

УДК 553.41:550.42(571.65)

ЗОЛОТО, ПЛАТИНА И ПАЛЛАДИЙ В РУДАХ НАТАЛКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВЕРХНЕ-КОЛЫМСКИЙ РЕГИОН)

© 2003 г. Л. П. Плюснина, член-корреспондент РАН А. И. Ханчук, член-корреспондент РАН В. И. Гончаров, В. А. Сидоров, Н. А. Горячев, Т. В. Кузьмина, Г. Г. Лихойдов

Поступило 27.03.2003 г.

Наталкинское месторождение расположено в 400 км к северо-западу от Магадана в складчатых структурах Аян-Юрхского антиклинория, сложенного песчанистыми аргиллитами, диамиктитами, песчаниками, алевролитами верхнепермского возраста [1, 2]. Оруденение представлено серией сближенных жильно-прожилковых зон в породах преимущественно атканской и омчакской свит. Вмещающие рудные зоны породы окварцованы, серицитизированы и сульфидизированы (вкрапленность пирита и арсенопирита). Платина и палладий установлены во всех золоторудных телах, но максимальное их содержание характерно для интенсивно сульфидизированных жильно-прожилковых блоков пород и кварц-сульфидных метасоматитов. На удалении от них содержание ЭПГ ниже предела чувствительности анализа (10^{-6} мас.%). Рудные тела прослежены почти на 5 км по простирацию и на 1200 м по падению. Ширина пучка рудных зон варьирует от 100 до 600 м. Сейчас месторождение отработано на глубину немногим более 200 м.

Целью данного исследования служит изучение распределения золота, платины и палладия в рудах месторождения в зависимости от содержания в них углеродистого вещества (УВ) и сульфидных минералов. Эта тема актуальна прежде всего потому, что до сих пор не удалось обнаружить здесь минералы-концентраты ЭПГ несмотря на повышенное их содержание в рудах [3].

Изучены метасоматиты по диамиктитам из рудных зон 3/62 и 30 на горизонте 600 м. Пробы 1111 и 1113 взяты из апофизы рудной зоны 3(62)

(рис. 1). Эта зона представляет собой пояс сближенных субпараллельных и пересекающихся прожилков с текстурой суббрекчиевого типа. Арсенопирит-кварцевые прожилки нередко включают видимое золото. Вмещающие породы представлены диамиктитами, песчаниками и алевролитами с тонковкрапленным арсенопиритом (до 3%), доля которого растет по мере приближения к прожилкам. Пробы 1376 и 1377 отобраны на 59-м и 62-м метрах от края рудной зоны 30. Это сильно измененные диамиктиты, рассеченные арсенопирит-кварцевыми прожилками небольшой мощности (0.5–1 см). Вкрапленность арсенопирита в прожилках составляет 3–4 и достигает 5 об.% во вмещающих диамиктитах. Кластическая часть диамиктитов (30–40 об.%) представлена несортированными, окатанными обломками преимущественно изверженных пород сечением от 0.2–0.5 до 7–10 см. Химический состав отобранных проб отличается высоким содержанием SiO_2 при крайне низком Ca, Mg, Fe, что позволяет отнести породы к типу кварцевых метасоматитов (табл. 1, 2). Содержание $C_{\text{орг}}$ в изученных пробах меняется (мас.%) от 0.042 в дайке спессартитов до 3.95 в мелкообломочных диамиктитах на удалении от рудных зон. Анализ ИК-спектров аморфного углерода из диамиктитов обнаружил ароматические и алифатические углеводороды с явным преобладанием первых.

Для выявления связи благородных металлов с УВ и сульфидизацией установлено содержание Au, Pt и Pd в гомогенизированных пробах из рудных метасоматитов, выделенном из них УВ, сульфидном концентрате и в хвостах гравитационно-флотационного обогащения этих проб после отбора сульфидных минералов. Растворимая фракция УВ экстрагирована спиртобензольной смесью на аппарате “Сосклет” [4, 5]. Содержание растворимой фракции УВ, значительную часть которой составляют масла, оказалось низким – от 0.03 до 0.08 мас.% (пр. 1113 и 1377). На ИК-спектрах (FTIR “Vector 22”) растворимой фракции присутствуют слабо разрешенные полосы поглощения алифатических (1710 см^{-1}), карбонильных

Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Владивосток

Северо-Восточный комплексный
научно-исследовательский институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Магадан

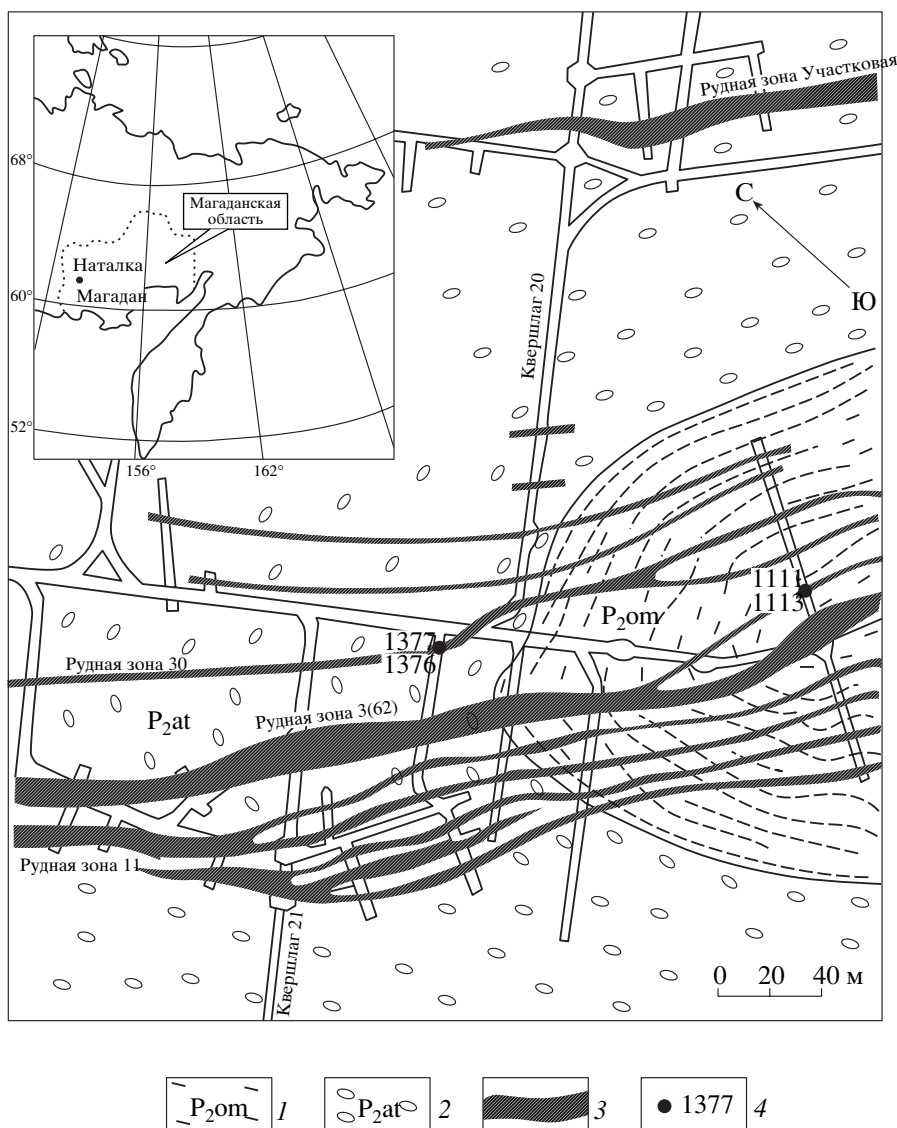


Рис. 1. Геологическая схема горизонта 600 м месторождения Наталка. 1 – Омчакская свита: аргиллиты, алевролиты с прослоями песчаников; 2 – Аткинская свита: диамиктиты, метасоматиты; 3 – рудные зоны и их названия; 4 – места отбора и номера проб.

(1253 cm^{-1}) и карбоксильных (1049 cm^{-1}) групп. Максимальная интенсивность характеризует полосы поглощения ароматических соединений (904, 800 cm^{-1}) и, кроме того, хорошее разрешение отличает полосы 477 cm^{-1} валентных колебаний S–S и S=O.

Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной ионной плазмой на приборе “Плазмоквант-110” в растворимой фракции УВ пробы 1377 установлено 0.5 и 3.5 г/г соответственно Pt и Au. В пробе 1113 при чувствительности метода 10^{-6} мас.% Au и ЭПГ не обнаружены.

Нерастворимое УВ выделено автоклавным разложением проб в концентрированной HF при 180–200°C за 48–72 ч. Увеличение времени до 72 ч обусловлено необходимостью более полного

извлечения $\text{C}_{\text{орг}}$ при его низком содержании в пробах. Продукты разложения включали легкую фракцию всплывшего УВ черного цвета, раствор и осадок на дне стакана. Осадок состоял преимущественно из сероуглеродных соединений и примеси закалочного аморфного кремнезема. В ИК-спектрах осадка преобладали полосы поглощения связи C–S (648, 617 и 542 cm^{-1}). УВ представлено полосами слабого разрешения ароматических соединений со всеми типами замещений (1669, 1638, 892, 728 cm^{-1}). Связи C–S отмечены и на ИК-спектрах исходных углеродистых алевролитов. Следует отметить, что сульфогруппы имеют вакансии отрицательных зарядов и легко присоединяют металлы и другие функциональные группы [6].

Таблица 1. Химический состав проб, мас. %

| № пробы | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | П.п.п. | Сумма | C _{орг} |
|---------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|--------|------------------|
| 1111 | 69.36 | 0.47 | 11.16 | 3.98 | 0.04 | 1.08 | 1.01 | 4.00 | 3.23 | 0.07 | 5.61 | 100.01 | 0.088 |
| 1113 | 70.89 | 0.5 | 11.54 | 4.14 | 0.06 | 1.26 | 1.41 | 4.38 | 2.47 | 0.08 | 3.27 | 100.00 | 0.287 |
| 1376 | 65.66 | 0.83 | 13.71 | 4.88 | 0.10 | 1.55 | 1.73 | 4.40 | 3.44 | 0.12 | 3.59 | 100.01 | 0.2 |
| 1377 | 64.89 | 0.77 | 13.38 | 3.97 | 0.10 | 1.54 | 2.43 | 3.80 | 2.84 | 0.11 | 6.19 | 100.02 | 0.323 |

Примечание. Рентгенофлуоресцентный анализ на СРМ-26, аналитик В.И. Мануилова. Определение C_{орг} выполнено по стандартной методике на экспресс-анализаторе АН-7529, аналитик Е.С. Саныко, СВКНИИ ДВО РАН.

Таблица 2. Элементы-примеси в пробах, г/т

| № пробы | Pb | Cr | As | W | Mo | Sn | Cu | Ag | Zn | Ni | Co |
|---------|------|------|--------|-----|------|-----|-------|------|------|------|------|
| 1111 | 45.0 | 9.8 | 8696.0 | 2.5 | 0.45 | 1.7 | 13.00 | 1.40 | 21.0 | 7.30 | 7.70 |
| 1113 | 13.0 | 10.0 | 8292.0 | 2.5 | 0.57 | 2.0 | 12.00 | 0.57 | 27.0 | 12.0 | 10.0 |
| 1376 | 3.9 | 6.2 | 1684.0 | 1.4 | 0.21 | 1.2 | 8.70 | 0.11 | 23.0 | 3.90 | 8.40 |
| 1377 | 5.7 | 11.0 | 589.0 | 4.0 | 0.38 | 1.5 | 8.90 | 0.13 | 37.0 | 5.90 | 13.0 |

Примечание. Атомно-эмиссионный анализ методом ЭКСА, аналитик Т.П. Козырева, СВКНИИ ДВО РАН.

Концентрация металлов в легкой, тяжелой фракциях УВ и отфильтрованном растворе представлена в табл. 3. Результаты свидетельствуют о постоянном, достаточно высоком содержании Au во всех пробах УВ и в растворе. Платина отмечена только в двух пробах осадка и раствора, полученных из сульфидизированного алевrolита, что отражает ее структурную связь с серой. Палладий в количестве до 2.9 г/т присутствует в легкой фракции УВ. Следует заметить, что содержание Au и Pd в растворе намного ниже, чем в легкой фракции УВ.

Содержание благородных металлов в рудных метасоматитах установлено методом ICP-AES (табл. 4). Максимальные содержания Au и Pt отмечены в сульфидах, минимальные в хвостах обогащения и промежуточные в породе. Анализ результатов позволяет сделать вывод о четкой зависимости между содержаниями золота и УВ. В нерастворимой фракции УВ из вмещающих алевrolитов и рудных метасоматитов установлено повышенное содержание Au в сравнении с фоном (0.03 г/т по [3]). Максимальная концентрация Au в УВ из вмещающих пород (проба 1-16) соответствует сорбционной емкости асфальтенов, установленной при 200°C и 1 кбар экспериментально [5], но значительно уступает содержанию Au в сульфидах. Если учесть, что при метасоматозе происходит вынос УВ, разрушение металлоорганических соединений с переходом Au в самородное состояние и дополнительный привнос золота глубинными растворами, то ураганные содержания Au (до 8 кг/т в отдельных пробах сульфидного концентрата) находят удовлетворительное объяснение.

Палладий, подобно золоту, присутствует главным образом в легкой фракции УВ (табл. 3). В матриксе диамиктитов содержание его варьирует (табл. 4), что предполагает два источника Pd и Au: осадочно-хемогенный за счет биологической активности в бассейнах и флюидно-магматогенный в связи с сульфидизацией и окварцеванием. Распределение Pt отличается от описанного для Au и Pd прежде всего явной приуроченностью Pt к кварц-сульфидным рудам с низким и спорадическим содержанием УВ. Низкая платиноносность УВ не связана с потерями при термической и кислотной обработке проб, поскольку Au и Pd анализировались в одних и тех же растворах, а потери Au, Pd и Pt в ходе кислотно-термического разложения проб близки по данным [7]. Более низкое содержание Pt по сравнению с Pd в рудах месторождения можно объяснить обычным преобладанием в природных системах Pd над Pt. В таком же соотношении они, по-видимому, мигрируют в составе флюидов или гидротермальных растворов, переотлагаясь на геохимических барьерах. Таким образом, очевидно, что основная масса Pt в рудах привнесена. С учетом низких содержаний C_{орг} в рудах и Pt в УВ переотложение существенных ее количеств из осадочных пород в сульфидные руды гипотетично. Вместе с тем ремобилизация Au и Pd из вмещающих пород гидротермальными растворами вполне возможна.

Тем не менее влияние углерода на отложение благородных металлов из гидротермальных растворов в условиях околорудного метасоматоза и регионального метаморфизма терригенных осадков несомненно. Оно связано с формированием восстановительного режима в рудообразующей

Таблица 3. Благородные металлы (г/т) в УВ и растворе, экстрагированных из алевролитов (1-16) и рудных метасоматитов (1113, 1377)

| № пробы | Масса, г | Фракции | Au | Pt | Pd | Условия опыта | |
|---------|----------|---------|--------|------|-------|---------------|------|
| | | | | | | t, °C | τ, ч |
| 1-16 | 1.315 | л | 1.83 | – | Н.а. | 180 | 4 |
| | | о | 0.50 | – | » | | |
| | | р | 0.19 | – | » | | |
| 1-16 | 1.84 | о | 0.32 | 0.35 | » | 200 | 24 |
| | | р | 0.17 | 0.05 | » | | |
| 1-16 | 1.11 | л | 3.79 | – | » | 200 | 48 |
| | | о | 1.23 | 0.80 | » | | |
| | | р | 0.19 | 1.16 | » | | |
| 1113 | 1.451 | л | 17.60 | – | 2.89 | 200 | 72 |
| | | о | – | – | – | | |
| | | р | – | – | 0.03 | | |
| 1113 | 1.59 | л | 44.66 | – | 0.73 | 180 | 72 |
| | | о | 17.00 | – | – | | |
| | | р | 0.35 | – | – | | |
| 1377 | 1.66 | л | 425.32 | – | – | 180 | 72 |
| | | о | 1573.4 | – | – | | |
| | | р | 0.50 | – | 0.04 | | |
| 1377 | 1.73 | л | 2695.9 | – | 2.735 | 180 | 70 |
| | | о | 1357.8 | – | – | | |
| | | р | 0.173 | – | – | | |

Примечание. Анализы выполнены методом ICP-AES в ДВГИ ДВО РАН, аналитики В.И. Киселев, Т.В.Кузьмина; л – легкая фракция, о – осадок, р – раствор, н.а.- не анализировался, прочерк – не обнаружен.

Таблица 4. Содержание благородных металлов (г/т) в рудных метасоматитах и сульфидах

| № пробы | Au | Pt | Pd | Состав пробы |
|---------|------|------|------|--|
| 1111а | 29 | 0.28 | 1.40 | Метасоматиты по диамиктитам |
| 1111б | 4300 | 0.85 | <0.1 | Сульфидный концентрат |
| 1111 | 17 | 0.47 | 1.19 | Хвосты |
| 1113а | 340 | 0.38 | 1.13 | Метасоматиты по диамиктитам |
| 1113б | 6000 | 1.98 | 5.27 | Сульфидный концентрат |
| 1113в | 93 | 0.13 | 1.25 | Хвосты |
| 1376 | 293 | 7.22 | 9.60 | Метасоматиты по диамиктитам |
| 1377 | 130 | 0.53 | 7.48 | То же |
| 1-16* | 0.38 | Н.а. | 0.66 | Углеродсодержащий метасоматит по алевролитам |
| 1-18* | 0.02 | 2.5 | 0.33 | Углеродсодержащий тектонит |

Примечание. Анализы Au выполнены методом ААС, Pt и Pd – ICP-AES, ДВГИ ДВО РАН, аналитики В. И. Киселев, Ж. А. Шека. Отклонения от стандартного образца составляют (отн. %) для: Pt (–17.9) и Pd (+15.4). Звездочкой отмечено – нейтронно-активационный анализ с пробирным концентрированием (Ташкент, ИЯФ АН РУз). Н.а. – не анализировалась.

системе путем взаимодействия растворов с углеродсодержащими породами. На стадии инверсии окислительного флюидного режима гидротерм на восстановительный происходит отложение самородных элементов [8]. Термодинамический расчет взаимодействия компонентов с помощью программного комплекса “Селектор-С” [9] в системе $H_2O-NaCl-UВ$ с пирит-пирротин-магнетитовым буфером показал, что $C_{орг}$ определяет редокс-потенциал системы на уровне $lg f_{O_2} = -40$ (при $250^\circ C$) даже при содержании ниже 0.01 мас. % [10]. Подобная восстановительная среда гидросульфидов подавляет активность хлоридных комплексов и благоприятствует осаждению металлов из гидротермального раствора. Ранее на основании эксперимента был предложен механизм осаждения Pt из растворов в виде куперита (PtS): $Pt(OH)_2 + xH_2S^\circ + yHS^- = (PtS \cdot xH_2S \cdot yHS^-)^{\circ-} \cdot H_2O + 0.5O_2 = xH_2S + yHS^- + PtS \downarrow$ [11]. Эта схема реализуется благодаря способности Pt формировать смешанные метастабильные комплексы, которые затем разлагаются с осаждением куперита. Сложный сульфидно-хлоридный состав водных растворов может способствовать появлению в определенных условиях комплексных Pt-содержащих соединений, координационная сфера которых включает несколько различных лигандов. В присутствии мышьяка в системе могут появляться и выпадать в осадок такие фазы, как арсениды и сульфоарсениды Pt, растворимость которых еще ниже, чем у куперита [12]. Это особенно важно для Наталкинского месторождения, где доминантная роль мышьяка как “проводника” золота в системе подчеркивается золотосодержащим арсенопиритом – наиболее распространенным сульфидом рудных зон. Способность Pt к смешанному комплексообразованию может быть причиной ее вхождения в состав различных сульфидных минералов. Неравномерное распределение ЭПГ, установленное в рудах Наталки, можно рассматривать как свидетельство дискретного поступления растворов с Pt и Pd к местам разгрузки. Наиболее вероятными концентраторами ЭПГ могут служить широко распространенные сульфиды железа и мышьяка (пирит, арсенопирит), а также сульфоарсениды никеля и кобальта, встречающиеся в рудах [2].

Таким образом, установлен различный характер связи золота, палладия и платины с УВ. Участие УВ в концентрировании этих элементов подтверждается только для золота и палладия. Полу-

ченные результаты позволяют заключить, что промышленная концентрация благородных металлов на месторождении Наталка обусловлена метасоматической проработкой и сульфидизацией углеродсодержащих пород.

Углистое вещество этих пород из-за низкого содержания Pt не могло быть основным ее источником в рудопродуктивных породах. В то же время оно способствовало генерации геохимических барьеров, на которых циркулирующие растворы осаждали Au, Pt и Pd в самородном виде или в составе сульфидов и сульфоарсенидов. Конкретные минералы-концентраторы ЭПГ на Наталкинском месторождении пока не установлены, но можно говорить о типах (простые вещества) и классах (сульфиды, арсениды) минеральных видов, на которые следует обратить особое внимание.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта ДВО–СО РАН “Золото Сибири и Дальнего Востока”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров В.И., Приставко В.А., Сидоров В.А., Ворошин С.В. // ДАН. 1997. Т. 355. № 6. С. 801–804.
2. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.
3. Сидоров В.А., Ворошин С.В., Приставко В.А., Санько Е.С. В кн: Платина России. М.: Геоинформмарк, 1999. Т. 4. С. 280–286.
4. Плюснина Л.П., Кузьмина Т.В. // Геохимия. 1999. № 5. С. 506–515.
5. Плюснина Л.П., Кузьмина Т.В., Некрасов И.Я. // ДАН. 2000. Т. 374. № 4. С. 529–531.
6. Чичибабин А.Е. Основные начала органической химии. Т. 2. М.: Хим. лит., 1958. 767 с.
7. Mit'kin V.N., Galizky A., Korda T. // Geostand. Newsletter. 2000. V. 24. № 2. P. 227–240.
8. Летников Ф.А., Савельева В.Б., Аникина Ю.В. // ДАН. 1996. Т. 347. № 6. С. 795–798.
9. Карпов И.К., Чудненко К.В., Бычинский В.А. и др. // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. С. 3–21.
10. Плюснина Л.П., Кузьмина Т.В., Шека Ж.А., Авченко О.В. В кн.: Платина России. М., Геоинформмарк. 1999. Т. 4. С. 233–237.
11. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Некрасов И.Я. // ДАН. 2000. Т. 370. № 1. С. 99–101.
12. Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А. и др. Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов. М.: Наука, 1994. 375 с.