

553.411.071

## ПРИЗНАКИ ПЛАВЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В РУДАХ СВЕТЛИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ЮЖНЫЙ УРАЛ, РОССИЯ

© 2023 г. О. В. Викентьева<sup>1,\*</sup>, академик РАН Н. С. Бортников<sup>1</sup>

Поступило 30.08.2023 г.

После доработки 10.09.2023 г.

Принято к публикации 12.09.2023 г.

Для крупного Светлинского золоторудного месторождения (Южный Урал) приводятся признаки частичного плавления минералов и возможного участия полиметаллических расплавов в концентрировании и перераспределении золота и других металлов. Обнаружение в рудах минералов висмута и сурьмы, среди которых есть новые для месторождения минералы золота (пампалоит, монтбрейит и аурустибит), специфические минеральные сростания (полиминеральные Sb–Bi–Pb–Te–Ag–Au каплевидные включения), обогащение ранних сульфидов халькофильными элементами с низкой температурой плавления (LMCE), высокие температуры образования рудных ассоциаций (до 400°C), а также проявленный на месторождении метаморфизм амфиболитовой фации указывают на возможность образования таких расплавов. Полиметаллические расплавы на месторождении могли образоваться и при частичном плавлении ранних сульфидов, и непосредственно из гидротермальных флюидов. К признакам плавления так же отнесены симплектиты калаверита и самородного золота в краевых частях крупного зерна монтбрейита.

*Ключевые слова:* Светлинское месторождение, золото, полиметаллические расплавы

**DOI:** 10.31857/S2686739723602016, **EDN:** BLPCSF

В настоящее время имеются доказательства участия полиметаллических расплавов не только в образовании обедненных флюидами высокометаморфизованных сульфидных месторождений, но также и в гидротермальных месторождениях (например, [1–5] и др.). Полиметаллические расплавы, содержащие халькофильные элементы с низкой температурой плавления (Ag, As, Au, Bi, Hg, Sb, Se, Sn, Tl, Te, Pb; LMCE по [2]), могут образоваться в результате частичного плавления ранее отложенной руды [6] или образоваться непосредственно из гидротермальных флюидов [7]. Такие расплавы обладают способностью поглощать Au из флюида, не требуя его насыщения (Au–Bi расплавы, [7]; Au–Bi–Te расплавы, [8]). Чаще всего расплавы висмута (модель LBCM “Liquid Bismuth Collector Model”, [9]) рассматриваются как “поглотители” для Au из недонасыщенных растворов (например, [10]). В последние годы появляются свидетельства участия других элементов в обогащении полиметаллических расплавов (например, Pb–Bi и Pb расплавы [11]; Au–Ag–Te расплавы [12]) и эффективном поглоще-

нии этими расплавами микроэлементов, в частности Au, из гидротермальных флюидов. Полиметаллические расплавы обладают высокой подвижностью из-за низкой вязкости, близкой к вязкости воды, что позволяет им легко мигрировать и концентрироваться в благоприятных структурах. Образование полиметаллических расплавов может приводить к локальной концентрации LMCE в рудах, что может отразиться на минералогии как редких, так и основных компонентов руд. Это важно как для экономической оценки месторождения, так и для оценки экологических рисков для окружающей среды при их разработке.

Особенностью полиметаллических расплавов, в отличие от силикатных, является то, что они при застывании образуют сложные сростания минералов, которые имеют тенденцию восстанавливать равновесие при очень низких температурах [2]. По этой причине свидетельства существования полиметаллического расплава обычно отсутствуют или слабо проявлены.

Светлинское золоторудное месторождение является примером крупного полигенного и полихронного месторождения [13]. Источники металлов, механизмы их концентрирования и перераспределения в рудах месторождения дискуссионны и, вероятно, множественны. Обнаружение нами в

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: ovikenteva@rambler.ru

рудах минералов висмута и сурьмы, специфические минеральные сростания, высокие температуры образования рудных ассоциаций, а также сопряжение продуктивной минерализации с внедрением синорогенных гранитоидов и метаморфизмом амфиболитовой фации, позволило нам предположить возможное участие полиметаллических расплавов в концентрировании и перераспределении золота и других компонентов при образовании руд этого месторождения.

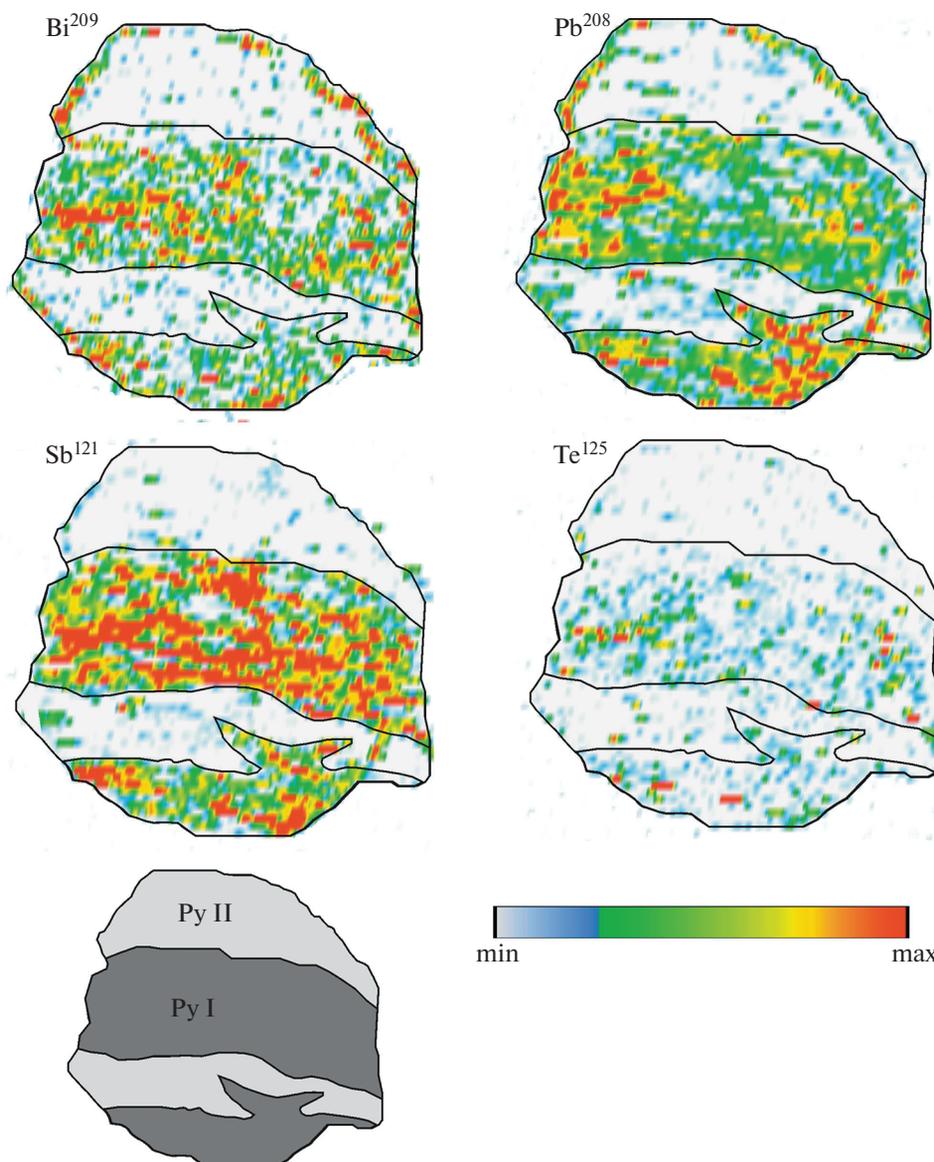
Светлинское золоторудное месторождение (54°17' с.ш., 60°25' в.д.) находится в Челябинской области в 40 км от г. Пласт (Южный Урал). Месторождение входит в число 15 крупнейших месторождений золота России: запасы золота оцениваются в 164 т при среднем содержании 1.44 г/т [14], а суммарные запасы, с учетом отработанных за 30 лет (с 1992 г.) – около 210 т. Месторождение расположено в Восточно-Уральской мегазоне в зоне сочленения Кочкарского антиклинория с Арамильско-Сухтелинским синклиномом. Нетрадиционные для Урала прожилково-вкрапленные золото-сульфидно-теллуридные руды концентрируются в глубоко метаморфизованных (до амфиболитовой фации) вулканогенно-осадочных и терригенных породах, залегающих в надинтрузивной зоне гранитоидного плутона [13, 15]. На месторождении выделяется два типа минерализации. Первый тип представлен вкрапленностью пирит-пирротинового состава во вмещающих породах; второй – системой сульфидно-кварцевых жил и прожилков, наложенных на зоны вкрапленной минерализации. Самородное золото в сульфидно-кварцевых жилах часто ассоциирует с теллуридами золота и серебра и имеет пробность 620–965. На месторождении выделено 3 стадии минералообразования: (1) кварц-пирит-пирротиновая с редкими халькопиритом, блеклой рудой, галенитом и самородным золотом; (2) кварц-пиритовая с шеелитом и (3) золото-теллуридная (главная продуктивная) с несколькими минеральными ассоциациями сульфидов, сульфосолей и теллуридов, разделенных локальными тектоническими событиями. Теллуриды обычно приурочены к трещинам в жильном кварце, образуя самостоятельные сростания, реже выделения в пирите, халькопирите, тетраэдрите. К наиболее ранним относятся мелонит, фробергит, алтаит в составе сфалерит-халькопирит-теллуридного парагенезиса. Далее следуют теллурантимон, теллуриды золота, петцит, их сменяют цумоит-гессит и гессит в составе халькопирит-тетраэдритового парагенезиса. Исследования флюидных включений в кварце разных генераций показали, что минерализация на Светлинском месторождении формировалась в широком диапазоне температур и давлений (200–400°C и 1–4 кбар). Температура минералообразования не снижалась от ранней к поздней стадии, но было зафиксировано сниже-

ние температуры внутри каждой стадии (1 – 315–286°C, 2 – 345–195°C, 3 – 405–295°C, [15]). Ранее также указывалось, что продуктивная минерализация образовалась в высокотемпературных условиях [13]. На месторождении проявлено два этапа метаморфизма: ранний, зеленосланцевой фации, и поздний, прогрессивная ветвь которого отвечает гранат-роговообманковой, а регрессивная – биотитовой и хлоритовой субфациям амфиболитовой фации. Максимальная температура прогрессивной стадии составляла ~660°C [13], приближаясь к верхнему температурному пределу амфиболитовой фации.

Детальные минераграфические исследования руд месторождения с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгено-спектрального микроанализа (РСМА), дифракции отраженных электронов (ДОЭ) обнаружили новые минералы формы сурьмы и висмута, не описанные ранее в рудах месторождения: ульманнит NiSbS, нисбит NiSb<sub>2</sub>, бурнонит PbCuSbS<sub>3</sub>, робинсонит Pb<sub>4</sub>Sb<sub>6</sub>S<sub>13</sub>, теллурантимон Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, монбрейит (Au,Ag,Sb,Bi,Pb)<sub>23</sub>(Te,Sb,Bi,Pb)<sub>38</sub>, пампалоит AuSbTe, вавринит Ni<sub>2</sub>SbTe<sub>2</sub>, аурустибит AuSb<sub>2</sub>, цумоит BiTe, теллуrowисмутит Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, волинскит AgBiTe<sub>2</sub>, тетрадимит Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>S и минералы промежуточного состава ряда Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>–Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ((Sb<sub>2-x</sub>Bi<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, где 0.44 < x < 0.89 и (Bi<sub>2-x</sub>Sb<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, где 0.23 < x < 0.70). Использование масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) позволило изучить распределение LMCE в сульфидах из вкрапленных и жильных руд.

Ранний пирит по данным ЛА-ИСП-МС (использовались стандарты UQAC FeS-1 и MASS-1 SRM) содержит (в ppm): Au до 16.0, Ag до 146.3, As 4.3–58.2, Sb 0–50.8, Te 4.6–192.2, Bi до 76.4. Поздний пирит содержит (ppm): Au до 3.4, Ag 0.1–2.5, As 8.3–330, Sb 0.4–9.2, Te 1.9–152, Bi 0.1–0.6. Ранний пирит обогащен LMCE (Au, Ag, Sb, Bi, Te) по сравнению с поздним пиритом (рис. 1).

Обнаружение разнообразия минералов висмута и сурьмы, среди которых есть новые для месторождения минералы золота – пампалоит, монбрейит и аурустибит – позволило нам предположить возможное участие этих элементов в образовании полиметаллических расплавов в рудах месторождения. При изучении руд с помощью оптической и сканирующей микроскопии были обнаружены признаки плавления и образования полиметаллических расплавов на месторождении. К ним мы относим симплектиты калаверита и самородного золота на контакте монбрейита и фробергита (рис. 2), а также многочисленные многофазовые каплевидные включения в тетраэдрите-(Zn), реже в пирите (рис. 3).



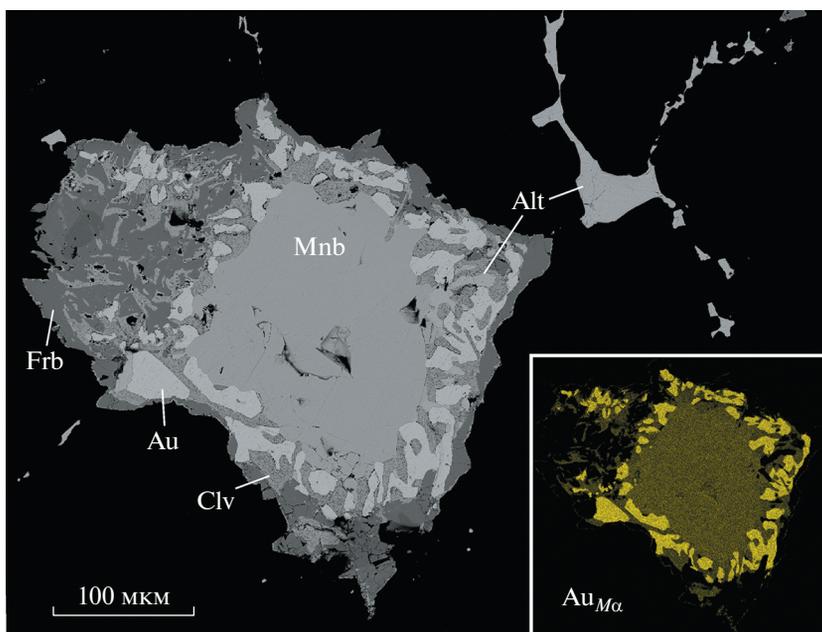
**Рис. 1.** Распределение элементов с низкой температурой плавления (LMCE) в пирите разных генераций Светлинского месторождения.

Принимая во внимание экспериментальные работы для монтбрейита и системы Au–Sb–Te, мы полагаем, что при высоких температурах (>400°C) образование таких сростаний могло быть инициировано плавлением с дальнейшим участием реакций растворения-переотложения ([16] и ссылки в этой работе).

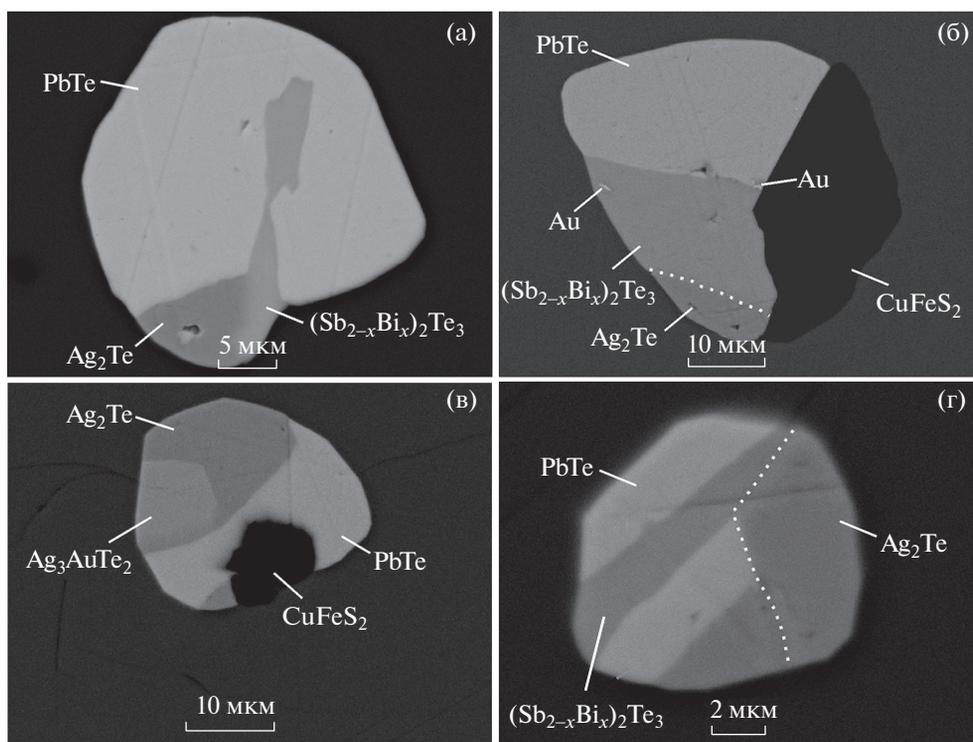
Полиминеральные включения округлой или каплевидной формы в тетраэдрите-(Zn) можно разделить на 3 группы: (1) многокомпонентные Sb–Bi–Pb–Te–Ag–Au включения размером 10–50 мкм, содержащие 3–5 минералов; (2) мелкие (5–7 мкм) Au–Ag–Te включения, содержащие обычно два минерала; (3) Sb–Bi–Pb–Te включения размером около 50 мкм, содержащие два ми-

нерала. Минеральный состав включений приведен в табл. 1.

Наиболее часто встречаются включения первой группы. Иногда в них присутствует халькопирит. Присутствие халькопирита во включениях полиметаллических расплавов типично для некоторых месторождений [4]. Самородное золото в составе включений низкопробное, в среднем  $Au_{0,65}Ag_{0,35}$ , иногда содержит примесь меди. В пирите присутствуют Au–Ag–Te включения, содержащие два-три минерала, часто в их составе присутствуют сульфиды (халькопирит, галенит, сфалерит). Если рассчитать состав включений (“капель”) по формулам входящих компонентов, предполагая их равные пропорции, то, как пред-



**Рис. 2.** Симплектитовые сростания самородного золота и калаверита, возникшие при частичном плавлении мон-тбрейита. На врезке – изображение в характеристических лучах золота. Mnb – монтбрейит, Frb – фробергит, Au – самородное золото, Clv – калаверит, Alt – алтаит.



**Рис. 3.** Примеры многофазных каплевидных включений, содержащих ЛМСЕ, в тетраэдрите-(Zn) в рудах Светлинско-го месторождения.  $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3$ , где  $0.44 < x < 0.89$ .

полагают К. Чиобану и соавт. [10], расплавы с соотношением компонентов между металлами (Au, Bi, Pb) и S (+Te, Se)  $\geq 1$  лучше подходят для

вхождения в них Au. Мы наблюдаем выделения самородного золота во включениях с отношением  $\geq 1$ . Но надо учитывать, что такие расчеты не

Таблица 1. Состав полиминеральных включений

Минерал-хозяин	Минеральная ассоциация включения
Тетраэдрит-(Zn)	$(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe + Ag_2Te \pm CuFeS_2$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe + Ag_2Te + Au$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe + Ag_3AuTe_2 + Au$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe + Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe + Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te + Au$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te + Au$ $(Sb_{2-x}Bi_x)_2Te_3 + PbTe$ $Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te$
Пирит	$Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te + ZnS(6 \text{ мас.}\% \text{ Fe})$ $Ag_2Te + Au + PbS$ $Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te + Au$ $Ag_3AuTe_2 + Ag_2Te$ $AgBiTe_2 + Ag_2Te + CuFeS_2$

представляют реальные составы расплава и используются для сравнения между ассоциациями во включениях. Возможно, мы наблюдаем разновременно образованные полиметаллические расплавы: сначала образовались расплавы, обогащенные Sb–Bi–Pb–Ag, позже Au–Ag–Te расплавы. Сформировавшиеся на ранних фазах процесса плавления полиметаллические расплавы могут содержать значительные количества Sb и Ag [2].

Максимальная температура метаморфизма амфиболитовой фации (до 660°C) могла способствовать частичному плавлению ранних сульфидов, обогащенных LMCE, и поступлению последних в полиметаллический расплав. Важную роль в снижении температуры плавления могло сыграть Ag: в системе PbS–FeS–ZnS–Ag<sub>2</sub>S добавление всего 1 мас. % Ag<sub>2</sub>S понижает температуру плавления на 28°C [1]. Многоэлементный состав включений затрудняет оценку температур плавления из-за отсутствия экспериментальных данных для таких многокомпонентных систем. Однако данные для тройных систем LMCE, образующих фазы во включениях, показывают наличие эвтектик в интервале температур, соответствующем условиям образования рудных жил и проявленного на месторождении метаморфизма. На основе тройных фазовых диаграмм при температуре ниже 400°C эвтектики существуют в системах Au–Ag–Te (304–330°C [17]), Au–Bi–Te (235–383°C [18]), Au–Pb–Te (388°C [19]), Au–Sb–Te (356–396°C [20]), Ag–Pb–Te (337°C). Эксперименты по плавлению включений, обогащенных Au–Ag–Te фазами и содержащих также алтаит, халькопирит, борнит и галенит [12], показали, что

такие включения начинали плавиться уже при температуре 135–170°C.

Полученные нами данные об обогащении ранних сульфидов Светлинского золоторудного месторождения халькофильными элементами с низкой температурой плавления (LMCE), а также наличие в пирите и блеклой руде каплевидных включений, обогащенных LMCE, позволяет нам рассматривать механизм концентрирования и перераспределения золота и других компонентов полиметаллическими расплавами в рудах месторождения как один их возможных. Вероятно, на месторождении можно рассматривать вовлечение обоих механизмов образования полиметаллических расплавов – и при частичном плавлении сульфидов [6], и при образовании непосредственно из гидротермальных флюидов [7].

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме госзадания ИГЕМ РАН (тема № 121041500220-0), аналитические исследования проведены в ЦКП “ИГЕМ АНАЛИТИКА” (РСМА – Е.В. Ковальчук, СЭМ – О.А. Дойникова, Л.О. Магазина, ЛА-ИСП-МС – В.Д. Абрамова) и в ресурсном центре “Геомодель”, СПбГУ (ДОЭ – В.В. Шилловских).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mavrogenes J.A., Macintosh I.W., Ellis D.J.* Partial melting of the Broken Hill galena-sphalerite ore – experimental studies in the system PbS–FeS–ZnS–(Ag<sub>2</sub>S) // *Economic Geology*. 2001. V. 96. P. 205–210.
2. *Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G.* Partial melting of sulfide ore during medium and high-grade meta-

- morphism // *Canadian Mineralogist*. 2002. V. 40. P. 1–18.
3. *Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Zaleski E.* The Hemlo gold deposit, Ontario: an example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation // *Economic Geology*. 2004. V. 99. P. 1063–1084.
  4. *Cook N.J., Ciobanu C.L., Mao J.W.* Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China) // *Chemical Geology*. 2009. V. 264. P. 101–121.
  5. *Vikentyev I.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Moloshag V.P.* Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. *Ore geology // Ore Geology Reviews*. 2017. V. 85. P. 30–63.
  6. *Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Frost B.R.* On the initiation of metamorphic sulfide anatexis // *J Petrology*. 2007. V. 48. P. 511–535.
  7. *Tooth B., Ciobanu C.L., Green L., O'Neill B., Brugger J.* Bi-melt formation and gold scavenging from hydrothermal fluids: an experimental study // *Geochim Cosmochim Acta*. 2011. V. 75. P. 5423–5443.
  8. *Wagner T.* Thermodynamic modeling of Au-Bi-Te melt precipitation from high temperature hydrothermal fluids: preliminary results // *Mineral Exploration and Research: Digging Deeper. Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting*, Dublin. 2007. P. 769–772.
  9. *Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R.* The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism // *AGC Abstracts*. 2000. V. 59. P. 135.
  10. *Ciobanu C.L., Cook N.J., Damian F., Damian G.* Gold scavenged by bismuth melts: An example from Alpine shearremobilizates in the Highis Massif, Romania // *Mineralogy and Petrology*. 2006. V. 87. P. 351–384.
  11. *Cave B.J., Barnes S.-J., Pitcairn I.K., Sack P.J., Kuikka H., Johnson S.C., Duran C.J.* Multi-stage precipitation and redistribution of gold, and its collection by lead-bismuth and lead immiscible liquids in a reduced-intrusion related gold system (RIRGS); Dublin Gulch, western Canada // *Ore Geology Reviews*. 2019. V. 106. P. 28–55.
  12. *Jian W., Mao J.W., Lehmann B., Cook N.J., Xie G.Q., Liu P., Duan C., Alles J., Niu Z.J.* Au-Ag-Te-rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaqingling lode gold district, central China // *Economic Geology*. 2021. V. 116. P. 1239–1248.
  13. *Сазонов В.Н., Попов Б.А., Григорьев Н.А., Мурзин В.В., Мецнер Э.И.* Корово-мантинское оруденение в салических блоках эвгеосинклинали. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 112 с.
  14. *Федосеев В.В., Рябов Ю.И., Гаджиева Л.А.* Переоценка золоторудных месторождений Челябинской области – основа развития минерально-сырьевой базы АО “ЮГК” // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. Вып. 4. С. 547–560.
  15. *Vikent'eva O., Prokofiev V., Borovikov A., Kryazhev S., Groznova E., Pritchinn M., Vikentyev I., Bortnikov N.* Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals // *Minerals*. 2020. V. 10 (1). 37.
  16. *Vikent'eva O.V., Shilovskikh V.V., Shcherbakov V.D., Moroz T.N., Vikentyev I.V., Bortnikov N.S.* Montbrayite from the Svetlinsk gold-telluride deposit (South Urals, Russia): composition variability and decomposition // *Minerals*. 2023. V. 13(9). 1225.
  17. *Cabri L.J.* Phase relations in the Au–Ag–Te systems and their mineralogical significance // *Economic Geology*. 1965. V. 60. P. 1569–1606.
  18. *Gather B., Blachnik R.* Das System Gold-Wismut-Tellur // *Z Metallkunde*. 1974. V. 65. P. 653–656.
  19. *Legendre B., Souleau C.* Etude du systeme ternaire Au–Pb–Te // *Soc Chim France Bull*. 1972. V. 1. P. 473–479.
  20. *Gather B., Blachnik R.* Das ternäre System Gold-Antimon-Tellur // *International Journal of Materials Research*. 1976. V. 67. P. 395–399.

## EVIDENCES OF MINERAL MELTING IN THE ORES OF THE SVETLINSK GOLD DEPOSIT, SOUTH URALS, RUSSIA

O. V. Vikent'eva<sup>a,#</sup> and Academician N. S. Bortnikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: ovikenteva@rambler.ru*

For the large Svetlinsk gold deposit (South Urals) evidences of partial melting of minerals and possible participation of polymetallic melts in the concentration and redistribution of gold and other metals are given. Finding of bismuth and antimony minerals in ores, among which there are gold minerals new to the deposit (pampaloite, montbrayite and aurostibite), specific mineral intergrowths (polymetallic Sb–Bi–Pb–Te–Ag–Au drop inclusions), enrichment of early sulphides with Low-Melting-point Chalcophile Elements (LMCE), high formation temperatures for ore assemblages (up to 400°C), as well as the occurring metamorphism of amphibolite facies indicate the possibility of the formation of such melts. Polymetallic melts at the deposit could be formed both by partial melting of early sulphides and directly from hydrothermal fluids. The signs of melting also include simplectites of calaverite and native gold in the marginal parts of the large montbrayite grain.

*Keywords:* Svetlinsk deposit, gold, polymetallic melts