

## МЕТАЛЛОГЕНИЯ

УДК 553.411:550.347.62

### РОЛЬ СОЕДИНЕНИЙ БОРА В ОБРАЗОВАНИИ ТУРМАЛИНСОДЕРЖАЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

*С.С.Зимин\**, *В.Г.Моисеенко\*\**, *Р.А.Октябрьский\**, *Б.М.Тишкин\**, *В.В.Малахов\**,  
*В.П.Молчанов\**

*\*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток*

*\*\*Амурский комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Благовещенск*

В работе рассматриваются особенности размещения в земной коре, условия залегания, главные черты минералогии и геохимии месторождений золота турмалин-кварцевого типа. Предполагается, что в формировании их большую роль играли бориды металлов и борогидриды глубинных уровней мантии с восстановительным режимом минералообразования. При этом первые послужили главными источниками рудного вещества, а борогидриды типа  $B_{10}H_{14}$  и др., реагируя в гранитном расплаве с водой при высокой (800-700°C) температуре, приводили к генерации водорода согласно реакции  $B_{10}H_{14} + 15H_2O = 5B_2O_3 + 22H_2$ . Водород в высоких горизонтах земной коры, взаимодействуя с кислородом при низкой (200-100°C) температуре, способствовал образованию воды, что сопровождалось резким снижением газового давления над магматическими интрузиями. Частые перепады давления, связанные с влиянием тектонических подвижек на режим поступления газов, приводили к нарушению устойчивости пород в главном газовом канале и, в конечном счете, к образованию заполненной обломками пород трубки над интрузией бор- и водородсодержащей магмы гранитного или кимберлитного состава.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Известно [2, 7, 22], что месторождения золота турмалин-кварцевого типа распространены на всех континентах. Большинство их относятся к гидротермальным образованиям [2, 18, 29], реже встречаются эксгальционно-осадочные представители. Первые связаны с интрузиями гранитоидов разного возраста, а вторые - с вулканогенно-осадочными комплексами пород, причем рудопроявления среди них распространены гораздо шире, чем месторождения. Причины сонахождения золота и турмалина, как и источники этого типа оруденения, исследователями обычно не рассматриваются, и природа их остается неясной. Настоящая статья посвящена обсуждению этой проблемы.

#### ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПРОЯВЛЕНИЙ ЗОЛОТА ТУРМАЛИН-КВАРЦЕВОГО ТИПА В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Месторождения рассматриваемого типа обычно встречаются в регионах как единичные, реже образуют крупные провинции. В большинстве случаев они приурочены к зонам активизации докембрийских

структур, а также складчатых сооружений, заложенных на кристаллических породах докембрия. Они встречаются в Африке, Европе, Азии, Северной и Южной Америке, Австралии.

В западной Африке, на границе Мали и Сенегала, имеются небольшие эксгальционно-осадочные месторождения (Луло и др.) с запасами до 28 т Au [29], приуроченные к кембрийской вулканогенно-осадочной формации Бирримен, сформировавшейся на активизированных структурах докембрия. В верхней свите Далем этой ассоциации пород широко представлены кварцевые песчаники мощностью до 10 м и протяженностью до 150 км, в цементе которых находятся карбонат, золотоносный пирит и крип-токристаллический турмалин. Формация прорвана интрузиями гранитоидов разного возраста, третичными долеритами и кимберлитами. В зонах дробления песчаники под влиянием гидротерм гранитоидов превращены в штокверки, содержащие прожилки кварца, турмалина, пирита с включениями золота, арсенопирита и никельсодержащих минералов. Среднее содержание золота в штокверке 4.38 г/т.

В Швеции, в зоне карельской складчатости находится крупное месторождение Болиден, на кото-

ром добыто 128 т золота, 411 т серебра, 118 т меди [27]. Между горизонтами 170-270 м сосредоточены кварц-турмалиновые жилы с видимым золотом, ассоциирующим с селеносодержащим кобеллитом, самородной сурьмой и менегинитом. Среднее содержание золота 50 г/т, местами 620 г/т, серебра 630 г/т. Выделяются три стадии оруденения: 1 - арсенопиритовые руды, 2 - кварц-турмалиновые жилы, 3 - пиритовые и халькопиритовые руды. Соотношение продуктов стадий составляет 23:5:72.

Особенно интересна крупнейшая Приамурская бороносная и золотоносная провинция, которая охватывает Восточное Забайкалье и Амурскую область, протягиваясь с запада на восток более чем на 1000 км. Она приурочена к обширной зоне активизации докембрийских структур в связи с формированием широтного Монголо-Охотского и сопряженного с ним на востоке Зее-Селемджинского пояса офиолитов позднего протерозоя. В ее пределах (рис. 1 а, б) широко представлены проявления турмалин-золоторудной минерализации, возраст которых варьирует от верхнего архея до нижнего мела. Для нее характерны золотоносные турмалиновые кварциты с пиритом, связанные как с вулканогенно-осадочными комплексами верхнего архея, так и с их верхнепротерозойскими аналогами на площади Буреинского кристаллического массива (рис. 2). Пирит в этих породах приурочен к прослоям турмалина. Он возник при восстановлении сульфатов на стадии диагенеза морских осадков. Турмалин образовался в процессе метаморфизма глинистой составляющей, сорбирующей бор, выносившийся при подводном офиолитовом вулканизме. Среднее содержание золота в таких породах колеблется от 0.01 до 1.6 г/т (табл. 1).

Помимо эксгальационно-осадочных, в этой провинции широко представлены гидротермальные рудопоявления и месторождения золота турмалин-кварцевого типа. В Восточном Забайкалье к ним относятся Дарасунское, Дыбыксинское, Илинское, Ключевское и др., а в Амурской - Кировское, Октябрьское, Инкан, Афанасьевское и др. [21, 22]. Дру-

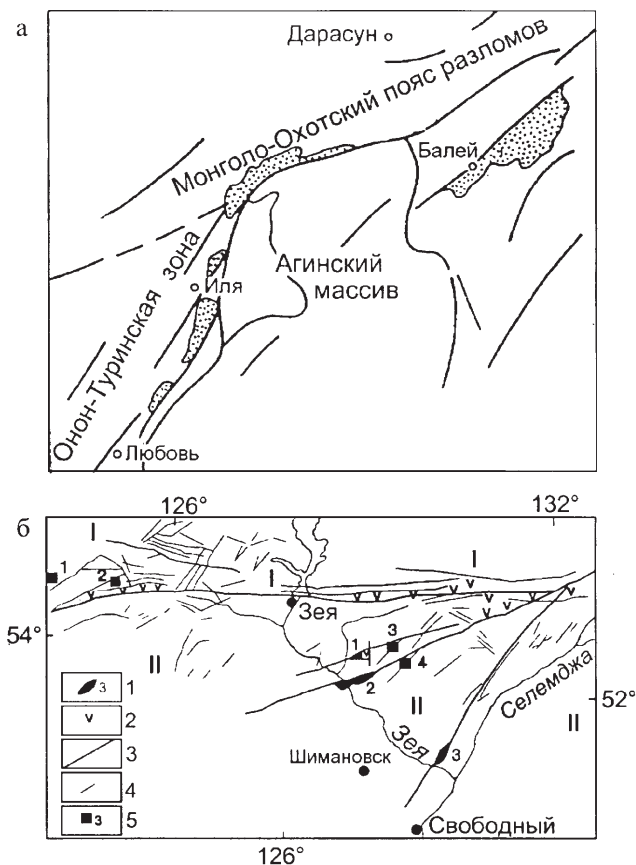


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Восточного Забайкалья, по [13] - а и структурно-тектоническая схема Среднего Приамурья - б.

Крапом на рис. а отмечены мезо-кайнозойские впадины.

1 - интрузивы гипербазитов (PR<sub>3</sub>): Гарьский (1), Усть-Депский (2), Граматухинский (3); 2 - офиолитовые вулканиты (PR<sub>3</sub>); 3-4 - глубинные разломы верхнего протерозоя (3), мезозоя, реже палеозоя (4); 5 - месторождения золота турмалин-кварцевого типа (Березитовое - 1, Коровское - 2, Октябрьское - 3, Инкан - 4). Крупными цифрами обозначены области активизации кристаллических пород: Становая (I), Буреинский массив (II).

Схема выполнена на основе геологической карты региона Байкало-Амурской магистрали [4] и новых данных авторов настоящей статьи.

Таблица 1. Содержание Au (г/т) в турмалиновых сланцах Буреинского кристаллического массива по данным пробирного и атомно-абсорбционного анализа.

№ образца	Au	Порода	Возраст	Место взятия
С-1689/2	< 0.013	Турмалиновый кварцит	AR <sub>2</sub>	Р. Гуджал, правый приток р. Тырма
С-1730/1	1.66	Турмалиновый кварцит с мусковитом	—	Р. Гилой, район прииска "Золотая гора"
С-1731/5	1.65	Турмалиновый кварцит с пиритом	—	—
С-1735/5	1.60	Турмалиновый кварцит	—	—
СГ-51/4	< 0.1	Турмалиновый кварцит	PR <sub>2</sub>	Р. Гарь-2
БО-20	6.08	Турмалиновые шилы с пиритом в гранитах	K <sub>1</sub>	Верховья р. Калахта, Октябрьский рудный район

Бораты	$T_{уст.}^{\circ C}$	Бораты	$T_{уст.}^{\circ C}$
$AgBO_2$	530	$PdB_2O_4$	800
$Ag_3BO_3$	375	$2NiO \cdot B_2O_3$	1480
$MgO \cdot 2BO_3$	995	$CuB_2O_4$	1100
$2MgO \cdot BO_3$	1446	$3Li_2O \cdot B_2O_3$	715
$3ZnO \cdot B_2O_3$	1080	$Li_2O \cdot B_2O_3$	849
$ZnO \cdot 2BO_3$	800	$Li_2O \cdot 2B_2O_3$	917
$ZnO \cdot 3BO_3$	850	$5Na_2O \cdot 2B_2O_3$	580
$HgO \cdot 2BO_3$	600	$3Na_2O \cdot B_2O_3$	675
$FeBO_3$	800	$2Na_2O \cdot 5B_2O_3$	686
$Fe_3BO_6$	910	$Na_2O \cdot B_2O_3$	968

Рис. 2. Кварц-турмалиновый сланец из толщи офиолитовых вулканитов верхнего протерозоя.

Черное - прослой турмалина, серое - прослой ориентированных по слоистости зерен кварца. Видны кристаллы окисленного пирита в прослоях турмалина, а также прожилки позднего кварца, пересекающие все минеральные образования. Ув. 14, Ник. П. Обр. С<sub>г</sub>-54-4. Участок р. Гарь-2.

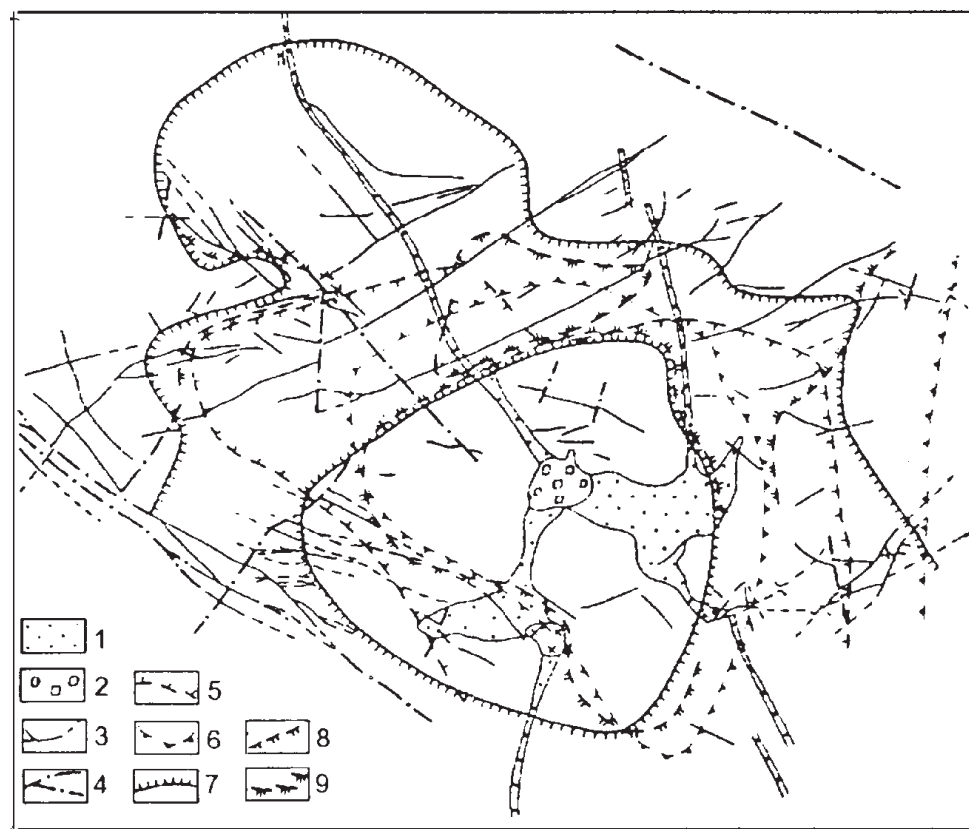


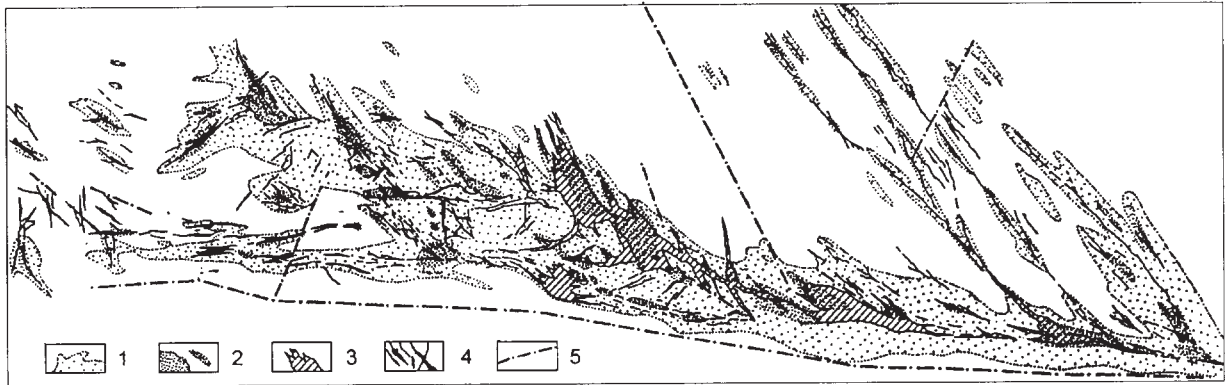
Рис. 3. Схема зонально-концентрического размещения минеральных ассоциаций на Дарасунском рудном поле (по Д. Тимофеевскому согласно сведениям в работе [2]).

1 - плагиогранит-порфиры; 2 - брекчия взрыва; 3 - золотоносные кварц-сульфидные жилы; 4 - разрывные нарушения; 5-9 - контуры распространения минеральных ассоциаций: 5 - кварц-турмалиновой, 6 - пирит-арсенопиритовой, 7 - галенит-сфалеритовой, 8 - бурнонит-тетраэдрит-халькопиритовой, 9 - сульфo-антимонитовой. Штрихи контурных линий направлены в сторону развития минеральных ассоциаций.

гой важной особенностью месторождений Приамурской провинции является связь их с трубками взрыва, возникшими местами (Дарасунское месторождение) на основе подводящих даек мезозойских [2] гранит-порфиров, гранодиорит-порфиров, плагиогранит-порфиров (рис. 3), а также развитие кварц-турмалиновых золотоносных жил с пиритом и штокверков [25], в которых золото рассеяно более всего в породах (70%) и меньше - в пирите (30%) [13]. На Ключевском месторождении, например, кварц-турмалиновая минерализация составляет ядра золотоносных зон, с которыми связано более позднее кварц-сульфидное оруденение [25], обогащенное золотом (рис. 4), а на Дарасунском месторождении турмалин-кварцевые жилы располагаются вокруг трубки взрыва, заполненной магматической брекчией с обломками плагиогранит-порфиров, образующих подводящие дайки. На Кировском месторождении в ряде участков распространены кварц-турмалин-магнетитовые жилы (рис. 5), в которых золото содержится как в турмалине (2.8-3.7 г/т), так и в магнетите (32.7-68.4 г/т) [5].

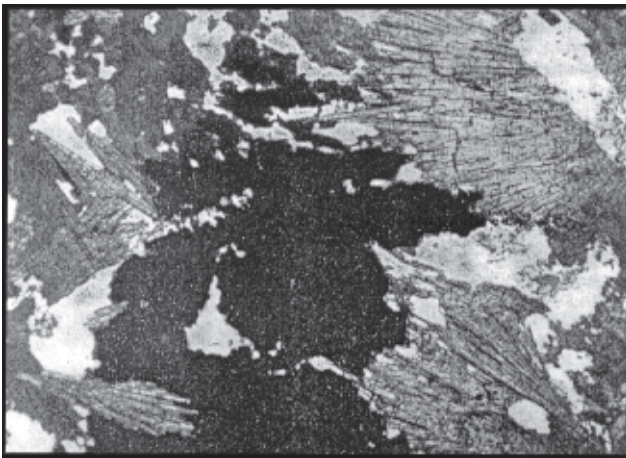
Интересно, что на месторождениях Алханайского района Восточного Забайкалья в рудных зонах развиты биотит-апатитовые метасоматиты, в которых золото связано с апатитом как в виде пленок, так и дисперсно рассеяно в нем [13].





**Рис. 4.** Схема распределения золота в восточном участке Ключевского рудного поля вблизи широтного разлома.

1 - зоны слабой рассредоточенной золотой минерализации; 2 - участки, относительно обогащенные золотом; 3 - крупные кварц-турмалиновые тела; 4 - небольшие кварц-турмалиновые тела, маломощные жилы, зоны развития прожилков; 5 - тектонические нарушения.



**Рис.5.** Сноповидные кристаллы турмалина в краевых частях прожилка, выполненного магнетитом. Прозрачн. шлиф без анализатора. Ув. 15.



**Рис. 6.** Ритмично-полосчатый турмалиновый сланец с жилками кварца. Район Саннона в КНДР. 1/2 нат. вел. Обр. Э-471.

Необычные проявления золото-турмалиновой минерализации наблюдаются в мелкозернистых гранитах дайковой природы нижнего мела в Октябрьском рудном районе. В них имеются широкообразные включения ликвационной природы диаметром до 20 см, состоящие, в основном, из турмалина и кварца с пиритом, в которых содержание золота достигает 6 г/т (см. табл. 1).

Большинство месторождений Приамурской провинции образуют ряд от бедных сульфидами до умеренно-сульфидных образований. В них наблюдается довольно широкий спектр рудных минералов, таких как пирит, халькопирит, арсенопирит, фрейбергит, золото, теннантит, гематит, апатит, энаргит, флюорит, молибденит, галенит, сфалерит, бенджаменит, магнетит, висмутин, тетраэдрит, висмутит, барит, гессит, шеелит, оранжборнит, альгодонит, глаукоdot, антимонит и др. [2].

Температуры образования золотоносных метасоматитов, например на месторождениях Алханайского района, следующие: 470-450°C - биотит-апатитовые, 460-410°C - кварц-турмалиновые с золотоносным пиритом, 420-300°C - кварц-мусковитовые, 350-120°C - гидроберезитовые метасоматиты главной золоторудной стадии [13].

В Северной Корее в нижнепротерозойских первично вулканогенно-осадочных толщах кристаллических пород широко распространены турмалиновые кварциты (рис. 6), которые, по мнению А.А. Маракушева и др. [15], являются эксгалиационно-осадочными образованиями, подвергшимися метаморфизму.

Довольно широко месторождения золота турмалин-кварцевого типа распространены в Южной Америке [28]. Так, на северной окраине Гвианского кристаллического щита расположено среднее по запасам (60 т Au) жильное месторождение Эль-Калья-

на (Венесуэла), которое относится [26] к кварцевой формации и турмалин-пиритовому минеральному типу. Юго-восточнее на этом же континенте, в пределах Бразильского щита, по данным [28 - 30], имеется месторождение Пассажем (50 т Au). Оно представлено пластообразной залежью из молочно-белого кварца с турмалином, арсенопиритом и небольшим количеством пирита и пирротина. Эта залежь кварца с сульфидами приурочена к контакту железистых кварцитов (итабиритов) и слюдяных сланцев и протягивается на 15 км. Содержание золота в руде местами достигает 150-200 г/т. Единого мнения о ее природе не имеется. Одни исследователи [31] определяют ее типичной жилой, а другие [33] относят к стратиформному образованию, которое позже подверглось метаморфизму. Месторождения близкого типа, по данным [28], имеются среди нижнепалеозойских пород Береговых Кордильер в Перу.

В Боливии золото и турмалинсодержащие кварц-вольфрамитовые жилы развиты на месторождении Розарио [8]. Они представлены молочно-белым кварцем с турмалином, вольфрамитом, шеелитом, арсенопиритом и пиритом.

В Аргентине в провинции Сан-Хуан имеется висмут-золото-серебряное месторождение типа брекчиевой трубки Сан-Франциско де Лос Андес, связанное с турмалинсодержащей интрузией гранодиоритов, прорывающей палеозойские осадочные породы [32]. Помимо золота и серебра его руды содержат висмут, пирит, халькопирит, арсенопирит, пирротин, сфалерит, немного вольфрамита в жильном кварце с турмалином.

Оригинальными являются месторождения Чили [28, 32]. Они образуют крупнейшую провинцию, протягивающуюся с юга на север вдоль глубинного разлома на расстояние свыше 3000 км (рис. 7, а), в которой распространены золото-турмалиновые, переходящие в халькопирит-турмалиновые месторождения типа брекчиевых трубок (рис. 7, б). Эти трубки встречаются группами до ста штук и перемежаются с типичными медно-порфировыми месторождениями. Они приурочены к довольно крупным массивам гранодиоритов, кварцевых монзонитов, прорывающим меловые и более молодые вулканы типа андезитов. Очертания их в плане округлые, диаметром от первых метров до первых сотен метров, глубина до 700 и более метров. Трубки обычно заполнены обломками вмещающих вулкаников с незначительным перемещением или без него (см. рис 7, б). В них наблюдаются две стадии минерализации. В первую формировались кварц-серицитовые породы, происходило интенсивное окварцевание и турмалинизация [27, 32]. Во вторую - стадию заполнения пустот - образовались также турмалин и спекуларит, после которых отлагались кварц, шеелит, пирит,

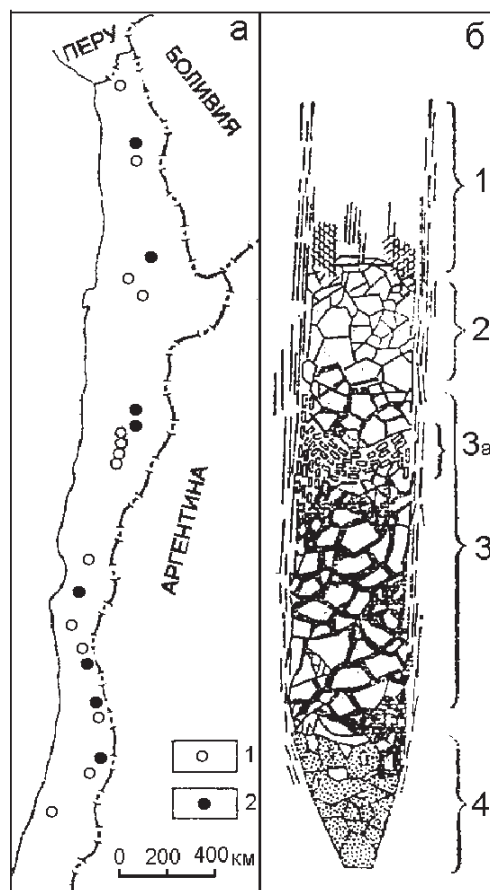


Рис. 7. а - схема размещения узлов распространения турмалиновых брекчиевых трубок (1) и главных меднопорфировых месторождений (2) в Чили; б - обобщенный схематический разрез через типичную чилийскую брекчиевую трубку (по [32]).

1 - верхняя часть трубки с рассланцеванием и серицитовым изменением; 2 - неперемещенная брекчия дробления; 3 - типичная брекчия, сцементированная турмалином, кварцем и сульфидами; 3а - ориентированные плитообразные обломки; 4 - интенсивно замещенная нижняя часть трубки.

халькопирит, борнит, молибденит, галенит и в конце процесса ангидрит, барит и карбонаты. Золото выделялось одновременно с халькопиритом, борнитом, молибденитом и раньше галенита. Температура образования кварца по включениям в нем оценивается в 350-340°C. Большинство месторождений мелкие, наиболее крупное среди них - Эль-Чивато. Содержание золота обычно 1.5-2, реже до 4 г/т.

Итак, в земной коре, на месторождениях и рудопроявлениях золота турмалин-кварцевого типа наблюдается устойчивое как в пространстве, так и во времени сонахождение золота и турмалина, которое, по нашему мнению, имеет характер закономерности. Гидротермальные образования такого типа приурочены зачастую к трубкам взрыва газов типа

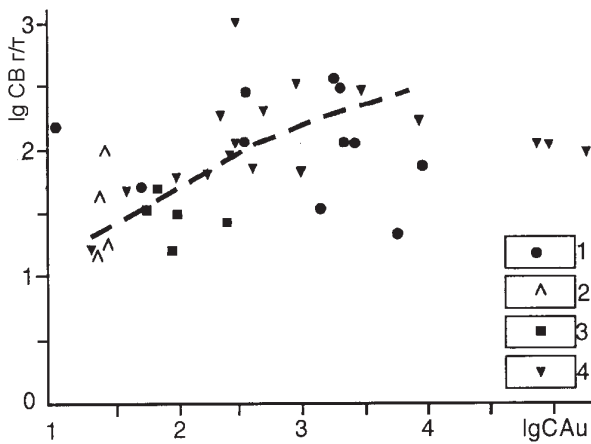


Рис. 8. Диаграмма корреляции золота и бора (в г/т) в золотоносных метасоматитах Алханайского района Восточного Забайкалья [13].

Метасоматиты: 1 - кварц-полевошпатовые, 2 - кварц-турмалиновые, 3 - березитовые (по гранитам), 4 - гидроберезитовые.

$H_2$ ,  $V_{10}H_{14}$ , и др. и связаны с глубинными разломами. Эти их особенности позволяют подойти к пониманию природы месторождений золота турмалин-кварцевого типа.

#### ИСТОЧНИКИ ОРУДЕНЕНИЯ

Приведенные материалы показывают, что золото в рудных зонах присутствует как в виде самостоятельных зерен разной величины, так и дисперсно рассеяно в пирите, магнетите и сосуществует с турмалином, причем нередко находится и в этом минерале. Более того, на месторождениях Алханайского района Восточного Забайкалья, основательно изученных геохимически Б.Н.Лапиным и В.Н.Широких [13], наблюдается положительная корреляция между золотом и бором (рис. 8) даже в более поздних, чем турмалиновые, гидротермалитовых зонах с оруденением, сложенных гидрослюдистыми минералами и серицитом, которые, повидимому, сорбируют бор. Кварц-турмалиновые метасоматиты с золотом и пи-

ритом на этих месторождениях формировались при 460-410 $^{\circ}C$ , а гидроберезитовые - при 350-120 $^{\circ}C$ . Из этого видно, что не все золото осаждается одновременно с турмалином, а большая часть его выпадает из растворов позже и при более низкой температуре, при которой формировались гидроберезиты. Бор выносился из глубин и при формировании этих пород фиксировался только в слюдястых минералах.

На основании приведенных данных можно предположить, что источником руд месторождений турмалин-кварцевого типа являются бориды глубинных зон мантии с восстановительным режимом. Эти соединения были синтезированы для технических целей и в земной коре не установлены [26]. Некоторые из них приведены в таблице 2, в которой видно, что среди них имеются соединения железа, магния, никеля, кобальта, меди, молибдена, вольфрама и др. Температуры образования их, как следует из таблицы, близки к таковой у минералов ультраосновных пород. Среди боридов возможен широкий круг и низкотемпературных соединений разных элементов. Для цинка они были предсказаны в работе [31]. В связи с этим экспериментаторами [10, 11] был дважды синтезирован низкотемпературный ( $T=250^{\circ}C$ ) борид цинка (см. табл.2). Дальнейшие исследования в этом направлении позволят получить интереснейшие данные для решения задач глубинной минералогии Земли.

Бориды золота и серебра, к сожалению, синтезированы не были по причине использования узкого круга методов их синтеза в восстановительных условиях. Эти образования, предполагаемые в мантии, при плавлении, последней, вероятно, разрушаются, окисляясь в горизонтах земной коры до боратов. Последние синтезированы пока только для серебра. К ним относятся также  $AgBO_2$ ,  $Ag_3O \cdot 2BO_3$ ,  $Ag_2O \cdot 4BO_3$ ,  $Ag_2O \cdot 9BO_3$  [1] (табл. 3).

Поскольку золото и серебро на месторождениях присутствуют в самородной форме, то бораты их следует рассматривать как промежуточные образо-

Таблица 2. Бориды ряда рудных элементов и их свойства.

Бориды	Плотность, г/см <sup>3</sup>	T <sub>вст.</sub> °C	Бориды	Плотность, г/см <sup>3</sup>	T <sub>вст.</sub> °C
Fe <sub>2</sub> B	7.33	1410	NiB	7.19	1590
FeB	6.70	1650	Pd <sub>3</sub> B	10.92	-
WB <sub>4</sub>	13.11	1700	Pd <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	11.21	≈1020
MoB <sub>4</sub>	9.25	1750	Pd <sub>5</sub> B <sub>2</sub>	10.68	-
Cr <sub>2</sub> B	6.57	1870	IrB <sub>0.9</sub>	17.3	≈1200
Cr <sub>5</sub> B <sub>3</sub>	6.12	1900	IrB <sub>2</sub>	6.09	3200
Ti <sub>2</sub> B	-	2200	PtB	17.25	-
MgB <sub>6</sub>	2.46	1150	RuB <sub>2</sub>	7.56	-
MgB <sub>2</sub>	2.63	1150	ZnB <sub>-22</sub>	-	250
Co <sub>2</sub> B	8.04	1265	CuB <sub>2</sub>	-	1060

Таблица 3. Некоторые бораты и температуры их образования.

Бораты	T <sub>вст.</sub> °C	Бораты	T <sub>вст.</sub> °C
AgBO <sub>2</sub>	530	PdB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	800
Ag <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	375	2NiO·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1480
MgO·2BO <sub>3</sub>	995	CuB <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1100
2MgO·BO <sub>3</sub>	1446	3Li <sub>2</sub> O·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	715
3ZnO·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1080	Li <sub>2</sub> O·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	849
ZnO·2BO <sub>3</sub>	800	Li <sub>2</sub> O·2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	917
ZnO·3BO <sub>3</sub>	850	5Na <sub>2</sub> O·2B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	580
HgO·2BO <sub>3</sub>	600	3Na <sub>2</sub> O·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	675
FeBO <sub>3</sub>	800	2Na <sub>2</sub> O·5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	686
Fe <sub>3</sub> BO <sub>6</sub>	910	Na <sub>2</sub> O·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	968



вания на пути от плавления боридов в верхней мантии до отложения их в верхних горизонтах земной коры. Из них борат  $\text{AgBO}_2$  при  $P=1$  атм.,  $T=530^\circ\text{C}$ , например, разлагается на  $\text{Ag}$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$ , а борат  $\text{Ag}_3\text{BO}_3$  при кипячении быстро гидратируется с образованием  $\text{AgO}$  и борной кислоты [1].

Бораты различного состава возможны и у золота, но данный элемент, в отличие от серебра, в соединениях выступает чаще в трехвалентной форме [19, 23]. Имея это в виду, можно ожидать у золота борид типа  $\text{AuB}$  и борат  $\text{AuBO}_3$ . У серебра возможен борид типа  $\text{Ag}_3\text{B}$ .

Присутствие боридов в глубинных зонах мантии Земли в настоящее время можно только предполагать [24]. Известно, что в метеоритах, возникающих при распаде астероидов, бориды не установлены [6]. Это не означает, что они не могут находиться в глубинах Земли, образовавшейся ближе к Солнцу в менее восстановительных условиях по сравнению с астероидами. Все дело в том, что, по данным [3], масса Земли ( $598 \cdot 10^{25}$  г) в 1500 раз превышает массу всех астероидов ( $4.4 \cdot 10^{24}$  г). В астероидном поясе на сегодня известно 112 тел диаметром 100-200 км [3]. Из этого следует, что Земля по массе превосходит отдельный астероид примерно в 16800 раз. При такой разнице масс нетрудно понять, что минералогические возможности Земли и родительских тел метеоритов будут явно на стороне первой, содержащей в ядерной части большие запасы водорода [7]. Это видно из следующего. При огромной массе и значительных запасах тепловой энергии внутри расплавленной в свое время [3] планеты она имела и несравненно большие возможности для протекания в ее недрах процессов ликвации вещества под влиянием водорода, фтора, щелочей [16] и фосфора [8], бора [2], благодаря которым имела место и концентрация, например, хрома, титана, фосфора, железа, бора и др. из рассеянного состояния в мантии до формирования крупных минеральных и рудных форм. Своеобразным отражением этого в земной коре являются металлогенические провинции, специализированные на определенные виды полезных ископаемых. В свете этого, присутствие боридов в глубинных горизонтах верхней мантии можно ожидать под теми регионами (Буреинский массив, Сихотэ-Алинь и др.), в которых на протяжении весьма длительного геологического времени наблюдалось поступление бора с глубины в земную кору.

На какой же глубине верхней мантии можно ожидать зоны с восстановительным режимом минералообразования? Исследователи полагают, что они возможны на глубинах более 100 км. Об этом свидетельствует наличие углеводородов во включениях минералов щелочно-ультраосновных пород.

Помимо боридов рудных элементов, особенно золота и серебра, в образовании месторождений золота турмалин-кварцевого типа принимают участие, вероятно, и борогидриды типа  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$  и др. Они ответственны, по-видимому, за образование трубок взрыва, что и будет рассмотрено ниже.

#### О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОК ВЗРЫВА И ШТОКВЕРКОВ

Впервые мысль о связи трубок взрыва с влиянием борогидридов была высказана в общей форме применительно к кимберлитам, исходя из высокого (83-158 г/т) содержания в них бора [17]. На рудных полях и в структурах месторождений турмалин-кварцевого типа этого элемента более чем достаточно для того, чтобы рассмотреть данную проблему более подробно.

Среди борогидридов известны соединения типа  $\text{B}_2\text{H}_6$  ( $T_{\text{кип}}=-92.5^\circ\text{C}$ ),  $\text{B}_4\text{H}_{10}$  ( $T_{\text{кип}}=+18^\circ\text{C}$ ),  $\text{B}_5\text{H}_9$  ( $T_{\text{плавл.}}=-46.6^\circ\text{C}$ ),  $\text{B}_6\text{H}_{10}$  ( $T_{\text{плавл.}}=-65.1^\circ\text{C}$ ),  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$  ( $T_{\text{плавл.}}=+99.6^\circ\text{C}$ ) и др [14]. Из них наиболее устойчивы  $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{B}_5\text{H}_9$ ,  $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$  [14]. При высоких температурах они представляют собой газы, наличие которых можно предполагать в тех же зонах мантии, в которых возможны и бориды. Поднимаясь с больших глубин с восстановительным режимом, борогидридные газы проникают в очаги гранитоидной магмы, формирующейся в земной коре.

Реагируя с водой, содержащейся в гранитном расплаве при высокой ( $800-700^\circ\text{C}$ ) температуре, они способствуют генерации водорода согласно реакции:  $\text{B}_{10}\text{H}_{14} + 15\text{H}_2\text{O} = 5\text{B}_2\text{O}_3 + 22\text{H}_2$ ;  $-\Delta Z = 624.885$  ккал при  $25^\circ\text{C}$ .

Эта реакция возможна и при температуре ( $800-700^\circ\text{C}$ ) гранитной магмы, поскольку свободная энергия у  $\text{B}_2\text{O}_3$  по абсолютной величине весьма значительна и изменяется мало с повышением температуры. В итоге  $\Delta Z$  реакции будет также отрицательной, а сама она - возможной.

Водород, выделяющийся в ходе реакции, в высоких горизонтах земной коры будет окисляться с образованием воды:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ . При этом количество газовых молекул уменьшится и давление их над интрузией гранитов понизится в 1.5 раза. Периодические перепады давления газов, связанные с влиянием тектонических подвижек на режим поступления их с глубины, будут нарушать прочность пород кровли и стенок в газовых проходах (не исключаются и взрывы) и приводить в конечном счете к образованию структур типа трубок взрыва глубиной до 1.5 км [19] над интрузией гранитов или кимберлитов.

Механизм формирования трубок, изложенный выше, проявляется, скорее всего, при температурах  $100-200^\circ\text{C}$ , ибо исследователи [2, 27, 32] не находят в

брекчиях вмещающих пород, заполняющих трубку, следов ранних высокотемпературных изменений их обломков. В трубках ими (см.рис. 7б) выделяются горизонты даже неперемещенных брекчий [32]. Механизм, предложенный выше, объясняет наличие на месторождениях золота (Ключевское) нелинейных зон брекчирования пород, по которым образуются штокверки рудных образований.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Особенности геологии, форм проявления и вещественного состава месторождений золота турмалин-кварцевого типа дают основание предполагать, что в их образовании принимают участие бориды металлов и борогидриды верхней мантии с восстановительным режимом минералообразования. При этом первые соединения являются, вероятно, главными источниками золота и других металлов, а вторые принимают участие в формировании структур типа трубок взрыва и брекчий нелинейного типа.

2. Рудные провинции, по-видимому, являются своеобразным отражением в земной коре (через посредство ее тектоно-магматической активизации) обширных областей ликвации и концентрации рудных элементов в мантии Земли в период ее расплавленного состояния под влиянием водорода, фтора, бора, фосфора и щелочей [9, 17].

3. Первично эксгалационно-осадочные концентрации золота и других металлов в Становой области докембрия и Буреинском массиве под влиянием гидротерм более поздних гранитоидов могут быть переотложены с образованием коренных месторождений золота, как это имеет место в КНДР в районе Саннона, что нужно иметь в виду при исследованиях.

4. В Среднем Приамурье на низкотемпературных месторождениях золота в рудных зонах рекомендуется провести исследования на содержание бора. Его повышенные концентрации могут указывать на наличие на глубине золотых руд турмалин-кварцевого типа. Это особенно важно для Верхне-Селемджинского района где среди группы месторождений имеется Афанасьевское, содержащее золото и турмалин.

5. В Сихотэ-Алине эксгалационно-осадочные концентрации золота могут иметь место в вулканогенно-осадочных комплексах офиолитового и других типов, судя по значительным содержаниям бора (83-162 г/т) и меди (90-136 г/т) в кремнистых сланцах с органикой или без нее [20]. На Ханкайском массиве с этой точки зрения наибольший интерес представляют метаморфические кварциты с турмалином, развитые в иманском, нахимовском и кабаргинском комп-

лексах пород, сопоставляющихся по составу и времени образования с метаморфитами КНДР [25].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова Н.В., Кожина Е.Л. Боратные системы // Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов. Справочник. Т. 5. Л., 1985. С. 5-64.
2. Бородаевская М.Б., Рожков И.С. Месторождения золота. // Рудные месторождения СССР. Т. 3. М., 1978. С. 5-75.
3. Войткевич Г.В. Рождение Земли. Ростов-на Дону: "Феникс". 1996. 475 с.
4. Геологическая карта региона Байкало-Амурской магистрали 1:1500000 / М-во геологии СССР. ВСЕГЕИ; Гл. ред. Л.И.Красный. М., 1977.
5. Гуров Л.П. Золотоносные минеральные ассоциации Кировского месторождения (Верхнее Приамурье) // Золоторудные формации Дальнего Востока. М., 1969. С. 74-93.
6. Додт Р.Т. Метеориты. Петрология и геохимия. М.: Мир, 1986. 383 с.
7. Зимин С.С., Зимин П.С. Растворы водорода в металлах - главные источники этого элемента в недрах Земли // Тихоокеан. геология. 1991. № 5. С. 122-130.
8. Зимин С.С., Худоложкин В.О. Новое о роли фосфора в магматических расплавах и оценка ресурсов апатитовых руд в габброидных массивах // Тихоокеан. геология. 1995. № 1. С. 90-99.
9. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М.: Химия, 1968. 470 с.
10. Корсукова М.М., Гурин В.Н., Козлова И.Р и др. Неорганическая химия. 1971. № 7. 1518 с.
11. Корсукова М.М., Гурин В.Н., Сорокин В.Н. и др. Свойства и некоторые перспективы использования высших боридов подгруппы цинка // Бор. Получение, структура и свойства. М., 1974. С. 235-239.
12. Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Современная неорганическая химия. Химия переходных элементов. М.: Мир, 1969. Ч.3. 590 с.
13. Лапин Б.Н., Широких И.Н. Геология, метасоматиты и золотое оруденение Восточного Забайкалья (Алханайский район). Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1981. 163 с.
14. Маккей К. Водородные соединения металлов. М.: Мир, 1968. 242 с.
15. Маракушев А.А., Ким Хак Дзе, Ким Хенсо, Мишкин М.А. Докембрийские метаморфические комплексы Северо-Восточной Кореи и Юго-Западного Приморья // Геологическое строение Северо-Восточной Кореи и юга Приморья. М.: Наука, 1966. С. 9-124.
16. Маракушев А.А., Иванов И.А., Римкевич В.С. Значение ликвации в генезисе магматических горных пород. / Вестн. МГУ. Геология. 1979. № 1. С. 3-22.
17. Маршинцев В.К. Вертикальная неоднородность кемберлитовых тел Якутии. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. 240 с.
18. Мельников В.Д. Золоторудные гидротермальные формации. Владивосток: АМУРКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. 130 с.



19. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, Ленингр. отд-ние, 1984. 267 с.
20. Михайлов М.А., Волохин Ю.Г. Геохимические особенности углеродистых кремнистых пород Дальнего Востока // Геохимия и петрохимия осадочных комплексов Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 3-17.
21. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 302 с.
22. Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.
23. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
24. Петерсилье И.А. О происхождении углеводородных газов и рассеянных битумов Хибинского щелочного массива. // Геохимия. 1962. № 1. С. 32-43.
25. Петровская Н.В., Андреева М.Г. Ключевское месторождение как представитель золото-турмалинового оруденения (Восточное Забайкалье) // Золоторудные формации Дальнего Востока. М., 1969. С. 36-41.
26. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Metallургия, 1976. 555 с.
27. Шер С.Д. Металлогения золота. М.: Недра, 1974. 256 с.
28. Collani G. Das Gold in Staate Minas Geraics Brazilien // Sein Vorkommen und seine gewinnung "Metall und Frz". 1931. Bd. 28. № 22. S. 529-528.
29. Dommanget A., Diallo M., Guilloux L. Un nouveau type de gisement dior: Loulo. (Mali) // Chron. rech. min. no 481. 1985. P. 5-18.
30. Fleischer R., Routhier P. The "Consanguineous" origin of a tourmaline-bearing gold deposit: Passagem de Mariana (Brazil) // Econ. Geol. 1973. Vol. 68, № 1. P. 11-22.
31. Newkirk A.E., Hurd D.T. S. Amer. Soc. 1995. № 1. 241 P.
32. Sillitoe R.H., Sawkins F.J. Geology, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile // Econ. Geol., 1971. Vol. 66, № 7. P. 1028-1041.
33. Stoll W.C. Metallogenetic belts, centers and epochs in Argentina and Chile // Econ. Geol., 1964. Vol. 59, № 1. P. 126-135.

Поступила в редакцию 26 января 1998 г.

Рекомендована к печати Ю.И. Бакулиным

**S.S. Zimin, V.G. Moiseenko, R.A. Oktyabrsky, B.M. Tishkin, V.V. Malakhov, V.P. Molchanov**

### **On the role of boron in the formation of tourmaline-quartz type gold deposits in Priamurie**

The paper considers peculiar features of tourmaline-quartz type gold distribution in the earth's crust as well as its occurrence and main mineralogical and geochemical features. It is suggested that metal borides and boron hydrides of deep-seated mantle levels with mineral formation reduction regime played a great role in their genesis. The former served as major resources of ore matter while  $B_{10}H_{14}$  boron hydrides reacting in the granite melting with water at high temperature (800-700°C) caused hydrogen generation in accordance with the reaction  $B_{10}H_{14} + 15H_2O = 5B_2O_3 + 22H_2$ . In high earth's crust hydrogen interacts with oxygen at low temperature (200-100°C) resulting in water generation which is followed by an abrupt gas pressure reduction above the magmatic intrusions. Repeated changes in pressure related to the tectonic displacement influence on the gas supply resulted in the disturbance of rock stability in the base gas channel and finally in the formation of a clastic pipe above the granite or kimberlite boron- and hydrogen- bearing magma.