основного разлома, сыгравший в процессе сдвига роль упора, оказался значительно нарушенным. Поэтому здесь, в контактовой зоне Ольгинского массива гранитоидов, на этапе раннемеловой тектоно-магматической активизации в висячем боку зоны Бахмут возник сложный узел дополнительных тектонических нарушений. Здесь ниже поверхности сформировались синрудные дайки диорит-порфиритов буриндинского комплекса, а также мощный канал поступления глубинных металлоносных магматогенно-гидротермальных флюидов (рис. 2 и 3). В этой обстановке сформировались не только указанные апофизы, но и наиболее обогащенный золотом рудный столб.

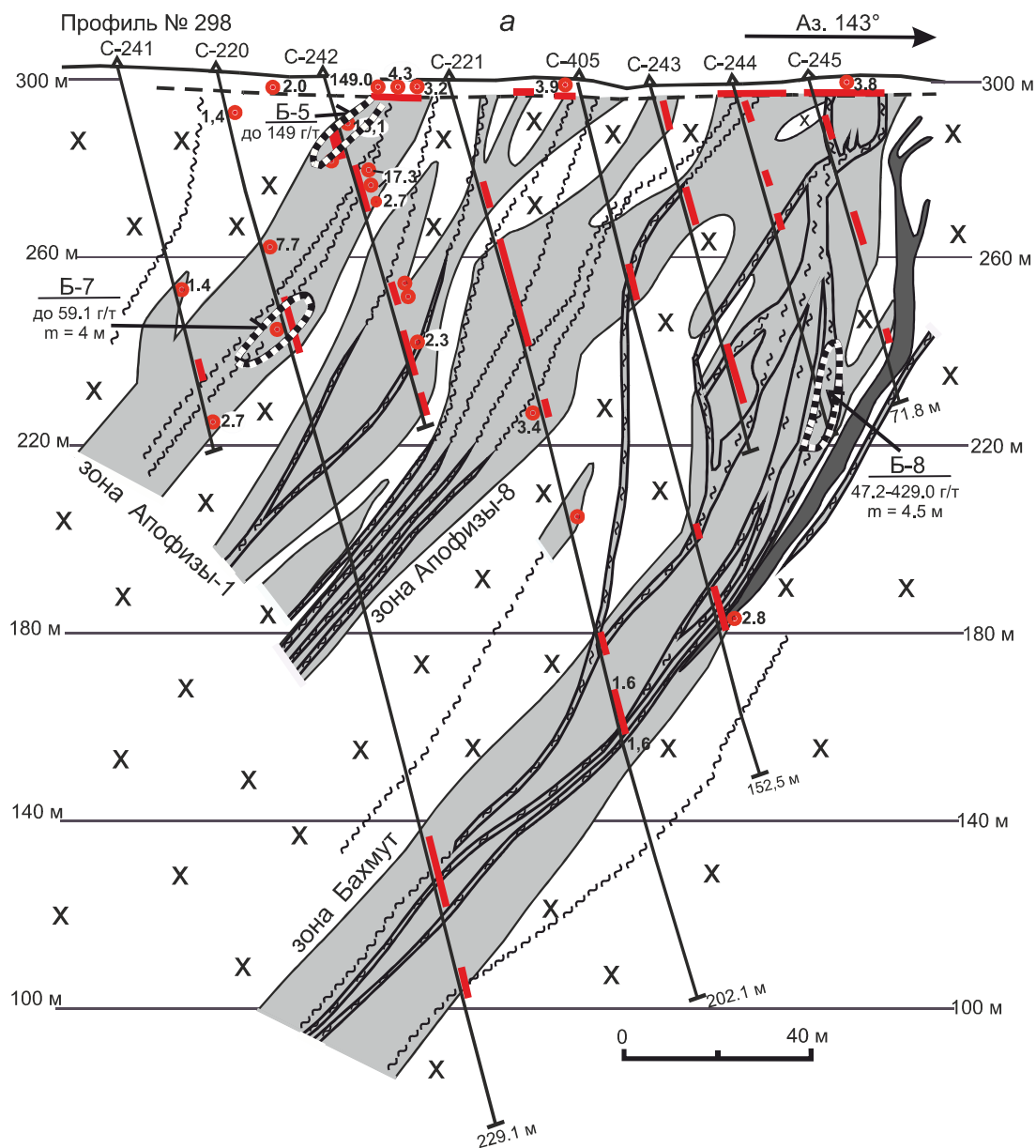
**Рудный столб зоны Бахмут** ассоциирует с начальным (западная часть) отрезком интервала отмеченного изменения простирания рудоконтролирующего разлома. Он размещается между профилями

291–298 и круто погружается на северо-запад по линии сопряжения рудных зон Бахмут и Апофиза-1. В плане форма его в границах принятого бортового содержания золота близка к изометричной, с поперечными размерами около 50–60 м. Содержания золота в пробах рудного столба крайне неравномерные и варьируют от бортового до 512 г/т. Ширина различных рудоносных тел в сечениях по поперечным расчисткам через рудный столб варьирует от 3.5 до 30–45 м, а средневзвешенные содержания, по данным непрерывного бороздового опробования расчисток в сечениях этих тел, на локальных участках повышаются до 2–10 г/т или 18–20 г/т и более. Причём, наиболее высокие содержания золота в пробах встречаются кучно с повышенными и совместно с ними образуют локальные аномально богатые участки, выделенные нами в рудном столбе в качестве бананцев.

#### Бананцы

В составе рудного столба по результатам разведочного опробования расчисток траншеи-2 на сочленении зоны Бахмут и её апофиз нами выделены шесть аномально богатых золотом участков (рис. 2). Размеры их варьируют от  $5 \times 7.5$  до  $15 \times 20$  м. От прилегающих участков рудного столба с рядовыми или несколько повышенными содержаниями они отличаются резко возрастающими содержаниями золота, превышающими их во многие десятки и сотни раз без постепенных промежуточных переходов. В составе единой дискретно обогащенной золотом полосы, вытянутой в северо-восточном направлении, бананцы на поверхности образуют две сближенные группы. Все бананцы удалены на различные расстояния от основного рудоконтролирующего разлома Бахмут в сторону его висячего крыла, а также от сопровождающих его линзовидных тел брекчий с кварцевым цементом и примыкающих к ним зон с максимальным сгущением прожилков кварца. Отметим также, что эти приповерхностные бананцы обычно ассоциируют с выклинивающимися к поверхности маломощными нарушениями (тектоническими швами), узлами их пересечений, а также с участками с умеренным и малым количеством прожилков кварца во вмещающих породах, или даже редкими прожилками мощностью от первых мм до 1–3 см, а не с участками с максимальными их количествами (до 50–100 на 1 п. м, рис. 2).

На приведенных на рисунке 3 фланговых разрезах рудного столба зоны Бахмут по поперечным разведочным профилям № 291 и № 298, по результатам рудничного опробования керна нами выделены глубинные бананцы – 7–9. Они располагаются на глубинах, соответственно, 55 м, 70 м и 145 м от



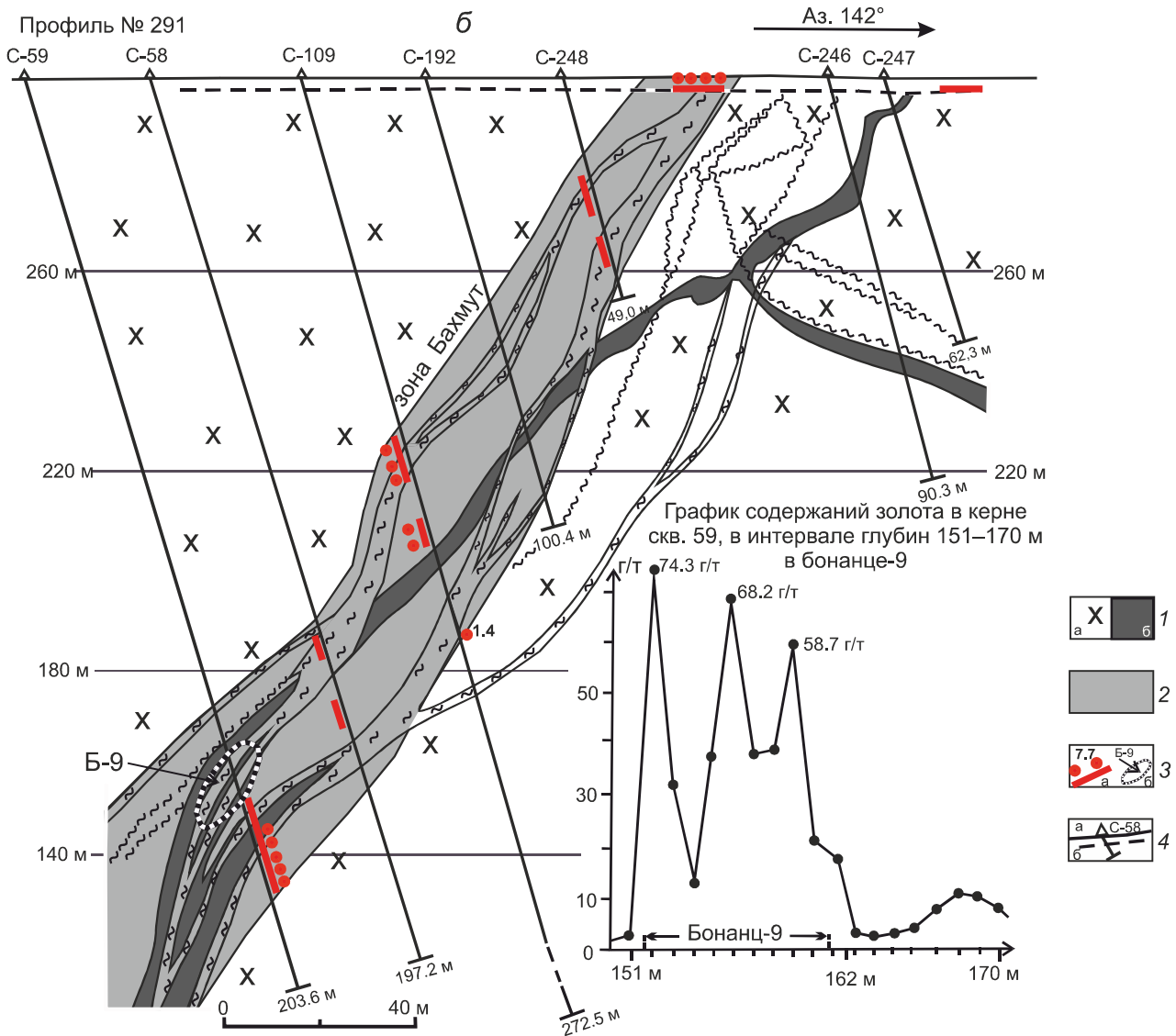
**Рис. 3.** Поперечные разрезы рудного столба зоны Бахмут по буровым профилям № 298 (а) и № 291 (б) (геологическая основа по В.С. Дмитренко, 2007ф).

Условные обозначения см. на рис. 3, б.

поверхности среди первичных рядовых прожилково-вкрапленных руд. Эти бонанцы имеют сходные параметры с поверхностными бонанцами 1–6 и ассоциируются с основными каналами инфильтрации глубинных металлоносных флюидов. Бонанц-9 сформировался на отрезке ещё «компактной» золотоносной зоны Бахмут перед ответвлением от неё апофиз 1 и 8, а бонанцы 7 и 8 – восточнее от него, в условиях повышенной тектонической нарушенности вмещающих пород и отхода этих апофиз в висячем крыле. В особо богатых золотом участках этого рудного столба

геологами-разведчиками в процессе документации расчисток наблюдались видимые золотины различной крупности [2].

На основании проведенного нами общего анализа данных разведки по распределению золота в рудах зоны Бахмут месторождения Пионер намечается отчетливая тенденция системного взаимного пространственного разобщения мест максимального скопления прожилков гидротермального кварца и участков с максимальными концентрациями самородного золота. На макроуровне максимумы крупных скопле-



**Рис. 3.** Поперечные разрезы рудного столба зоны Бахмут по буровым профилям № 298 (а) и № 291 (б) (геологическая основа по В.С. Дмитренко, 2007ф)

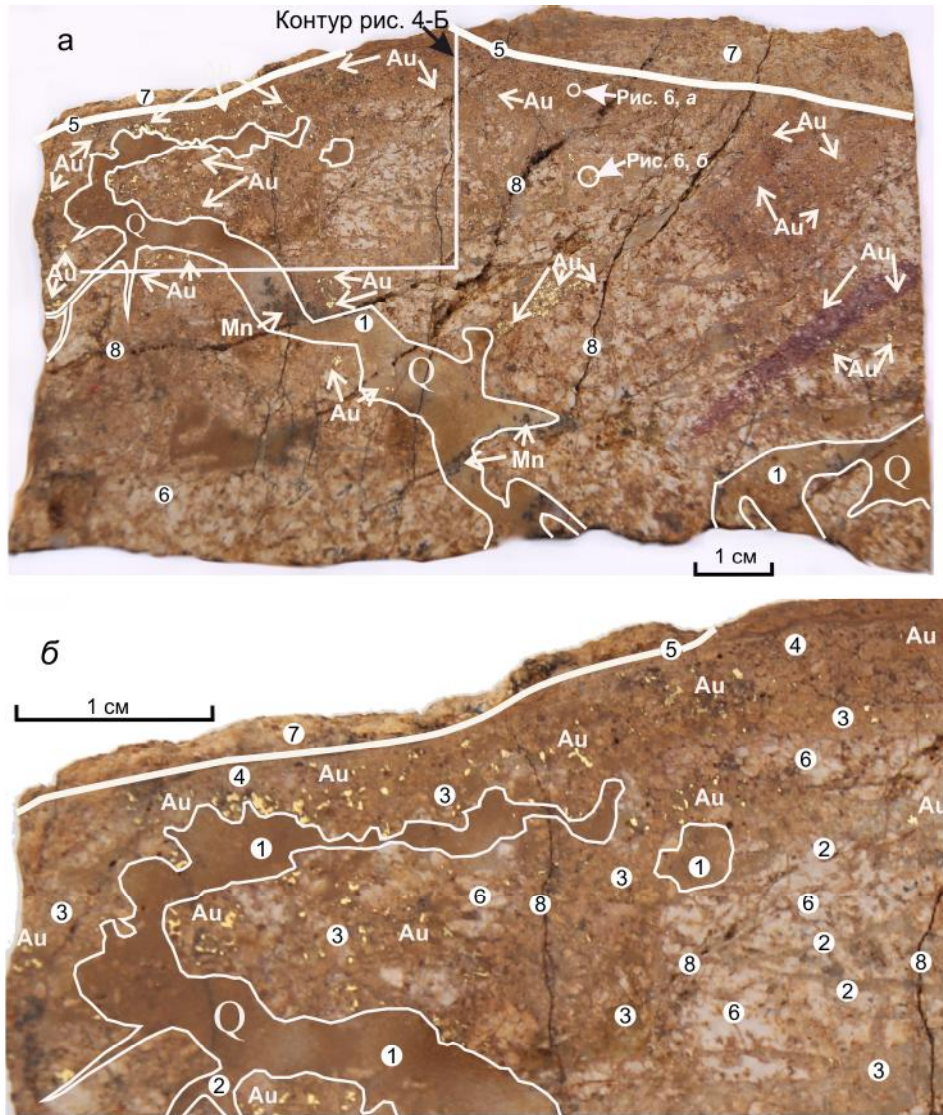
1 – кварцевые диориты (а) и дайки диорит-порфиров (б); 2 – золотоносные зоны по бортовому содержанию 0.4 г/т; 3 – рудоносные интервалы по бортовому содержанию в пробах 1 г/т, аномальные содержания в них отмечены точками (а), бананцы показаны овальными контурами и пронумерованы (Б-5–Б-9); 4 – разведочные скважины и их номера (а), полотно зачисток (б).

ний прожилков кварца концентрируются в основных каналах инфильтрации магматогенно-гидротермальных флюидов вблизи рудоконтролирующего разлома Бахмут, а максимумы отложения и накопления золота, в том числе бананцы, значительно смещены в сторону его висячего крыла (рис. 2), в зону оперяющей его группы нарушений. Возникает вопрос: каковы причины этого? Для получения на него ответа нами дополнительно проведено детальное исследование особенностей распределения индивидов самородного золота в образцах из богатых руд бананцев рудного столба зоны Бахмут.

#### ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДИВИДОВ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА В ОБРАЗЦАХ ИЗ АНОМАЛЬНО БОГАТЫХ РУД

В образцах богатых золотом руд, отобранных из расчисток бананцев рудного столба зоны Бахмут в траншее-2, сульфиды и карбонаты полностью выщелочены. На месте этих минералов (рис. 4 и далее на рис. 6, д) остались пустотки (черное) размерами 0.1–1.0 мм, покрытые пленками оксидов Fe и Mn. В прожилках и гнездах кварца, присутствующих в этих образцах, таких пустот нет. Самородное золото в поперечных приполированных распилах образцов окис-





**Рис. 4.** Размещение видимого золота в штуде-1 из бонанца-2 рудного столба зоны Бахмут (поверхность, расчистка № ). *a* – распил штуда брекчированного диорита ниже линии тектонического шва. Здесь обнаружено около 300 золотин (указаны знаками Au и стрелками); *б* – увеличенное фото фрагмента этого штуда.

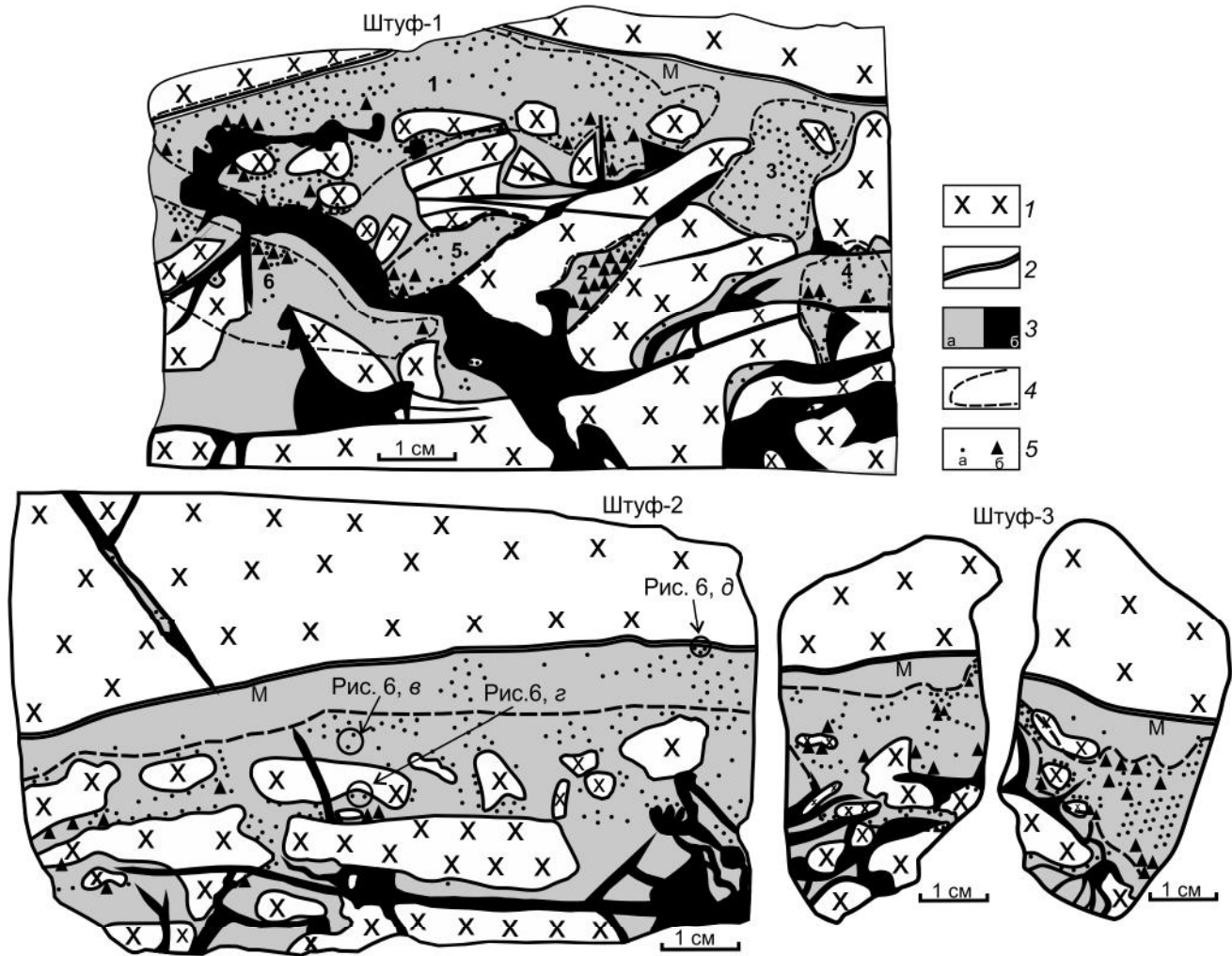
1 – доминирующий прожилок кварца (Q); 2 – его апофизы и сопутствующие тонкие прожилки; 3 – цемент брекчии; 4 – милонит; 5 – тектонический шов; 6 – обломки диорита в брекчии (светлое зернистое); 7 – массивный рудовмещающий диорит; 8 – послерудные кварц-карбонатные прожилки частично выщелоченные, покрытые гидроксидами Fe и Mn.

Белыми окружностями в поле *a* показаны места размещения детальных фото, приведенных на рис. 6, *a* и 6, *б*. Знаком Mn и стрелками в прожилке кварца показаны дендриты окислов марганца.

ленных руд распределено крайне неравномерно, чаще всего на различных удалениях от пустот выщелачивания и трещин с гидроксидами железа и марганца (рис. 4). Отмеченное однозначно свидетельствует о первичной природе золотин в образцах богатых руд и независимом отложении основной массы наблюдаемого самородного золота в эндогенном процессе от сульфидов и карбонатов.

Присутствующие в образцах руд гипергенные гидроксиды и оксиды Fe и Mn неравномерно окра-

шивают их в бурые тона. По этой причине фото полированных срезов штудов (рис. 4, *a*, *б*) получаются недостаточно контрастными. На них визуальнo трудно различимы границы особенно мелких прожилков кварца, положения золотин и даже границы крупных обломков брекчий. Поэтому, для большей информативности нами сделаны схематичные зарисовки срезов с ряда наиболее информативных рудных образцов, на которых по макро- и микроскопическим наблюдениям отображены все важнейшие



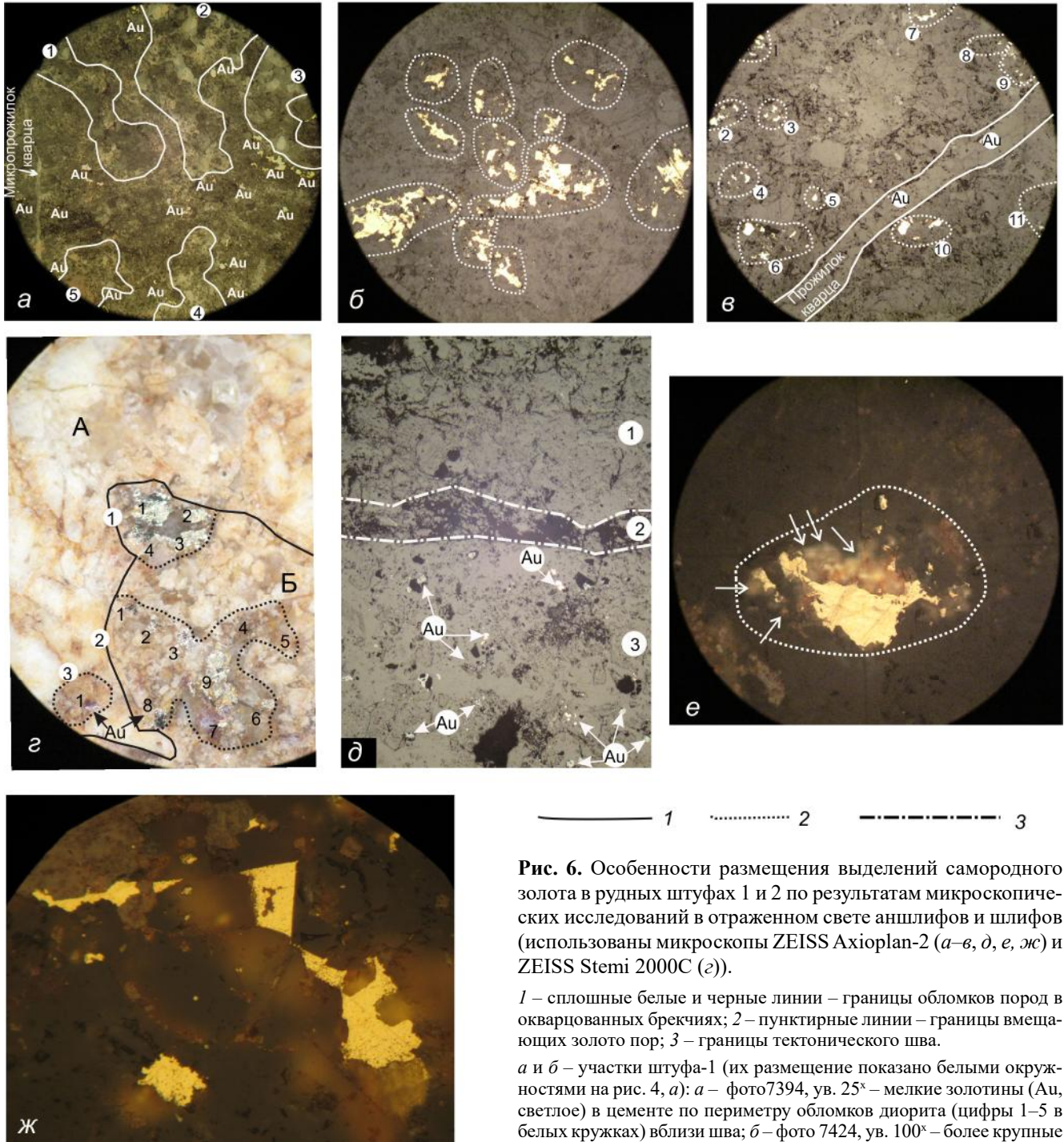
**Рис. 5.** Зарисовки трех золотоносных штуфов из бонанца-2 рудного столба зоны Бахмут месторождения Пионер с распределением видимого золота.

1 – диориты массива и обломков тектонических брекчий; 2 – тектонический шов и прилегающий милонит (М); 3 – окварцованный милонит и цемент брекчий (а) и мелкозернистый кварц прожилков и гнезд, заполнивший полости раскрытия (б); 4 – границы и номера выделенных в штуфе-1 полей (1–6) концентрации золотин; 5 – крупность золотин: а – 0.1–0.3 мм, редко до 0.6 мм, б – 0.7–2.0 мм.

элементы их строения (обломки пород мельче 1–2 см на зарисовках по техническим причинам не показаны). Места размещения кварцевых тел заполнения полостей раскрытия и золотин на зарисовках максимально соответствуют их реальному расположению в исходных образцах руд. Это видно при сопоставлении фото штуфа-1 и его зарисовки, соответственно, на рисунках 4, а и 5. Размеры золотин на зарисовках схематично показаны в двух градациях (условные обозначения на рис. 5).

Зарисовка поперечного среза крупного штуфа 1 (рис. 5) площадью около 84 см<sup>2</sup> из богатого самородным золотом бонанца-2 рудного столба зоны Бахмут иллюстрирует главные особенности размещения большого числа его индивидов в рудах. Все золоти-

ны в нём сосредоточены под экранирующим блоком монолитных слабо альбитизированных кварцевых диоритов, непосредственно в зоне их брекчирования ниже тектонического шва. Оба эти типа пород разделены относительно пологим (угол ~40°–50°) тектоническим швом с окварцованными милонитами мощностью до 1–2 см. Ниже тектонического шва, на некотором от него расстоянии, среди окварцованного цемента брекчий выклинивается система взаимосвязанных, различно ориентированных, невыдержанных по мощности и залеганию прожилков и гнезд тонкозернистого массивного кварца, выполняющего полости раскрытия трещин отрыва и скола. Для простоты изложения особенностей распределения золота в срезе штуфа-1 и акцентирования внимания читателей



**Рис. 6.** Особенности размещения выделений самородного золота в рудных штуфах 1 и 2 по результатам микроскопических исследований в отраженном свете аншлифов и шлифов (использованы микроскопы ZEISS AxioPlan-2 (а-в, д, е, ж) и ZEISS Stemi 2000C (з)).

1 – сплошные белые и черные линии – границы обломков пород в окварцованных брекчиях; 2 – пунктирные линии – границы вмещающих золото пор; 3 – границы тектонического шва.

а и б – участки штуфа-1 (их размещение показано белыми окружностями на рис. 4, а): а – фото 7394, ув. 25<sup>х</sup> – мелкие золотины (Au, светлое) в цементе по периметру обломков диорита (цифры 1–5 в белых кружках) вблизи шва; б – фото 7424, ув. 100<sup>х</sup> – более крупные золотины в порах в цементе брекчии на большем удалении от шва;

в–д – участки штуфа-2 (их размещение показано черными окружностями на рис. 5): в – фото 7421, ув. 25<sup>х</sup> – золотины в порах цемента (номера 1–11) под экраном милонита; з – фото 6891, ув. 25<sup>х</sup> – золотины в порах в цементе брекчии (поле Б) под экраном обломка диорита (светлое, поле А); д – фото 6833, ув. 25<sup>х</sup> – мелкие золотины (Au) в милоните (3) под экраном тектонического шва (2) и массивного диорита (1); е и ж – участки тонких приполированных пластин и шлифа: е – фото 7434, ув. 500<sup>х</sup> – в срезе частично вскрытая пора с золотиной (светлые участки). В глубине просматривается её комковидное продолжение в виде агрегата овоидов размерами 1–8 мкм (показаны стрелками), некоторые из них частично вскрыты; ж – фото шлифа 6846, ув. 500<sup>х</sup> – интерстициальные золотины в окварцованном цементе брекчии с индукционными границами на контактах с кристалликами кварца. В межзерновом пространстве видны так же наноовоиды золота и их сроски.

на размещение раздувов прожилков кварца или суммарные мощности их серий, наиболее крупное из взаимосвязанной системы кварцевых тел выполнения (Q) на рисунке 4, а, косо ориентированное, изгибающееся и выклинивающееся при сближении с тектоническим швом, выделено нами в этом образце в качестве условного ориентира под названием «доминирующая полость раскрытия трещин» (ДПРТ). Остальные более мелкие кварцевые тела, оперяющие её или субпараллельные ей, будем считать апофизами и сопровождающими рядовыми прожилками и гнездами. Преобладающее их количество залегает субпараллельно тектоническому шву. Раздувы полостей и максимумы интегральных мощностей прожилков заполняющего их кварца, а также места сгущения крупных прожилков, мы считаем индикаторами локальных мест значительного падения давления флюида в гидротермальной системе и возможного максимального пересыщения флюида золотом и другими компонентами, а также местом появления и начала всплывания нанозарождений гидрофобного [15], самородного золота, в составе их ассоциатов с одновременно выделяющимися при кипении флюида пузырьками газовой фазы [14].

Все кварцевые тела выполнения полостей раскрытия в метасоматически окварцованном цементе брекчий имеют четкие границы. Под микроскопом видно, что с висячих боков, особенно вблизи выклинивания ДПРТ, они сопровождаются субвертикальными или крутонаклонными микротрещинками (рис. 6, а, в) и сериями взаимосвязанных микропор в цементе брекчий (рис. 6, б-г), заполненных микрозернистым кварцем. Многие из таких пор и их сближенные группы в цементе содержат в интерстициях агрегата тонкозернистых кристаллов заполняющего их кварца по несколько (от 1 до 9) золотинок разных размеров в каждой (показано далее на рис. 6, б, в и в поле Б на рис. 6, г).

Видимые золотины на срезе штуфа 1 (рис. 4, а), а их здесь свыше 300, имеют размеры от  $\leq 0.01$  мм до 1 мм, редкие из них достигают 1.5–2 мм. На зарисовке среза этого штуфа (рис. 5) выделено шесть обособленных полей сгущения золотинок.

*Поле-1* наиболее крупное. Оно располагается в верхней части плоскости среза штуфа-1, в основном, выше висячего зальбанда заполненной кварцем выклинивающейся ДПРТ и от её разворота прослеживается вправо пологой полосой под совмещенным экраном из малопроницаемых массивных кварцевых диоритов и милонитов тектонического шва. В этом поле присутствует свыше ста золотинок различной величины. Лишь часть более крупных из них отчетливо видны на фото этого штуфа (рис. 4, а) и его фрагмента

(рис. 4, б). Большая часть золотинок этого поля, фактически, размещается в верхней приконтактной части заполненной кварцем ДПРТ, резко изменившей свое направление перед выклиниванием, исключительно среди окварцованного цемента брекчий и частично в милонитах под экраном тектонического шва. Многие золотины этого поля концентрируются в цементе брекчий в виде цепочек под обломками. В левой части этого поля (рис. 4, б), вблизи верхнего разворота и нижней части верхней приконтактной зоны выклинивающейся ДПРТ, в более крупных порах цемента брекчий сформировались наиболее крупные индивиды золота. Выше и, особенно, в удаленной от неё правой части поля-1 сформировались рои более мелких золотинок (рис. 6, а, б; места их съемки показаны на рис. 4, а). В основном золотины верхней части этого поля, проникшие наиболее высоко сквозь «пористое сито» цемента брекчий и, особенно, в микропористый милонит, имеют минимальные размеры ( $\leq 0.01$ – $0.2$  мм).

*Поле-2* весьма локальное и самое богатое крупными золотинами, которые сосредоточены в его нижней части. Это поле (рис. 4 и 5) размещается непосредственно в висячей экзоконтактной зоне главного раздува ДПРТ в прилегающей наклоненной узкой линзе метасоматически окварцованного цемента брекчий под экранирующим обломком монолитного диорита. Крупные золотины образовались в интерстициях кристаллов метасоматического кварца, заполнившего крупные поры, возникшие среди среднезернистого цемента на минимальном удалении от раздува жильной полости. Можно полагать, что тонкозернистая фракция проницаемого цемента еще на начальном этапе его окварцевания была вымыта потоком флюида, образовав крупные поры, и перемещена в верхнюю узость канала, образовав дополнительный локальный, более плотный экран. Под ним поле-2 золотинок резко выклинивается. Соотношение объемов *золото: кварц* в этом поле близко  $1:1.6 \div 2$ .

*Поле-3* в верхней правой части штуфа в цементе имеет вид вертикального роя частиц золота, проникших между обломков диорита брекчий до тектонического шва. Располагается оно вблизи правого фланга поля-1, выше верхних выклиниваний всей системы мелких апофиз ДПРТ, сопровождающих её прожилков и гнезд кварца. Золотины этого поля размещаются в сериях сближенных взаимосвязанных пор среди окварцованного цемента брекчий. Единичные мельчайшие ( $< 0.01$  мм) частицы золота наблюдаются и выше, в окварцованных милонитах притирания тектонического шва. Это поле максимально удалено вверх от центра ДПРТ. Видимо поэтому в нем пре-

обладают золотины, имеющие минимальные размеры ( $\leq 0.01-0.2$  мм).

*Поле-4* локальное. Оно расположено ниже поля-3, в цементе брекчии вблизи выклинившихся апофиз ДПРТ. Из 27 обнаруженных здесь золотинок лишь три, наиболее приближенные к прожилку и гнездовому обособлению (раздуву) кварца в нижней части поля, являются более крупными (0.7–0.9 мм). Все золотины этого поля размещаются так же в интерстициях микрокристаллов кварца, заполняющих рой пор в цементе окварцованной брекчии.

*Поле-5* располагается вблизи поля-2, так же в висячей экзоконтактной зоне ДПРТ над прогнутой частью раздува. Это поле локальное. Сформировалось оно в цементе брекчии под экранирующими обломками диоритов. Верхние золотины этого поля наиболее мелкие, а некоторые из нижних, расположенные ближе к выположенному висячему контакту заполняющего ДПРТ кварцевого тела, то есть к основному каналу поступления флюидов вблизи максимума раскрытия полости – крупнее 1 мм.

*Поле-6* включает золотины лежачей экзоконтактной зоны ДПРТ. Они ассоциируют с апофизами её лежачего бока, размещаясь над ними. Здесь численно преобладают более мелкие золотины. Локализованы они исключительно в цементе брекчий выше выклинивания оперяющих апофиз, сопровождающих ДПРТ маломощных кварцевых прожилков и гнездообразных обособлений кварца в её лежачем боку, то есть на участке дополнительного снижения давления и вероятного кипения флюида.

Ниже всех охарактеризованных полей скопления золотинок в штуфе-1 присутствуют еще не более десятка разрозненных мельчайших золотинок. Они так же размещаются в цементе брекчий. В обломках массивных диоритов брекчий золотины не обнаружены. Не свойственны они и всем кварцевым телам заполнения полостей раскрытия трещин. В этом штуфе обнаружены лишь три мелкие золотины в кварце, заполняющем ДПРТ (см. нижнюю часть штуфа-1 на рис. 5). Эти золотины в мелкозернистом жильном кварце также ассоциируют с двумя мелкими фрагментами цемента. Таким образом, в срезе описанного штуфа-1 **наблюдается явное вертикальное разобщение в размещении прожилков кварца** (то есть бывших полостей раскрытия трещин) **и выделений самородного золота**. Скопления первых размещены ниже, а основные скопления вторых, однозначно, выше – среди проницаемого цемента брекчий. Резко преобладающее количество золотинок в срезе этого штуфа (~99 %) размещено в метасоматизированном цементе брекчий выше доминирующей полости раскрытия трещин и

заполняющих её кварцевых тел и, соответственно, выше мест сосредоточения её апофиз и сопутствующих гнезд отложенного кварца и взаимосвязанных с ним мелких прожилков кварца.

На рисунке 5 пологий тектонический шов с милонитом делит штуф-2 на две почти равные части. Выше этого шва в диоритах размещается единственный оперяющий его крутозалегающий прожилок тонкозернистого кварца мощностью около 2–3 мм, представленный своей нижней частью. В осевой части этого прожилка размещается локальная линзочка милонита. Несколько мельчайших золотинок размещаются в верхней и нижней частях этой линзы милонита. Непосредственно в милонит тектонического шва этот кварцевый прожилок не проникает, но примыкает к шву. Отсутствие пустот выщелачивания в этом кварцевом прожилке свидетельствует о том, что сульфиды и карбонаты в нем не отлагались.

Нижняя половина этого штуфа сложена брекчий диорита с серией взаимосвязанных прожилков кварца, заполняющих малообъемные полости раскрытия. Прожилки невыдержанны по мощности и залеганию, локализованы в трещинах отрыва. Они располагаются, в основном, в цементе, либо по контактам обломков и цемента, но некоторые из них проникают в обломки брекчии или пересекают их. Это является свидетельством дополнительной деформации ранее сформировавшихся брекчий на синрудном этапе.

Основное количество золотинок в штуфе-2 так же размещаются в цементе брекчии группами. Они располагаются в порах, в основном, на уровнях выше выклинивания всех прожилков кварца, часто в ассоциации с крутозалегающими микропроводниками флюида. Последние, как и поры, позднее заполнялись кварцем. В одном таком микропроводнике наблюдаются два микровключения золота (рис. 6, в). Во всех обломках брекчий штуфа-1 (рис. 4, 5 и рис. 6, а), штуфа-2 (рис. 5 и в поле А на рис. 6, з) и в других изучавшихся штуфах золотины нами не встречены. Меньшая часть золотинок, представленная группами зерен мельчайших размеров, размещена в милонитах вблизи тектонического шва (рис. 6, д). В размещении индивидов золота в штуфах отчетливо заметно экранирование их обломками брекчии (штуф-2 на рис. 5, и поле А на рис. 6, з) и милонитами тектонического шва (рис. 6, д).

В штуфе-3 (рис. 5), как и в первых двух, а также в других образцах, золотины размещаются аналогично, только в сериях пор в окварцованном цементе брекчий выше мест выклиниваний ближайших прожилков кварца и их раздувов.

Подобное неравномерное распределение самородного золота на участках с богатыми рудами на-

блюдались также в ряде случаев в процессе разведки различных зон этого месторождения (В.С. Дмитренко и др., 2007ф). В прожилках кварца отмечались редкие мелкие золотины (~0.003 мм), а в прилегающих метасоматизированных породах иногда встречались прерывистые скопления вкраплений видимого золота шириной до 20 см, прослеживающиеся на 20–25 м. Таким образом, на основании совокупного рассмотрения пробирных анализов проб из разведочных выработок и керн скважин, полевых геологических наблюдений и результатов минералогических исследований образцов руд можно констатировать, что на главной продуктивной стадии эндогенного рудного процесса имело место разделение в пространстве и времени мест отложения скоплений кварца и золота. Кварц отлагался длительно в полостях, а золото – кратковременно (эпизодически, в периоды раскрытия и при последующих дораскрытиях полостей) в основном за их пределами в тектонитах висячих боков. Очевидно, в предрудное время метасоматический кварц частично замещал участки наиболее проницаемого цемента брекчий. В последующем, при подновлении нарушений, повышении трещиноватости и брекчировании прилегающих пород, раскрытиях пор в цементе и более крупных полостей в тектонитах, особенно со стороны висячих боков раскрывшихся полостей, на продуктивной стадии минерализации в порах цемента под экранами обломков и тектонических швов отлагалось золото. Затем мелкокристаллический кварц полностью заполнял полости пор и раскрывшихся флюидопроводящих трещинных каналов.

#### **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

##### **Природа скоплений самородного золота в рудах**

В публикациях по формированию гидротермальных месторождений золота исследователями обычно обсуждаются два возможных процесса формирования богатых руд – эндогенный и экзогенный. Первый из них позволяет предполагать телескопирование (пространственное совмещение нескольких последовательных продуктивных парагенезисов разных стадий), либо интенсивное проявление одной главной продуктивной стадии в наиболее благоприятных обстановках и рудолокализации [15, 25]. Второй процесс позволяет предполагать интенсивное гипергенное окисление первичных руд с выщелачиванием сульфидов и карбонатов, перераспределение и укрупнение присутствовавшего в них дисперсного эндогенного золота [9, 25]. В таких случаях обычно считают, что богатые экзогенные накопления золота размещаются в рудах подзоны цементации зоны окисления, в парагенезисе со вторичными оксидными минералами.

Приведенные выше результаты макро- и микроскопических исследований полированных распилов образцов руд, отобранных из бонанцев на поверхности и изготовленных из них шлифов и аншлифов показали, что почти все золотины располагаются в интерстициях метасоматического тонкозернистого кварца в порах окварцованного цемента брекчий (рис. 6), плотно контактируя с его кристаллами. Наблюдения показали, что около 99 % золотины в изученных образцах богатых руд (рис. 4 и 5) находятся, в том числе группами, на значительных удалениях от пустот выщелачивания сульфидов и карбонатов и непосредственно не контактируют с присутствующими в рудах скоплениями гипергенных оксидов и гидроксидов Fe и Mn. Трещины выщелачивания, покрытые гидроксидами и оксидами Fe и Mn, занимают секущее положение относительно полей скопления видимых золотины и, как показано на рисунке 4, сами золотины они обычно не содержат. При наблюдаемом обилии золотины в цементе окварцованных брекчий, в обломках брекчий они не наблюдаются. Это указывает на четкую избирательность размещения выделений самородного золота в исходно высокопроницаемых тектонитах на эндогенном этапе, а также на их независимость от количества и распределения вторичных минеральных парагенезисов в рудах. Изложенное однозначно свидетельствует о формировании участков богатых золотом руд (бонанцев) месторождения Пионер на эндогенном этапе. Приведенная аргументация в пользу остаточной эндогенной природы скоплений золота может быть усилена следующими дополнительными фактами. По результатам разведочного бурения и опробования всех рудоносных зон месторождения, локальные участки богатых руд в зоне Бахмут и в других рудоносных зонах месторождения Пионер обнаружены в интервале глубин разведки до 360 м от поверхности [2], то есть и на тех глубинах, где заведомо нет признаков окисления руд. Это также следует и из данных нашего анализа результатов сплошного разведочного опробования керн скважин по фланговым разрезам № 291 и № 298 рудного столба зоны Бахмут. В некоторых скважинах на фоне рядовых первичных руд нами выделены аномально обогащенные золотом рудные гнезда и бонанцы-7–9, показанные на рисунке 3.

##### **Об условиях формирования богатых золотом руд месторождения Пионер**

На основании изложенных фактов по особенностям размещения самородного золота в объеме рудной зоны Бахмут и в изучавшихся образцах руд, мы полагаем, что формирование аномально богатых участков рудного столба в этой и в других рудоносных зонах

месторождения могло происходить следующим образом. Постколлизийная тектоно-магматическая активизация северной части Амурского микроконтинента, в том числе входящей в нее территории рудного поля Пионер, завершилась внедрением в длительно формировавшиеся разломные зоны даек и штокообразных тел диоритовых порфиринов раннемелового буриндинского комплекса, с которыми в парагенетической связи, по [2], формировалось золотое оруденение. Одновременно с этими процессами и несколько позднее в протяженных рудоконтролирующих зонах дробления, особенно на участках их искривления по падению и простиранию, при проявлении неоднократных сдвиговых перемещений, сжатий и растяжений происходили дополнительные локальные перемещения прилегающих разновеликих блоков нарушенных пород. По их границам и внутри этих блоков, в том числе и в предрудных дайках, возникали брекчии, тектонические швы (подобные показанным на рис. 4 и 5), зонки милонитов, поры, трещины скола и отрыва и полости их раскрытия. Во всех таких нарушенных проницаемых участках флюиды производили метасоматоз пород, отлагали сульфиды, самородное золото, формировали прожилки кварца и карбонатов.

При динамичных тектонических и, в соответствии с [11, 12], возможных гидравлических раскрытиях и дораскрытиях полостей в гидротермальной системе на участках приращения свободного объема неоднократно резко снижалось давление флюида. Именно это являлось основной причиной неоднократного вскипания флюида и проявления серии сопряженных процессов – их фазовой гетерогенизации, дегазации, ощелачивания, адиабатического снижения температуры. Как следствие этих процессов, флюиды пересыщались многими растворенными в них компонентами, в том числе комплексами золота и кремнеземом, что, в соответствии с [4, 5, 15, 31, 34], приводило к активному минералоотложению.

### **О возможности твердофазной миграции золота**

Как было отмечено выше, ряд исследователей, начиная со времени проведения в 30-х годах прошлого века С. Фронделлом (FrondeU) [19] экспериментов по формам переноса флюидами золота, помимо растворимых форм золота, акцентировали внимание на возможности твердофазного механического его переноса восходящими термальными водными потоками в виде золь коллоидных частиц и гелей, как это реально наблюдается на уровнях снижениях Р-Т параметров флюида в скважинах, вскрывших современные геотермальные системы [1, 20, 21, 30, 36]. Некоторые исследователи также полагают, что такой перенос золота может сопровождаться образованием и

отложением мелких кристаллических пластин золота треугольной и шестиугольной форм, а также овоидов, палочек и более сложных образований [18, 20, 22, 25, 31, 33, 34]. Очевидно, что главное условие появления наночастиц золота в гидротермальных системах – это значительный сброс давления, вскипание и пересыщение флюида золотом [1, 4, 5, 20, 21, 24, 25, 36].

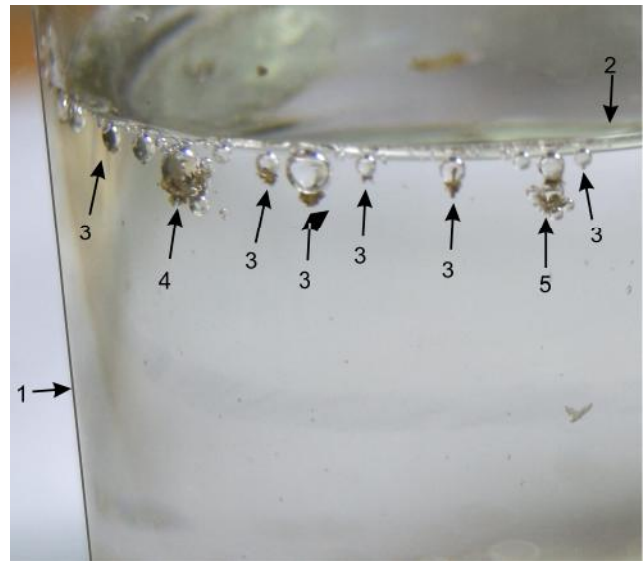
Наша версия возможного твердофазного переноса золота несколько иная. Падения давления при раскрытиях полостей в гидротермальных системах, несомненно, вызывали кипение, гетерогенизацию и пересыщение флюидов растворимыми комплексами металлов и газами. При этом происходило одновременное образование паро-газовых пузырьков и зарождение твердых наноминеральных фаз, в том числе нанозарождений самородного золота [6, 10, 14]. Одновременное выделение из пересыщенного флюида массы пузырьков газовой фазы и нанозарождений самородного золота, характеризующегося, как известно [15, 16], высокой гидрофобностью поверхности индивидов, могло приводить к образованию ассоциатов состава «Au<sub>кр</sub> + пузырьки газа», обладающих подъемной силой и, следовательно, способных к всплыванию и автономному опережающему перемещению в жидкой фазе на более высокие уровни проницаемых структур (то есть, естественной газовой флотации самородного золота) [10, 14]. В результате этого, в зоне рудоформирования во флюидах, в дополнение к общепризнанным водорастворимым ионным формам миграции золота в комплексах с хлором, серой и другими лигандами и коллоидов, могла появиться и, несомненно, появлялась также другая твердофазная форма миграции золота – в виде кристаллических наночастиц и кластеров самородного золота в составе указанных ассоциатов на более высокие уровни рудонакопления. Это обосновывалось нами для ряда жильных месторождений золота Приамурья и других регионов [10, 14]. Такое предположение согласуется и с наблюдаемыми нами на штокверковом месторождении Пионер (рис. 4 и 5) в рудных образцах смещениями вверх полей концентрации золотин в рудах относительно эпицентров локализации скоплений прожилков кварца, раздувов их мощности или максимумов интегральных суммарных полостей раскрытия трещин.

К настоящему времени установлено [21, 22], что на разных уровнях кипения флюида в скважинах геотермальной системы Рейкьянес от 45 до 94 % золота от общего его количества во флюидах находится (и механически переносится) в твердофазной коллоидной форме. В работе [4, с. 138] показано, что при сбросе давления, кипении и пересыщении флюидов «отрицательно заряженные частицы коллоидного зо-

лота при увеличивающейся концентрации NaCl до 20 % перезаряжаются и становятся положительными, ... способными к быстрой коагуляции и кристаллизации, особенно при изотермическом снижении давления». А это именно те условия, которые возникают в геотермальных скважинах на уровнях кипения флюида непосредственно выше мест подтока в скважины пластовых и трещинных терм в прогретых термостатированных породах геотермальных систем. В разделе «Введение» мы отметили наблюдения исследователями фактов реального отложения кристаллических частиц золота на стенках и на пробоотборниках при отборе проб кипящей воды в геотермальных скважинах и на их сливном оборудовании на поверхности. Можно полагать, что в разные геологические эпохи подобный твердофазный перенос золота мог происходить во флюидопроводящих тектонических зонах различных рудоформирующих структур и рудных полей на участках раскрывшихся трещин и дораскрывшихся полостей. Изложенное является основанием полагать, что миграция золота на ранних высокотемпературных этапах становления гидротермальных систем происходит в растворимых формах, а на завершающих стадиях рудообразования и рудонакопления, при значительных понижениях Р и Т, в эволюционирующих флюидах возникали условия для появления твердофазных (коллоидной и кристаллической) форм его переноса, что способствовало формированию более богатых руд золота, в том числе появлению бананцев.

#### ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ГАЗОВОЙ ФЛОТАЦИИ НАНОЗАРОЖДЕНИЙ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА В ФОРМИРОВАНИИ БОГАТЫХ РУД В ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

В простом эксперименте нами смоделирован процесс естественной газовой флотации самородного золота [7]. При нагревании на песчаной бане стеклянного сосуда с золотиными размером 0.1–0.3 мм, заполненного бидистиллятом  $H_2O$ , уже при  $50^\circ C$  на золотиных начинают появляться мелкие газовые пузырьки. Через несколько минут последующего нагрева и укрупнения пузырьков, ассоциаты «Au + газ» начали всплывать к поверхности сосуда. Еще более активно такой перенос мелких золотиных выделяющимися пузырьками  $CO_2$  наблюдался нами в экспериментах с водной фазой, насыщенной  $CO_2$  при незначительном нагреве (рис. 7), а также без применения подогрева. Следовательно, в естественном рудоформирующем гидротермальном процессе обязательно следует учитывать и такую твердофазную форму переноса зарождений самородного золота – в составе его ассоциатов с пузырьками газа. Как было отмечено выше, они образуются благодаря такому феноменальному свой-



**Рис. 7.** Результат лабораторного эксперимента газовой флотации золотиных в процессе слабого нагрева на водяной бане ( $30\text{--}40^\circ C$ ) сосуда с насыщенной  $CO_2$  водной фазой и помещенной на его дно фракцией самородного золота крупностью 0.1–0.3 мм

1 – стеклянный сосуд, заполненный насыщенной  $CO_2$  водой; 2 – мениск поверхности водного слоя; 3–5 – всплывшие к поверхности водного слоя ассоциаты «Au<sub>кр</sub> + пузырьки  $CO_2$ »: с единичными золотиными (3), то же – с дополнительными мелкими газовыми пузырьками, закрепившимися на золотиных (4), ассоциат-гирлянда из двух крупных пузырьков газа и множества золотиных, на которых находятся несколько мелких пузырьков газа (5).

ству поверхности самородного золота, как высокая её гидрофобность (или газофильность). Ещё больше это свойственно наночастицам золота, обладающим более высокой удельной поверхностью. Другими исследователями такая форма миграции золота в процессе рудообразования пока не учитывается. Лишь в работе В.Ю. Прокофьева с соавторами [29] на основании обнаружения в газовых включениях в жильном кварце множества наночастиц золота сделано предположение о возможности твердофазного переноса золота с глубин в зону минералоотложения газовыми пузырьками, содержащими 98 %  $CO_2$ .

На детально изучавшемся участке рудного столба зоны Бахмут нами установлено, что всплывающие ассоциаты могли перемещаться вверх по раскрывшимся полостям (рис. 4 и 5), затем проникать по субвертикальным и крутонаклонным каналам-микротрещинам (рис. 6, а, в) и по системам сопряженных пор в вышележащие флюидопроницаемые тектониты всяческого бока. Всплывание, рассредоточение и накопление золотоносных ассоциатов в порах цемента брекчий завершалось под различно удаленными не-



проницаемыми для флюидов препятствиями – микро- и макроэкранами. Такие экраны, в масштабах изученных образцов, представлены, соответственно, верхними стенками пор (рис. 6, б–г, е), обломками плотных пород брекчий (рис. 4, 5, 6, а, поле А на рис. 6, г) и малопроницаемыми или непроницаемыми милонитами тектонических швов (рис. 4, 5 и 6, д).

В процессе всплывания ассоциатов в объеме полостей с пересыщенным флюидом, нанозарождения золота, очевидно, продолжали свой рост, а после их накопления в крупных порах или непосредственно под экранирующими обломками в брекчиях они могли агрегироваться в кластеры и более крупные индивиды размерами от 0.1 до 2.0 мм, как это наблюдается на некоторых участках образцов (рис. 4, 5). Под кристаллизационным давлением дорастающих зерен кварцевого агрегата такие золотины в крупных порах могли приобретать индукционные грани. В срезах штуфов контуры таких золотин имеют прямолинейные участки на контактах с совместно растущими кристаллами кварца (рис. 6, ж). Не участвовавшие в таком агрегировании одиночные ассоциаты в микропорах (рис. 6, а, д, ж) и в периферических частях некоторых более крупных пор (рис. 6, б, в) сохраняют первичную овоидную форму или лишь слабо деформировались при последующих тектонических пароксизмах (рис. 6, д).

Предложенная модель естественной газовой флотации нанозарождений самородного золота в формировании богатых руд находится в хорошем соответствии с ранее опубликованными данными о резко аномальном обогащении газовой фазой флюидных включений в самородном золоте из руд многих золото-кварцевых месторождений мира, по сравнению с флюидами из включений в одновременно отлагавшемся с ним кварце [5, 8, 12–15]. Так, по результатам совокупного анализа флюидных включений методами водных вытяжек и газовой хроматографии по методике, изложенной в [5], в самородном золоте и в кварце продуктивной стадии из руд жильного месторождения Токур (Приамурье) нами [14] было установлено, в среднем, 13-кратное относительное обогащение газовой фазой флюидов из включений в самородном золоте, по сравнению с флюидами из включений в кварце единого парагенезиса. Очевидно, формированию богатых руд в жилах месторождения Токур, залегающего в алевроаргиллитах, также благоприятствовали тектонический фактор и фактор естественной газовой флотации формирующихся наночастиц самородного золота от мест их зарождения на более высокие уровни жилонесущих полостей, до участков экранирования малопроницаемыми породами и выклинивания жил.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ материалов разведки штокового месторождения Пионер и, особенно, детальных материалов по разведке рудоносной зоны Бахмут, позволил установить следующее. Основные концентрации золота размещаются в висячих крыльях главного рудоконтролирующего и оперяющих его разломов, особенно на участках изменения их простираний и углов падений. Это характерно и для других рудоносных зон месторождения Пионер. Руды по качеству варьируют от бедных и рядовых до высокоаномальных. Последние образуют в рудных столбах бонанцы.

Проведенными нами исследованиями особенностей локализации выделений самородного золота в образцах руд из аномально богатых бонанцев приповерхностной части рудного столба зоны Бахмут, а также в богатых золотом глубинных интервалах керна некоторых разведочных скважин его фланговых разрезов, установлено следующее:

1 – природа богатых скоплений частиц самородного золота, в том числе и на приповерхностных уровнях этого месторождения, несомненно, гипогенная. Они накапливались в одну главную тектонически динамично развивавшуюся, наиболее продуктивную золото-кварцевую стадию;

2 – во всех изученных образцах богатых руд (рис 4, 5 и др.) отчетливо наблюдается повторяющееся пространственное смещение локальных полей накопления частиц самородного золота вверх относительно мест размещения максимумов мощности крупных прожилков кварца и мест их скоплений. Такие участки изначально, при раскрытиях трещин, являлись основными каналами инфильтрации рудообразующего флюида, местами падения его давления, гетерогенизации, появления нанозарождений золота и начала всплывания его ассоциатов, а в последующем – вместилищами взаимосвязанных систем прожилков кварца;

3 – скопления золотин обычно размещаются в вышележащих, относительно кварцевых тел, флюидопроницаемых тектонитах под различными экранами, представленными верхними ограничениями отдельных или серий взаимосвязанных пор, обломками плотных пород и тектоническими швами с милонитами, а также под малопроницаемыми блоками ненарушенных и слабонарушенных вмещающих пород. При этом отчетливо просматриваются две следующие тенденции: а – постепенное уменьшение размера золотин по мере удаления вверх от эпицентров «интегральных» полостей раскрытия трещин и заполняющих

их кварцевых тел до различно удаленных непроницаемых экранирующих поверхностей; б – отчетливая сближенность полей концентрации золотин с раздувами мощности таких сложных полостей, впоследствии вместивших основные кварцевые прожилки, их апофизы и сопровождающие мелкие прожилки и гнезда кварца;

4 – в более крупных прожилках кварца и в раздувах их мощности золотины обычно отсутствуют. Лишь редкие и единичные наиболее мелкие золотины ( $\leq 0,1\%$  от общего их количества или массы золота в штуфе) наблюдаются в некоторых рядовых прожилках кварца в штокверке и в некоторых мелких кварцевых прожилках – микропроводниках флюида.

В генетическом отношении всё отмеченное свидетельствует о взаимосвязанном и близком во времени формировании выделений самородного золота и прожилков кварца из единого потока флюидов по причине резких снижений давления в гидротермальной системе. Такое снижение давления флюида обычно возникало на начальных отрезках разветвления и приращения мощности рудоконтролирующих разломов, сменяющихся выше участками максимальных раскрытий полостей. Следствиями этого являлись кипение, глубокая гетерогенизация, пересыщение газами флюида кремнеземом и комплексами золота с  $Cl$  и  $S$  в лигандах, возникновение нанозарождений самородного золота и его ассоциатов с газами и их флотация с образованием богатых скоплений золота на этих (см. расположение бананцев 8 и 9 на рис. 3) и более высоких уровнях гидротермальных систем (бананцы 1-6). Отмеченное распределение скоплений золота также характерно для богатых участков других рудоносных тектонических зон этого месторождения.

В числе важнейших факторов, благоприятствовавших появлению участков с аномальными скоплениями золота в рудном процессе, помимо резких снижений давления флюида, являлись: 1 – периодические тектонические подновления трещинно-полостной и трещинно-поровой проницаемости тектонитов в разломных зонах; 2 – формирование в них каналов длительной фокусированной инфильтрации глубинных металлоносных флюидов; 3 – формирование во вмещающих тектонитах, в сопряжении с этими каналами на различных их уровнях, разномасштабных экранов.

На основании изложенного можно полагать, что в различные геологические эпохи естественная газовая флотация зарождавшихся в пересыщенных кипящих флюидах наночастиц и кластеров самородного золота могла принимать активное участие в формировании богатых рудных столбов и бананцев в составе жильных тел и штокверков многих выявленных и ещё

не выявленных эпитеpmальных и мезотермальных месторождений. Следовательно, при обнаружении на разведываемых золоторудных месторождениях свидетельств вертикального разобщения скоплений частиц самородного золота в бананцах и рудных столбах относительно эпицентров сгущения кварцевых прожилков (как на месторождении Пионер) или относительно раздувов мощностей продуктивных жильных тел (как на месторождении Токур [14]), их необходимо учитывать при построениях генетических моделей и использовать для обоснования эффективных направлений доразведки месторождений. Такие свидетельства особенно важно учитывать в практике прогноза, поисков и предварительной оценки перспектив новых рудных полей, выявляемых на территориях ещё слабо изученных на золото рудных районов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н.С., Симонов В.А., Фуке И., Амплиева Е.Е. Фазовая сепарация флюида в глубоководном современном субмаринном гидротермальном поле Ашадзе (Срединно-Атлантический хребет,  $12^{\circ}58'$  с.ш.): результаты изучения флюидных включений и прямые наблюдения // ДАН. 2010. Т. 435, № 1. С. 81–84.
2. Власов Н.Г., Дмитренко В.С., Капанин В.П. и др. Приамурская золоторудная провинция // Золоторудные месторождения России / Ред. М.М. Константинов М.: Акварель, 2010. С. 187–212.
3. Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Прокофьев В.Ю., Горячев Н.А., Вознесенский С.Д., Альшевский А.В., Чернова А.Д. Золоторудное месторождение Школьное (Северо-Восток России) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53, № 1. С. 3–31.
4. Летников Ф.А., Вилор Н.В. Золото в гидротермальном процессе. М.: Недра. 1981, 225 с.
5. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.
6. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2007. 188 с.
7. Нерода О.Н. Остапенко Н.С. Экспериментальное воспроизведение возможности естественной флотации самородного золота в рудном процессе // Вопросы геологии и комплексного изучения экосистем Восточной Азии: Шестая Всерос. науч. конф. с междунар. участием. г. Благовещенск, 4–7 окт. 2022 г. / Сб. докл. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН. 2022. С. 58–61.
8. Неронский Г.И., Левицкий Ю.Т. Газово-жидкие включения в самородном золоте и их структурное положение // Минералообразующие флюиды и рудогенез. Киев: Наук. думка, 1988. С. 137–140.
9. Нестеров Н.В. Гипергенное обогащение золоторудных месторождений Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука, СО, 1985. 198 с.
10. Остапенко Н.С. К обоснованию гидротермально-флотационной модели формирования золоторудных столбов в жилах выполнения // История исследования золотоносности

- Приамурья. Благовещенск: ВМО Амурск. отд-ние, 1989. С. 62–64.
11. Остапенко Н.С. Саморазвитие экранированных гидротермальных систем и гидроразрыв в структуро- и рудообразовании (общая модель формирования гидротермальных месторождений) // ДАН. 2005. Т. 400. № 6. С. 789–792.
  12. Остапенко Н.С. Нерода О.Н. Флюидное давление и гидроразрыв пород при гидротермальном рудообразовании (на примере золоторудных месторождений) // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 3. С. 89–105.
  13. Остапенко Н.С., Нерода О.Н. Агрегирование самородного золота в гидротермальном процессе // Наногеохимия золота: Труды симпозиума 17–18 апр., 2008 г. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2008. С. 149–156
  14. Остапенко Н.С. О естественной флотации гидрофобных минералов в гидротермальном рудообразовании и ее следствиях на примере месторождений золота // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 78–86.
  15. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 345 с.
  16. Петровская Н.В., Элисон М.М., Николаев Л.А. Состав и условия образования газовых включений в самородном золоте // I Международный геологический конгресс. Гидротермальные процессы. М.: АН СССР, 1973. Т. II. С. 441–451.
  17. Хомич В.Г., Власов Н.Г., Борискина Н.Г., Маслаков В.С. Геологическая позиция и особенности строения Пионерного золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Геология, минералогия и геохимия месторождений благородных металлов Востока России. Новые технологии переработки благороднометалльного сырья: Сб. науч. тр. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2005. С. 121–125.
  18. Clark J.R., Williams-Jones A.E. Analogues of epithermal gold-silver deposition in geothermal well scales // Letters to nature. 1990. V. 346. P. 644–645.
  19. Frondell C. Stability of colloidal gold under hydrothermal condition // Econ. Geol. 1938. V. 33, N 1. P. 1–20.
  20. Gartman A., Hannington M., Jamieson J.W., Peterkin B., Garbe-Schonberg D., Findlay A.J., Fuchs S., Kwasnitschka T. Boiling-induced formation of colloidal gold in black smoker hydrothermal fluids // Geol. 2018. V. 46, N 1. P. 39–42.
  21. Hannington M.D., Hardardottir V., Garbe-Schonberg D., Brown K.L. Gold enrichment in active geothermal systems by accumulating colloidal suspensions // Nature Geosci. 2016. V. 9. P. 299–302.
  22. Hannington M., Garbe-Schönberg D. Detection of gold nanoparticles in hydrothermal fluids // Econ. Geol. 2019. N 2. P. 397–400.
  23. Hardardóttir V., Brown K.L., Fridriksson Th., Hedenquist J., Hannington M.D., Thorhallsson S. Metals in deep liquid of the Reykjanes geothermal system, southwest Iceland: Implications for the composition of seafloor black smoker fluids // Geol. 2009. V. 37. P. 1103–1106.
  24. Herrington R.J. Colloidal gold and silica in mesothermal vien systems // Geology. 1993. V. 21. P. 539–542.
  25. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore Geology Review. 2011. V. 42. P. 55–61.
  26. Hurtig N.C., Williams-Jones A.E. An experimental study of the transport of gold through hydration of AuCl in aqueous vapour and vapour-like fluids // Geochim. Cosmochim. Acta. 2014. V. 127. P. 305–325.
  27. McLeish D.F., William-Jones A.E., Vasyukova O.V., Clark J.R., Board W.S. Colloidal transport and flocculation are the cause of the hyper enrichment of gold in nature // Proc. National Acad. Sci. PNAS. 2014. V. 118 (20). e2100689118. doi: 10.1073/pnas.2100689118.
  28. Peterson E.C., Mavrogenes J.A. Linking high-grade gold mineralization to earthquake-induced fault-valve processes in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea // Geol. 2014. V. 42. P. 383–386.
  29. Prokofiev V.Yu., Banks D.A., Lobanov K.V., Selector S.L., Molochko V.A., Akinfiyev N.N., Borovikov A.A., Lüders, Chicherov M.V. Exceptional concentrations of gold nanoparticles in 1,7 Ga fluid inclusions from the Kola Superdeep Borehole, Northwest Russia // Sci. Reports. 2020. V. 10:1108. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58020-8>.
  30. Saunders J.A. Colloidal transport of gold and silica in epithermal precious-metal systems: Evidence from the Sleeper deposit, Nevada // Geol. 1990. V. 18. P. 757–760.
  31. Saunders J.A. Silica and gold textures in bonanza ores of the Sleeper Deposit, Humboldt County, Nevada; evidence for colloids and implications for epithermal ore-forming processes // Econ. Geol. 1994. V. 89. P. 628–638.
  32. Saunders J.A., Schoenly P.A. Boiling, colloid nucleation and aggregation, and the genesis of bonanza Au-Ag ores of the Sleeper deposit, Nevada // Miner. Deposita. 1995. V. 30. P. 199–210.
  33. Simmons S.F., Browne P.R. Hydrothermal minerals and precious metals in the geothermal system: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments // Econ. Geol. 2000. V. 95. P. 971–999.
  34. Simmons S.F., Brown K.L., Tutolo B.M. Hydrothermal transport of Ag, Au, Cu, Pb, Te, Zn, and other metals and metalloids in New Zealand Geothermal Systems: Spatial patterns, fluid-mineral equilibria, and implications for epithermal mineralization // Econ. Geol. 2016. V. 111. P. 589–618.
  35. Stuart F. Simmons S.F., Brown K.L. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit // Science. 2006. V. 314. P. 288–291.
  36. Weatherley D.K., Henley R.W. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits // Nature Geosci. 2013. V. 6. P. 294–298.

*Рекомендована к печати Н.А. Горячевым*

после доработки 11.11.2022 г.

принята к печати 23.01.2023 г.

*N.S. Ostapenko, O.N Neroda*

**Causes and factors in the genesis of bonanza orebodies in the Bakhmut zone of the Pioneer stockwork gold deposit in Piamurye**

When studying an ore shoot in the Bakhmut ore zone of the Pioneer mesothermal stockwork gold deposit (Piamurye, Russia) of vein and disseminated gold-quartz ores at its different levels, the authors identified discrete anomalously gold-rich areas (bonanzas). The objective of the research was to investigate the causes and conditions for bonanza formation and the facilitating factors. In addition to the analysis of the general distribution of gold in orebodies, a detailed macro- and microscopic study was carried out on the distribution of native gold in samples of ore and the nature of native gold. Gold particles are found to be hypogene, including those at the surface. In the zones of brecciated rocks, a distinct spatial displacement of native gold accumulations upwards relative to a dense network of veinlets and nests of quartz and their almost complete absence in the quartz bodies indicate telescoping of high-grade gold accumulations formed in a single productive gold-quartz stage. At the same time, spatial proximity is established between fields of gold particle accumulations and quartz-filled fracture cavities that show dominance in size and zones where swellings of quartz-filled fractures tend to thin and pinch out. Our findings and laboratory experiments yielded the information for a scientifically sound model of natural gas flotation of native gold nanoparticles as part of the «Au<sub>cr</sub> + gas» associates with the formation of bonanzas under the above favorable conditions at higher levels of the deposit in the presence of different low permeability screens.

**Key words:** stockwork gold deposit, bonanzas, fluid heterogenization, «Au<sub>cr</sub> + gas» associates, model of Au<sub>cr</sub> natural gas flotation.