

**ВИСМУТ-ТЕЛЛУРОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ НАМОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ, ДВ РОССИИ)****А.А. Гребенникова^{1,3}, В.Н. Бахтина^{1,3}, К.Н. Доброшевский^{2,3}, Н.А. Горячев³, Д.Г. Федосеев¹**¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; e-mail: anylotina@mail.ru²ООО «Малиновское», Приморский край, Дальнереченский р-н, с. Ариадное, Россия³Северо-Восточное отделение, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия

Поступила в редакцию 10 апреля 2025 г.

Детальные минералогические исследования руд Намовского месторождения позволили выявить разнообразие минерального состава. На месторождении Намовском выделено две стадии рудообразования, для которых характерны различные по составу минералы висмута и теллура. Всего выделено и изучено восемь групп минералов висмута и теллура. Для первой стадии рудообразования установлены самородный висмут, интерметаллид золота (мальдонит Au_2Bi), разные по составу теллуриды и сульфотеллуриды висмута (хедлейит Bi_2Te , пильзенит Bi_4Te_3 , тетрадимит $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$, жозеит-А Bi_4TeS_2 , жозеит-В $\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$). Во второй стадии кристаллизовались разнообразные по составу Pb-Bi сульфосоли (ашамальмит $\text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$, викингит $\text{Ag}_5\text{Pb}_8\text{Bi}_{13}\text{S}_{30}$, галенобисмутит PbBi_2S_4 , канницарит $\text{Pb}_8\text{Bi}_{10}\text{S}_{23}$, козалит $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$, лиллианит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, наффилдит $\text{Pb}_2\text{Cu}(\text{Pb},\text{Bi})\text{Bi}_2\text{S}_7$), сульфиды висмута (висмутин Bi_2S_3 , икунолит Bi_4S_3), сульфовисмутит Ag (матильдит AgBiS_2), теллурид серебра – гессит Ag_2Te . В сульфотеллуридах висмута установлены постоянные элементы-примеси Pb, Ag, Se. В Pb-Bi сульфосолях типоморфной примесью является Ag. Первая рудная стадия сформирована при высокой температуре в пределах от 530 °C до 270 °C, а также с низкой фугитивностью серы $f\text{S}_2$ и высокой $f\text{Te}$. Вторая рудная стадия сформирована при температурном диапазоне от 350 до 150 °C.

Ключевые слова: висмут, теллуриды, сульфотеллуриды, Bi-Pb-сульфосоли, Приморье, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Намовское входит в состав Малиновского рудного узла, расположенного в Дальнереченском муниципальном районе Приморского края, в верхнем течении р. Малиновка, в бассейне ручьев Намов, Левый Намов и Правый Намов, в состав которого, помимо него, входит Малиновское месторождение [4].

Не смотря на то, что данный золоторудный объект известен давно и на нем систематически проводились поисковые работы на золото, сведения о минеральном составе руд, а особенно по висмутовой минерализации, имеют весьма ограниченный характер. Данные о геологическом строении месторождения, минералогии руд и условиях формирования золоторудной минерализации охарактеризованы в более ранней работе [4]. Согласно этим исследованиям установлено, что руды месторождения сформирова-

лись в тесной связи с проявлением монцонитоидного магматизма раннемелового возраста на фоне активных левосторонних перемещений по Центрально-Сихотэ-Алинскому разлому. Минералого-геохимические особенности руд и геологическое строение месторождения Намовское указывают на его принадлежность к типу золоторудных месторождений обстановок трансформной континентальной окраины. Высказано предположение о мантийном источнике рудной минерализации [4].

Как известно, минералы висмута и теллура являются минералами-индикаторами, которые отображают условия образования объекта. В рудах месторождения Намовское установлены и изучены разнообразные по составу висмутовые минералы, которые отражают нестабильные условия кристаллизации и неоднородность рудного флюида. В настоящей работе приводятся результаты детальных исследований теллуридов, сульфотеллуридов висмута и Pb-Bi сульф-

фосолей месторождения Намовское. Полученные данные позволяют установить условия образования висмутовой минерализации. Целью данной статьи является систематизирование и обобщение сведений по висмут-теллуровой минерализации, уточнение типоморфных особенностей и условий образования минералов висмута и теллура. Одной из основных задач данного исследования является выяснение места висмутовой минерализации в процессе рудообразования и ее взаимоотношения с другими минеральными ассоциациями, образовавшими данное месторождение.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Месторождение Намовское [4–7] локализовано в переходной зоне между Евразийским континентом и Тихоокеанской плитой, в пределах зоны влияния Центрального Сихотэ-Алинского разлома, который представляет собой левосторонний сдвиг [7, 17–19]. Месторождение Намовское расположено в пределах Журавлевско-Амурского террейна, среди терригенных отложений журавлевской и ключевской свит (Белянский, 2011). Весь комплекс осадочных образований смят в линейные складки северо-восточного простирания. Осадочные породы прорваны монцонитами Водораздельного интрузива, отнесенного к татибинскому диорит-гранитовому комплексу [15], а также дайками пестрого состава и возраста. Основными разновидностями интрузивных пород являются габбро-и монцодиориты, реже отмечаются граносиениты и кварцевые сиенит-порфиры, которые встречаются в виде шпировидных выделений в монцодиоритах. Согласно U-Pb SHRIMP датировкам, возраст интрузива оценивается в 105–103 млн лет [16]. Дайковые образования представлены маломощными телами диорит-порфиров и лампрофиров (камptonитов) заключительной фазы татибинского комплекса. Рудные тела месторождения Намовское локализованы в восточном экзоконтакте Водораздельного интрузива монцонитов (рис. 1). Они залегают преимущественно в терригенных породах журавлевской и ключевской свит, реже непосредственно в монцонитах Водораздельной интрузии (зоны Намовское 1 и 2) [4]. Рудные тела представлены сульфидными, сульфидно-кварцевыми жилами и зонами сульфидно-кварц-турмалиновых метасоматитов, а также минерализованными зонами дробления.

Жилы и жильные зоны образуют два участка, расположенных в 1.5 км друг от друга, северный – Верхне-Намовский (Намовская-1, 2 и Дальняя) и южный – Лево-Намовский (Широтная, Ближняя, Зимняя, Придорожная, Арсенопиритовая, Кварцевая, Майская, Пологая), отличающихся простиранием рудных тел:

субширотно-северо-восточным и субширотно-северо-западным, соответственно.

Рудные тела участка Верхне-Намовский, локализованные непосредственно в монцонитах интрузива, представлены зонами сульфидно-кварц-турмалиновых метасоматитов мощностью от 4 до 10–11 метров при протяженности в первые сотни метров. Сульфидные и сульфидно-кварцевые жилы (0.1–0.6 м) слагают рудные тела других участков за пределами интрузива и сопровождаются прожилково-вкрапленной минерализацией во вмещающих породах, особенно характерной для южной части месторождения (зона Зимняя). Одиночными скважинами они прослежены до глубины 100–250 м. Рудные тела зон Зимней, Арсенопиритовой, Кварцевой, Придорожной, Дальней, как правило, сульфидно-кварцевые, кварц-сульфидные жилы с вкрапленностью и прожилками кварц-сульфидного состава во вмещающих породах. Иногда жилы переходят в зоны кварц-сульфидного (кварц-лимонитового из-за процессов окисления) прожилкования во вмещающих породах. Вторичные изменения, сопровождающие рудные тела, – окварцевание, хлоритизация, серицитизация и турмалинизация. Характерно, что турмалинизация сопровождает все рудные тела Намовского в той или иной степени, но в северной части (зоны Намовская, Намовская 1) она преобладает [4]. Жильные минералы на месторождении представлены кварцем, карбонатом, реже турмалином. Рудная минерализация представлена сульфидами и сульфоарсенидами – арсенопиритом, данаитом, пиритом, халькопиритом, пирротинном, сфалеритом и галенитом; минералами висмута: сульфотеллуридами – жозеитом А, В, тетрадимитом и теллуридами висмута – хедлейитом, пильзенитом; сульфосолями Pb-Bi – козалитом, лиллианитом, канницаритом, галенобисмутитом, наффилдитом, ашамальмитом, Ag-Bi – матильдитом; сульфидом висмута – висмутином, икунолитом; минералами серебра: теллуридом и хлоридом серебра – гесситом и хлораргиритом; сульфидом серебра – акантитом; интерметаллидом золота – мальдонитом; самородными висмутом и золотом.

Методика исследования

В процессе полевых исследований проводились маршрутные наблюдения и документация канав и керн на разведочных скважинах с отбором образцов пород и руд в пределах Намовского месторождения. Отобранный материал исследован в лабораториях аналитического центра Дальневосточного геологического института ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток). Все полировки изучены под рудным микроскопом с применением высокоразрешающего микроскопа

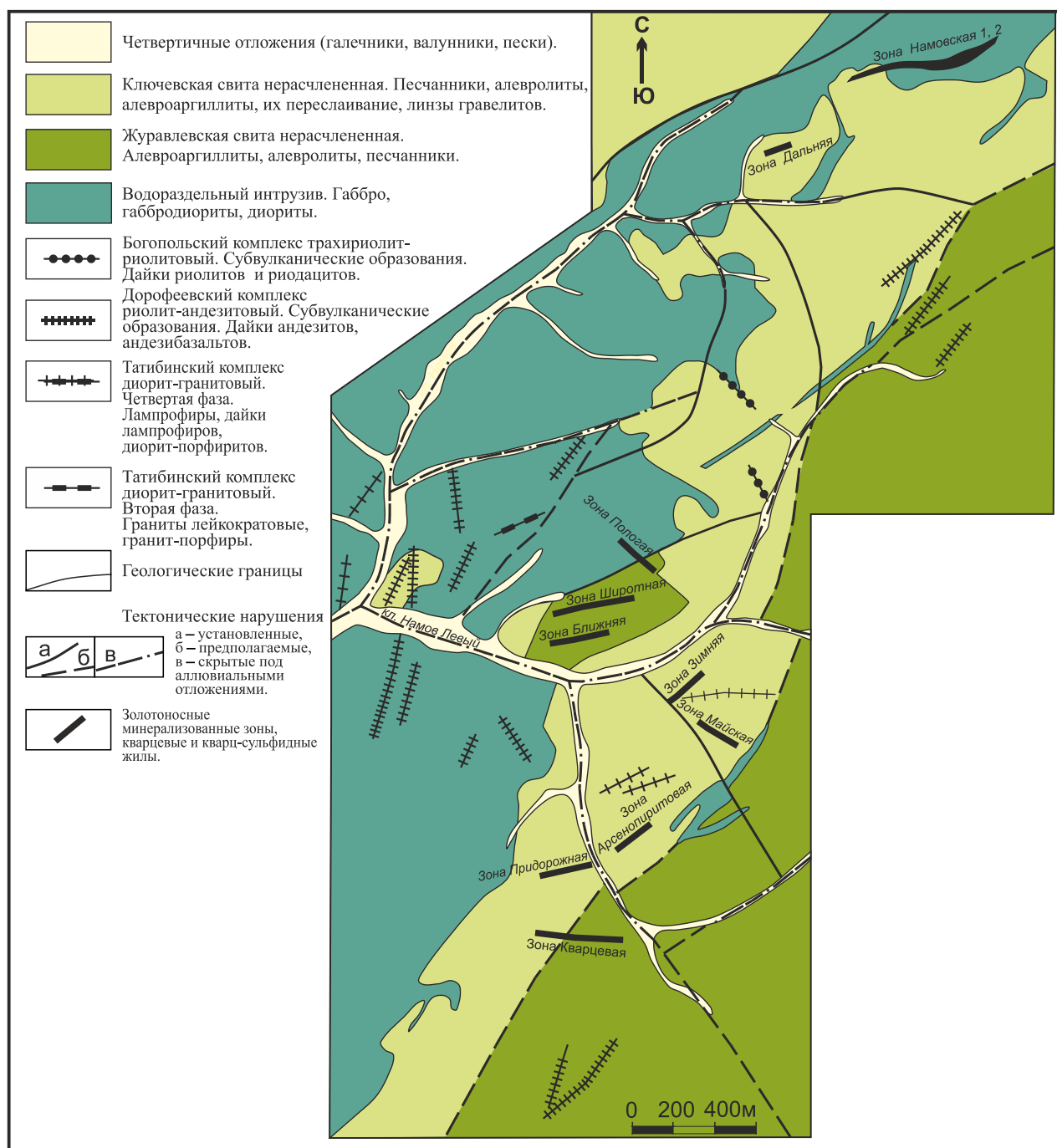


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Намовское (по материалам Белянского Г.С. (2012 г.), Михайлова В.А. (1998 г.), Доброшевского К.Н. (2012 г.)).

Axioplan 2 (Carl Zeiss, Германия) в отраженном свете. С целью определения химического состава рудных минералов, а также диагностики неизвестных минералов был использован электронно-зондовый микроанализатор JXA-8100 с системой INCA-sight. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ; ток зонда – 10 нА, диаметр зонда – 1–2 мкм.

В качестве эталонов использованы природные и синтетические соединения, близкие по составу к анализируемому материалу. Висмутин (Bi-La), антимонит (Sb-La), галенит (Pb-La), сфалерит (Zn-Ka), золото чистое (Au-La), серебро чистое (Ag-La), медь чистая (Cu-Ka), Fe , S-FeS_2 (Fe-Ka , S-Ka), Te-CdTe (Cd-La , Te-La), Se-Se чистый (Se-La). Пределы

обнаружения элементов составляют: Au 0.05 мас. %, Ag 0.04 мас. %, Bi 0.05 мас. %, Te 0.03 мас. %, Sb 0.04 мас. %, S 0.01 мас. %, Se 0.05 мас. %, Pb 0.05 мас. %, Fe 0.02 мас. %, Cu 0.02 мас. %, Zn 0.02 мас. %. Аналитик: Г.Б. Молчанова.

Исследования флюидных включений выполнены в ДВГИ ДВО РАН. Для термо- и криометрических исследований использовался Nikon E – 600 POL Optical Microscope for Geological Studies в комплекте с цифровой телекамерой, термостолком и криостолком THMS 600 (-190 + 600 °C). Концентрация солей во включениях рассчитывалась по температуре плавления льда либо по температуре плавления галита с использованием данных из работы [20]. Солевой состав растворов определялся по температуре эвтектики [1]. Плотность растворов в вакуолях определялась по концентрации солей в растворе и его температуре гомогенизации, используя данные из работы [11]. Давление рассчитано по методике Г.Б. Наумова [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На месторождении Намовское в основном преобладают сульфидно-кварцевые руды, реже встречаются сульфидные прожилки и массивные руды. В минеральном составе изученных кварцевых жил и прожилков преобладают кварц, карбонат, хлорит и турмалин. Руды в основном представлены кварцем (70–80 %) и сульфидами (15–25 %). Основная масса рудных тел складывается сульфоарсенидами и сульфидами: арсенопирит, пирит, халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, которые образуют тесные взаимные прорастания. Висмутеллуровые минералы наблюдаются в качестве включений в сульфидах и мелких прожилках, заполняющих трещины в ранних минералах. Описание висмутовых и висмутосодержащих минералов, сульфидов дано по мере их распространенности на месторождении Намовское.

Среди сульфоарсенидов и сульфидов на месторождении встречаются арсенопирит (I), арсенопирит (II), пирит (I), пирит (II), пирит (III), халькопирит, пирротин, сфалерит и галенит. Две генерации арсенопирита выделены на фоне эволюционной направленности и сменой мышьяковистого арсенопирита более сернистым. Типоморфной особенностью арсенопирита (I) является преобладание мышьяка над серой $As/S > 1$, в то время как в арсенопирите (II) доминирует сера над мышьяком ($As/S < 1$). В арсенопирите (I) установлены включения самородных висмута и золота, теллуридов и сульфотеллуридов висмута и мальдонита. В позднем арсенопирите (II) установлены включения самородного висмута и золота, икунолита, висмутина, Pb-Bi сульфосолей и галенита. В составе некоторых индивидов пирита (I) фиксируется примесь

никеля и включения хедлейита и тетрадимита. В пирите (II) установлена примесь мышьяка, а более поздний пирит (III) имеет зональное строение за счет примеси меди, в нем установлены включения галенита и гессита. Пирротин зафиксирован в сростании с арсенопиритом (II) и халькопиритом. В последнем он образует грубопелитчатые структуры распада твердого раствора. Установлены включения Pb-Bi сульфосолей в пирротине. Халькопирит образует сростание с пирротинном, заполняет прожилки в арсенопирите (I). Характерен распад твердого раствора, который представлен эмульсионной или звездчатой вкрапленностью железистого сфалерита в халькопирите [4]. Pb-Bi сульфосоли, гессит и акантит, образуют микровключения в халькопирите. В изученных галенитах, в некоторых индивидах, фиксируется примесь серебра и висмута. Для галенита характерно сростание с матильдитом, канницаритом, самородным висмутом и золотом. Более подробное описание сульфидов приведено в статье [4]. На месторождении Намовское нами выделены две продуктивные стадии рудообразования: (1) главная рудная с двумя минеральными ассоциациями Со-арсенопирит-самородный висмут-мальдонит и вторая ассоциация арсенопирит-теллуриды и сульфотеллуриды висмута с самородным золотом (775–875 ‰, редко 990 ‰); (2) поздняя продуктивная также с двумя последовательными ассоциациями арсенопирит-пирит-халькопиритовой и полисульфидно-сульфосольной с висмутином, сульфосолями висмута и серебра, матильдитом, гесситом, акантитом, хлораргиритом ($AgCl$) и золотом (600–750 ‰). Нами в рудах месторождения Намовское выделено восемь групп минералов висмута и теллура: 1) самородный висмут; 2) интерметаллид золота (мальдонит); 3) теллурид (хедлейит, пильзенит); 4) сульфотеллуриды (тетрадимит, жозеит -А, -В); 5) сульфид (висмутин, икунолит); 6) сульфовисмутит Ag (матильдит); 7) Pb-Bi сульфосоли (ашамальмит, канницарит, козалит, лиллианит, наффилдит, галенобисмутит); 8) гессит. Bi-содержащие фазы неоднородно распределены в разных рудных ассоциациях. Основной особенностью изученных висмутовых минералов является постоянное присутствие в них элементов-примесей (Pb, Se) [4]. Более подробное описание минералов висмута и теллура приведено далее.

Самородные элементы

Самородное золото (Au) на месторождении Намовское имеет две генерации. Ранняя генерация самородного золота образует каплевидные, изометричные формы в арсенопирите (I) первой рудной стадии (рис. 2), иногда выполняет пустоты и трещины в нем. Размер зерен самородного золота варьируется от 1 до 30 мкм. Для него характерна ассоциация с самородным висмутом, мальдонитом, теллуридами и суль-

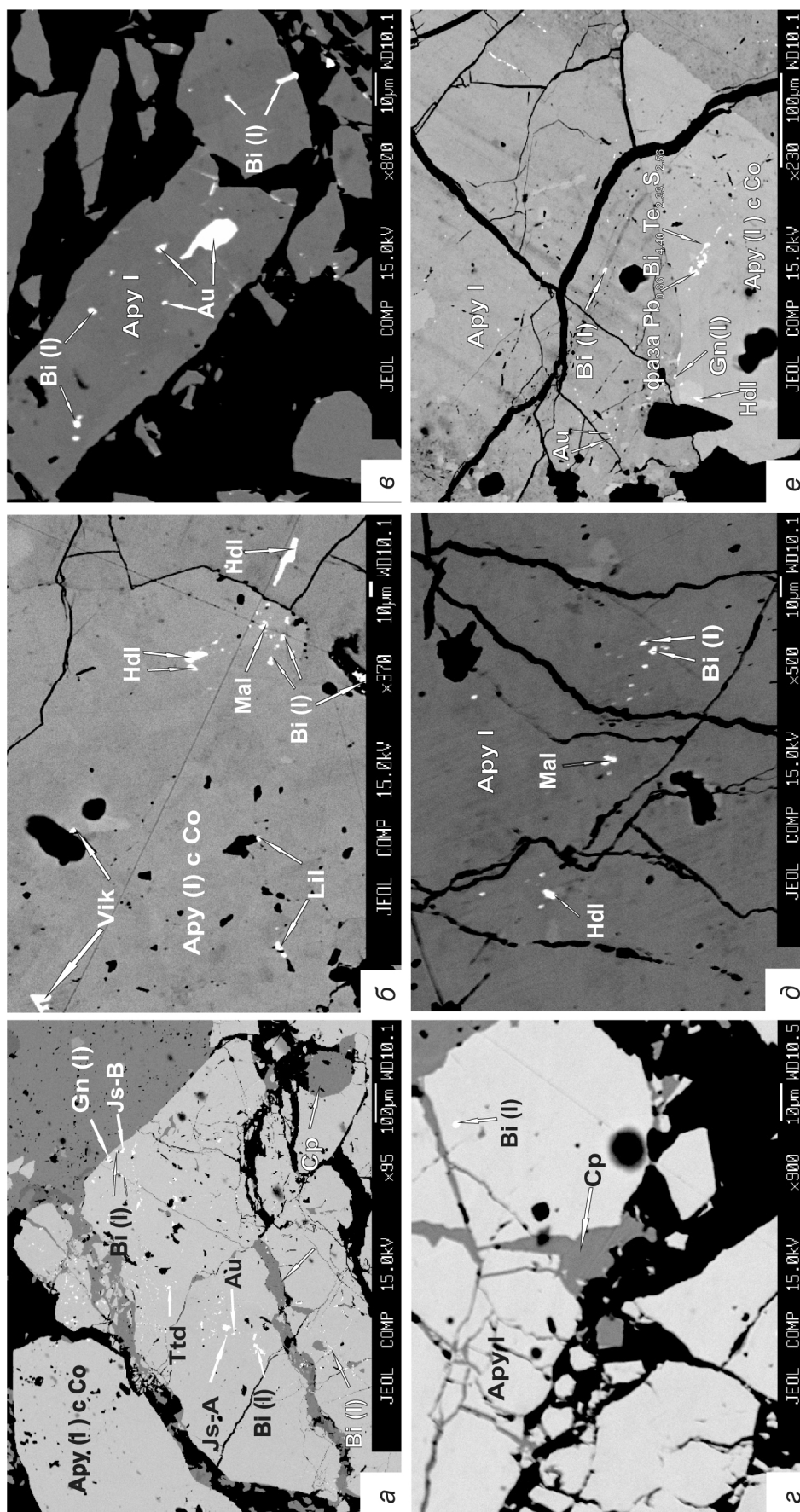


Рис. 2. Минералы золота и висмута в кварц-сульфидных рудах Намовского месторождения (зона Зимняя).

a – включения самородного золота, теллуридов и сульфотеллуридов висмута в арсенопирите I; *б* – включения мальдонита, хеддейта и в интерстиционных пустотах викингита и лилиангита в Co-содержащем арсенопирите; *в* – формы выделения самородного золота и висмута (I) в арсенопирите (I); *г* – включения самородного висмута (I) и трещины, залеченные халькопиритом; *д* – включения самородного висмута и мальдонита в арсенопирите (I); *е* – формы выделения хеддейта, самородного золота и висмута (I), галенита в арсенопирите (I).

Здесь и далее приняты сокращения минералов на рисунках: Q – кварц; Apy – арсенопирит; Cr – халькопирит; Py – пирротин; Ru – рутил; Sp – сфалерит; Gn – галенит; Lil – лилиангит; Cos – козалит; Au – самородное золото; Mal – мальдонит; Bi – самородный висмут; Hdl – хеддейт; Js-A – жозент A; Js-B – жозент B; Ttd – тетрадит; Vik – викингит; Cnz – канишарит; Hcs – гессит; As – акантит.

фотеллуридами висмута, фазой ($Pb_{0.95}Bi_{2.89}Te_{1.99}S_{2.12}$), иногда фиксируется срастание самородного золота с хедлейитом. Ранняя генерация самородного золота имеет среднюю и редко высокую пробу (775–875 ‰, до 990 ‰). Поздняя генерация самородного золота образует каплевидные, удлинённые формы в арсенопирите (II), пирите (рис. 2) и пирротине поздней рудной стадии минерализации. В отличие от ранней генерации золота оно более мелкое, размер зерен золота от 1 до 10 мкм. Самородное золото второй генерации установлено в ассоциации с сульфосолями висмута и серебра, висмутином, матильдитом, гесситом, акантитом и хлораргиритом ($AgCl$) [4]. Фиксируется срастание самородного золота с козалитом и галенитом. В поздней полиметаллической ассоциации самородное золото имеет низкую и среднюю пробу (600–750 ‰).

Самородный висмут (Bi) на месторождении Намовское широко представлен в рудах. По морфологии выделения и характерным ассоциациям установлено две его генерации. Самородный висмут (I) образует каплевидные включения в арсенопирите (I), а также заполняет трещины в последнем. Он установлен в ассоциации с тетрадимитом, с жозеитом А, жозеитом В, фазой ($Pb_{0.86}Bi_{4.40}Te_{2.33}S_{2.56}$) с самородным золотом, мальдонитом, хедлейитом (рис. 2, 3) и галенитом. Размер выделений самородного висмута (I) варьируется от 2 до 10 мкм. В нем иногда фиксируется примесь Te (2.91 мас. %).

Самородный висмут (II) образует неправильные формы выделения в арсенопирите (II), халькопирите и пирротине. Он установлен в срастании с галенобисмутином, канницаритом, галенитом и гесситом (рис. 3). Размер выделений самородного висмута (II) варьируется от 5 до 15 мкм. Элементы-примеси не установлены.

Мальдонит (Au_2Bi) выявлен в единичных зернах в арсенопирите (I) в виде изометричных каплевидных включений. Размер его зерен колеблется от 2 до 10 мкм. Он встречается в ассоциации с хедлейитом, самородными золотом и висмутом (I) (рис. 2). Редко встречается сонахождение раннего закапсулированного мальдонита в арсенопирите (I) с сульфосолями висмута (викингит и лиллианит), которые отложились позже в трещинах и интерстициальных пустотах.

Теллуриды, сульфотеллуриды и сульфиды висмута

Хедлейит (Bi_2Te) является распространенным минералом, в отличие от других минералов висмута. Он образует включения в арсенопирите (I) (рис. 2) вместе с самородными золотом, висмутом (I), фазой ($Pb_{0.86}Bi_{4.40}Te_{2.33}S_{2.56}$), мальдонитом и реже пильзенитом

(рис. 2). Размер выделений хедлейита от 5 до 10 мкм. Для него характерны значительные вариации величины отношения Bi/Te .

Пильзенит (Bi_4Te_3) – редкий минерал, образует включения в арсенопирите (I). Он установлен в ассоциации с самородным золотом и висмутом (I), хедлейитом и мальдонитом. Размер выделений от 2 до 10 мкм. Минерал по составу стехиометричен (табл. 1).

Тетрадимит (Bi_2Te_2S) образует мономинеральные выделения от 1 до 9 мкм в арсенопирите (I) и пирите (II) (рис. 2). Он встречается в ассоциации с самородными золотом и висмутом (I), жозеитами А и В. Для тетрадимита характерен небольшой избыток висмута и серы, зафиксирован дефицит теллура (табл. 1). Данные по химическому составу тетрадимита показывают наличие в нём примесей Pb (7.28 мас. %) и Se (1.00 мас. %).

Фаза ($Pb_{0.86}Bi_{4.40}Te_{2.33}S_{2.56}$) образует единичные или мономинеральные выделения округлой или удлинённой формы в арсенопирите (I), тяготеет к краю зерна последнего. Данная фаза встречается совместно с самородным висмутом (I) и хедлейитом (рис. 2). Отложение изученной фазы происходило позже, выше указанных минералов. Размер выделений от 3 до 30 мкм.

Жозеит А (Bi_4TeS_2) образует неправильные формы выделения в арсенопирите (I). Размер выделений от 1 до 8 мкм. Он встречается в ассоциации с самородными золотом и висмутом (I), тетрадимитом и жозеитом В (рис. 2). Данные по химическому составу жозеита А показывают наличие в нём примеси (табл. 1) Pb (4.00 мас. %).

Жозеит В (Bi_4Te_2S) образует редкие выделения неправильной формы в арсенопирите (I). Размер зерен от 3 до 10 мкм. Он встречается в ассоциации с самородными золотом и висмутом (I), тетрадимитом и жозеитом А. Данные по химическому составу жозеита В показывают наличие в нём примеси Se (1.78 мас. %).

Висмутин (Bi_2S_3) образует редкие изометричные включения в арсенопирите (II) и пирите (II). Размер его зерен от 3 до 10 мкм. Встречается в ассоциации с икунолитом. Данные по химическому составу висмутин (табл. 1) показывают наличие в нём примесей Se (1.44 мас. %), Pb (от 6.35 до 7.25 мас. %).

Икунолит (Bi_4S_3) образует редкие единичные выделения в арсенопирите (II) и пирите (II). Размер его зерен от 2 до 8 мкм. Встречается в ассоциации с висмутином.

Таким образом, на основании проведенных исследований в рудах месторождения Намовское установлены разнообразные по составу теллуриды, сульфотеллуриды и сульфиды висмута (рис. 4). Основны-

Таблица 1. Представительные анализы минералов висмута, теллура, золота и серебра (мас. %) месторождения Намовское.

№	Bi	Au	Ag	Pb	Se	Te	S	Сумма	Формула	Минерал
1	71.66	-	-	-	-	28.47	-	100.13	$Bi_{1.93}Te_{1.07}$	Хедлейит
2	68.79	-	-	-	-	31.01	-	99.80	$Bi_{4.03}Te_{2.97}$	Пильзенит
3	91.18	-	-	-	-	-	9.78	100.96	$Bi_{4.12}S_{2.88}$	Икунолит
4	73.47	-	-	7.25	-	-	18.49	99.20	$Bi_{1.83}Pb_{0.15}Se_{0.09}S_{3.03}$	Висмутин
5	73.70	-	-	-	1.78	21.06	2.29	98.84	$Bi_{4.04}Te_{1.89}(S_{0.82}Se_{0.26})$	Жозеит В
6	81.38	-	-	4.02	-	11.12	5.72	102.24	$(Bi_{4.04}Pb_{0.20})_{2.24}Te_{0.90}S_{1.85}$	Жозеит А
7	59.78	-	-	7.28	1.00	26.52	5.59	100.17	$(Bi_{2.02}Pb_{0.25})_{2.27}(Te_{1.44}Se_{0.09})_{1.53}S_{1.20}$	Тетрадимит
8	60.59	-	-	12.59	-	20.93	5.79	99.90	$Pb_{0.86}Bi_{4.40}Te_{2.33}S_{2.56}$	Фаза ($Pb_{0.86}Bi_{4.40}Te_{2.33}S_{2.56}$)
9	34.08	65.75	-	-	-	-	-	99.83	$Au_{1.54}Bi_{1.46}$	Мальдонит
10			63.00			36.20		99.20	$Ag_{2.02}Te_{0.98}$	Гессит
11	-	-	80.80	6.39	-	-	12.99	100.78	$Ag_{1.89}Pb_{0.09}S_{1.02}$	Акантит

ми элементами-примесями в исследованных минералах являются свинец и селен, наличие данных примесей отображает специфику района исследования.

Рb-Bi сульфосоли

На месторождении Намовское установлены Рb-Bi сульфосоли: ашамальмит, галенобисмутит, канницарит, козалит, лиллианит, матильдит и наффилдит. Размер сульфосолей варьируется от 5 до 20 мкм. Диагностика и интерпретация состава минералов этой группы затруднена из-за малых размеров зерен и вариаций состава. В виду того, что все изученные сульфосоли имеют незначительные размеры зерен, не удалось провести их рентгенографическое изучение, а только выполнен микрорентгеноспектральный анализ. Поэтому название Рb-Bi сульфосолей предположительное, так как они не могут быть диагностированы с точностью до минерального вида. Полученные результаты анализов Рb-Bi сульфосолей были пересчитаны на эмпирическую формулу по [35], для викингита на 30 атомов S, галенобисмутита – на 4, канницарита – на 23, козалита – на 5, лиллианита – на 6, а наффилдита – на 7.

Ашамальмит ($Pb_6Bi_2S_9$) образует единичные включения неправильной формы от 2 до 5 мкм в пирите (II). Характерной особенностью ашамальмита изученного месторождения является отклонение от стехиометрического состава с дефицитом свинца и серы в составе минерала (табл. 2). В качестве примеси в изученном ашамальмите установлено Ag (1.17 мас. %).

Викингит ($Ag_5Pb_8Bi_{13}S_{30}$) – редкий минерал, установлен единожды. Является лиллианитовым гомоло-

гом среди Ag-Pb-Bi сульфосолей данной группы. Он выявлен в арсенопирите (I) в виде включения в интерстиционных пустотах, где образует таблитчатое зерно, нарастающее на краю зерна-хозяина (рис. 3). Количество Ag викингите (табл. 2) составляет 8.50 мас. %.

Галенобисмутит ($PbBi_2S_4$) наблюдается в тесном сростании с самородным висмутом (II), галенитом и канницаритом в пирротин-халькопиритовой массе. Он образует мелкие пластинчатые выделения от 5 до 20 мкм в пирротине и халькопирите. В качестве примеси в изученном галенобисмутите установлено Ag (6.84 мас. %).

Канницарит ($Pb_8Bi_{10}S_{23}$) образует единичные пластинчатые включения в халькопирите и пирротине. Канницарит образует тесные сростания с галенобисмутитом, самородным висмутом (II) и галенитом (рис. 3). Размер пластинчатых выделений от 3 до 7 мкм. Для него также установлено отклонение от теоретического состава, что, вероятно, связано с изоморфным вхождением серебра на место свинца. Данные по химическому составу канницарита (табл. 2) показывают наличие в нем примеси Ag (от 3.39 мас. %).

Козалит ($Pb_2Bi_2S_3$) образует округлые или вытянутые включения от 3 до 20 мкм в арсенопирите II. Для него характерны тесные сростания с самородным золотом (рис. 3). Типоморфной особенностью козалита изученного месторождения является дефицит свинца по сравнению с теоретическими данными, что, предположительно, связано с изоморфным вхождением Ag (5.99 мас. %) на место свинца (табл. 2).

Лиллианит ($Pb_3Bi_2S_6$) представлен округлыми или вытянутыми включениями размером от 10 до 20 мкм в карбонате, халькопирите, арсенопирите (I,

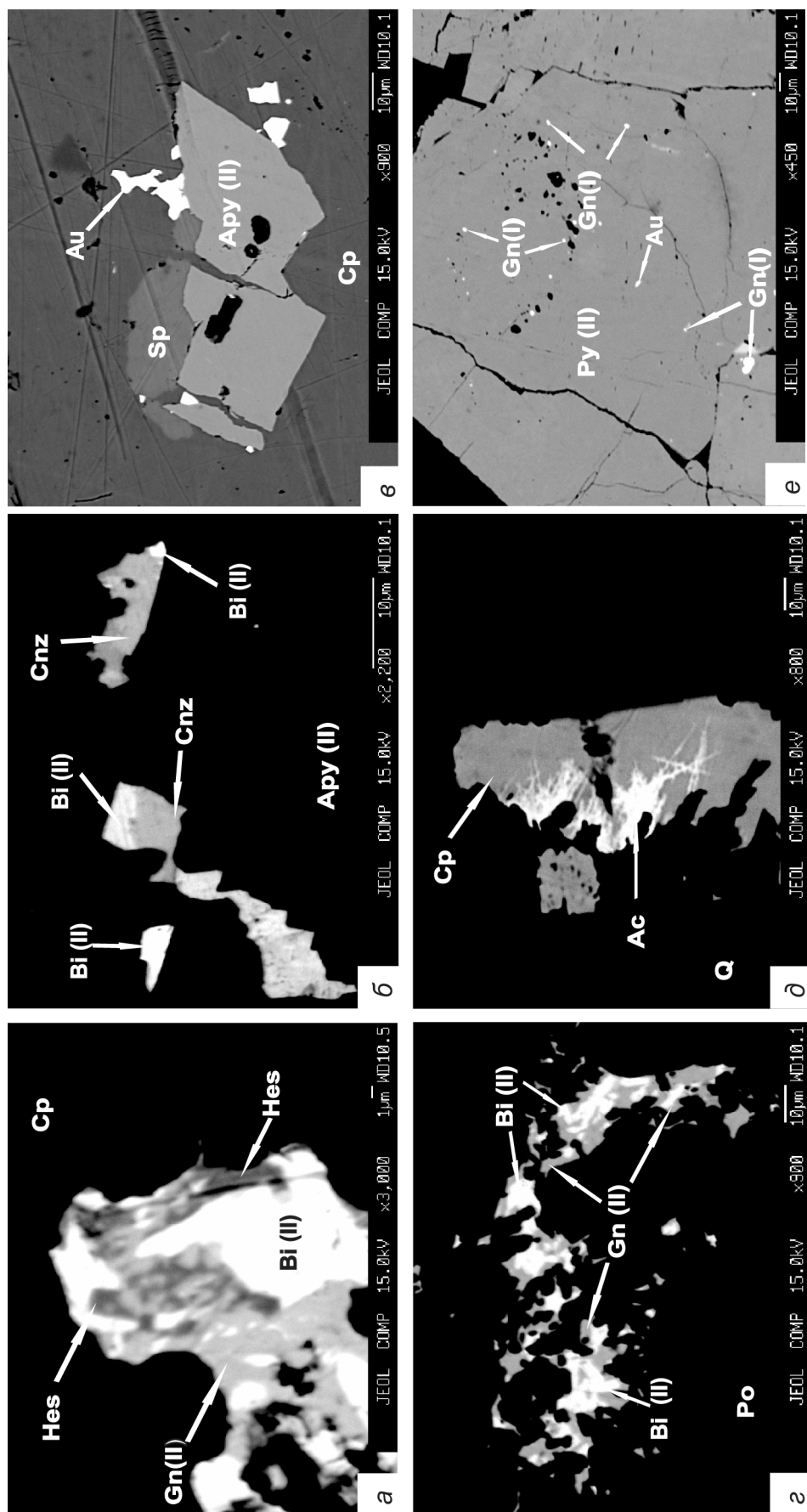
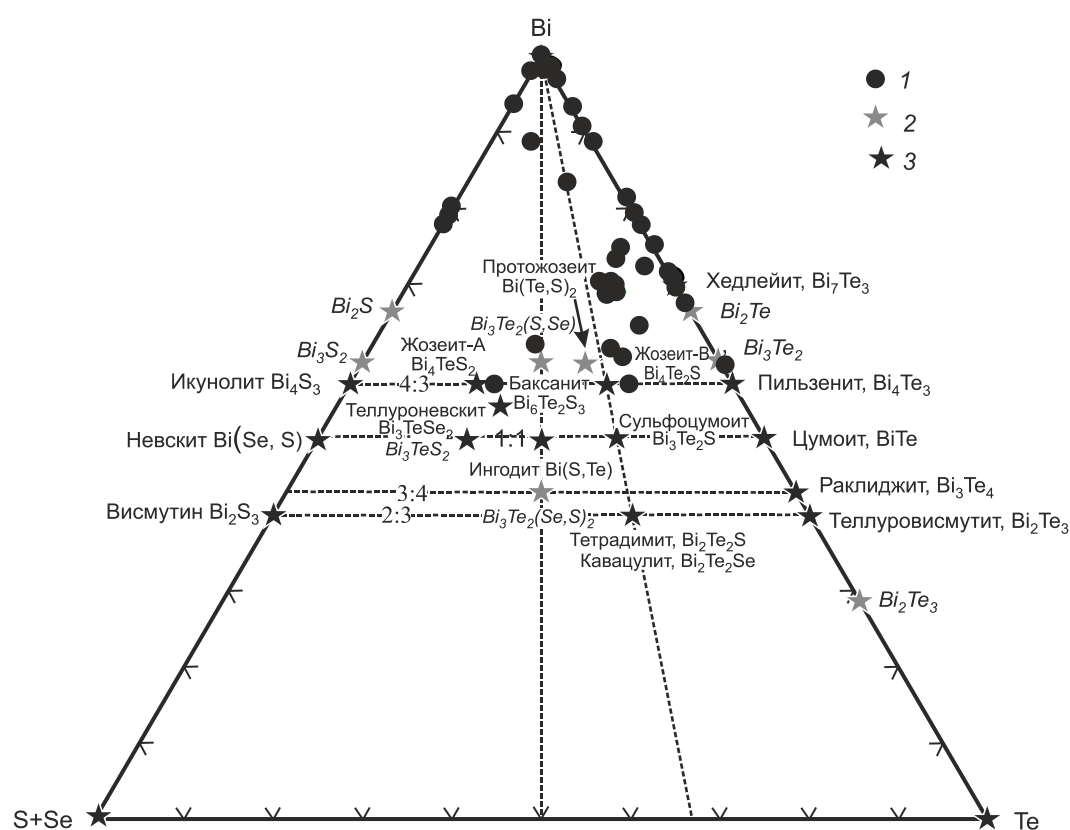


Рис. 3. Формы выделений и характер взаимоотношений редких минералов в сульфидных рудах месторождения Намовского (зона Зимняя).

a – сростание самородного висмута (II), галенита и гессита в халькопирите; *б* – выделение кинниарита в сростании с самородным висмутом (II) в арсенопирите (II); *в* – характерное взаимоотношение арсенопирита (II), самородного золота, сфалерита в халькопирите; *г* – сростание самородного висмута (II) и галенита в пирротине; *д* – акантит развивается по халькопириту в кварце; *е* – формы выделения галенита и самородного золота в пирите (II).

№	Bi	Ag	Pb	Se	Cu	S	Сумма	Формула	Минерал
1	22.38	1.17	62.42	-	-	14.33	100.27	$Pb_{5.91}Bi_{2.10}Ag_{0.21}S_{8.77}$	Ашамальмит
2	46.32	8.50	27.70	-	-	16.00	98,52	$Ag_{4.73}Pb_{8.02}Bi_{13.30}S_{29.95}$	Викингит
3	51.19	6.84	27.45	-	-	16.48	102.76	$Pb_{0.97}Bi_{1.80}Ag_{0.46}S_{3.77}$	Галенобисмутит
4	42.10	3.39	36.75	-	-	16.10	98.34	$Pb_{8.00}Bi_{9.05}Ag_{1.41}S_{22.60}$	Канницарит
5	43.29	5.99	36.25	-	-	15.84	101.37	$Pb_{1.69}Bi_{2.00}Ag_{0.54}S_{4.77}$	Козалит
6	36.25	4.12	45.42	-	-	15.53	101.32	$Pb_{2.63}Bi_{2.08}Ag_{0.46}S_{5.82}$	Лиллианит
7	55.37	26.44	2.49	1.57	-	13.34	99.21	$Ag_{1.02}Bi_{1.11}Pb_{0.05}(S_{1.74}Se_{0.08})_{1.82}$	Матильдит
8	42.00	0.00	34.90	-	4.70	16.95	98.55	$Pb_{2.00}Cu_{0.99}(Pb_{0.25}Bi_{0.69})_{0.94}Bi_{2.00}S_{7.06}$	Наффилдит



1 – теллуриды и сульфотеллуриды месторождения Намовское; 2 – безымянные фазы; 3 – теоретические данные.

Матильдит ($AgBiS_2$) образует срастания с галенитом (I) (рис. 3), предположительно структура

Наффилдит ($Pb_2Cu(Pb,Bi)Bi_2S_7$) – редкий минерал, он является изоморфным членом серии висмутин-айкинитового ряда. Единичные игольчатые включения размером 15 мкм отмечены в халькопирите.

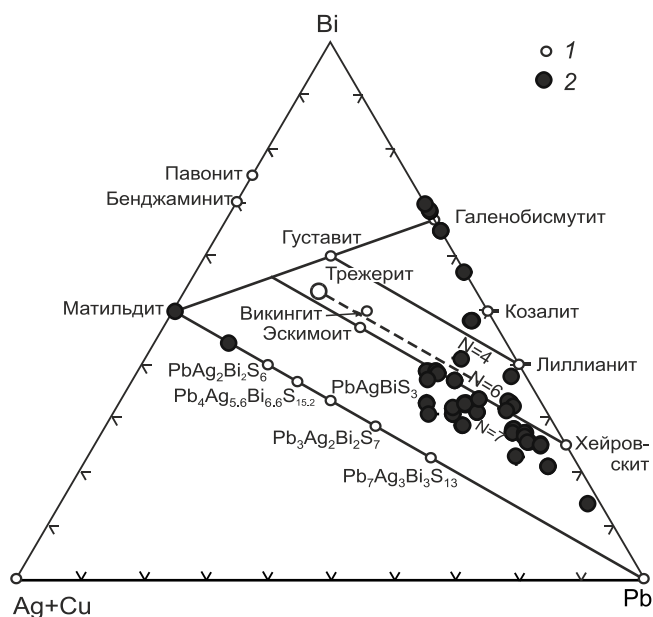


Рис. 5. Диаграмма состава Bi–Pb–(Ag + Cu) для висмутовых сульфоселей месторождения Намовское.

1 – теоретические данные, 2 – Pb–Bi сульфосоли месторождения Намовское.

Следует отметить избыток висмута и дефицит свинца и серы в его составе (табл. 2).

Таким образом, в рудах изученного месторождения установлены разнообразные по составу Pb–Bi сульфосоли (ашамальмит, канницарит, козалит, лиллианит, викингит, наффилдит, козалит и галенобисмутит (рис. 5)). Bi-сульфосоли характеризуются постоянной примесью в них серебра, иногда в матильдите фиксируется селен и свинец.

ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Главная рудная стадия

На основании арсенопиритовой термометрии [32] установлено, что образование арсенопирита первой генерации в главной рудной стадии происходило в пределах от 530 °C до 350 °C. Для расчета температуры использовался арсенопирит без примесей. На основании данных [2, 9, 10, 13, 14] известно, что при наличии мальдонита в рудах может присутствовать и золото высокой пробы, возникшее как результат разложения мальдонита на самородное золото и висмут. Сосуществование мальдонита с самородным висмутом [39, 40, 41] в виде эвтектической ассоциации, образовавшейся при 241 °C в системе Au–Bi, характерно для золоторудных месторождений с висмутовой минерализацией. Устойчивость мальдонита сохраняется в температурном диапазоне 371–116 °C [13, 14, 39, 40, 41]. Учитывая

полученные нами данные, наличие высокомышьяковистого арсенопирита, присутствие звездчатых структур распада твердых растворов сфалерита и халькопирита, а также железистого сфалерита и температуру кристаллизации самородного висмута и мальдонита [8, 32, 38], мы предполагаем, что температурные условия минералообразования ранней стадии варьировались в пределах от 530 до 270 °C, что не противоречит приведенным ранее данным [4].

Поздняя продуктивная стадия

На месторождении Намовское нами изучены флюидные включения в жильном кварце для второй рудной стадии. В кварце первой рудной стадии из-за малых размеров включений не удалось их изучить. Среди флюидных включений в кварце из рудных жил выделены первичные, первично-вторичные и вторичные включения. Особое внимание уделено первичным включениям, которые имеют форму отрицательных кристаллов. Они распределены равномерно в объеме кварца внутри зерен. Размеры изученных флюидов в большинстве образцов варьируются от 2 до 25 мкм, но в основном 10–20 мкм. Среди изученных флюидных включений по фазовому составу при комнатной температуре выделяются (рис. 6): 1) трехфазовые; 2) двухфазовые; 3) однофазовые. Результаты термо- и криометрических исследований изложены ниже.

Первичные флюидные включения располагаются в центральной части и по зонам роста кристаллов кварца. Первичные включения сформировались при температурах 230–270 °C, включения гомогенизируются в жидкую фазу, концентрация раствора оценивается [20] 12.28–14.04 мас. % экв. NaCl, плотность раствора NaCl составляет [11] 1.09–1.10 г/см³. $T_{\text{эвт}}$ варьируется от -18.9 до -25.7 °C (табл. 3), фазовый состав представлен NaCl·2H₂O + лед, NaCl·2H₂O + KCl·4H₂O + лед эвтектическими смесями [1].

Первично-вторичные включения приурочены к трещинам в наружных зонах зерен, а также в периферической и центральной частях кристаллов кварца. Выделяются двухфазовые и трехфазовые включения, которые содержат жидкость (водно-солевой раствор), пузырьки пара и твердую фазу (предположительно, галит). Температура гомогенизации включений составляет 180–220 °C. Концентрация раствора оценивается [20] в 13.4–31.4 мас. % экв. NaCl, плотность раствора NaCl составляет [11] 0.89–1.10 г/см³. Протаивания эвтектики от -11 до -23 °C (табл. 3).

Вторичные флюидные включения имеют аморфную, удлиненную, реже форму отрицательного кристалла, располагаются они по всему кристаллу, но чаще приурочены к залеченным трещинам и близ границ нескольких кристаллов. По фазовому составу при

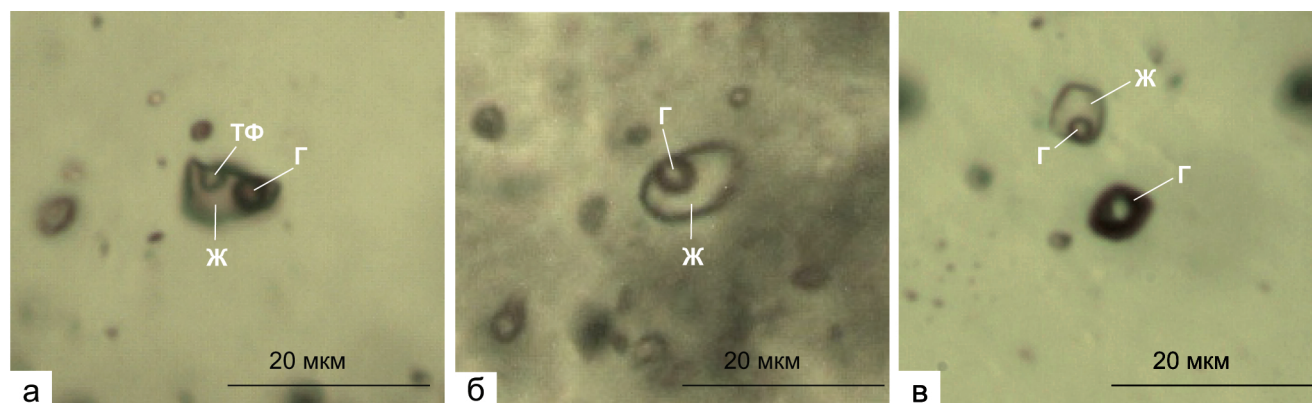


Рис. 6. Первичные флюидные включения в кварце Намовского месторождения.

а – трехфазовое газовой-жидкое с твердой фазой и газовым пузырьком; *б*, *в* – двухфазовые газовой-жидкое и однофазовое существенно газовое. Обозначения фаз: ТФ – твердая фаза, Ж – жидкая фаза, Г – газ.

Таблица 3. Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце Намовского месторождения.

Вкл.	n	T _{гом} , °C	T _{эвт} , °C	T _{пл. льда} , °C	C, (мас. % экв. NaCl)	ρ, г/см ³	p, (кбар)
1	11	230-270	-18.8...-25.7	-8.8...-15.1	12.28-14.04	1.09-1.10	0.5-1.7
2	10	180-220	-11...-23	-4.4...-10.2	13.4-31.4	0.89-1.10	

Примечание. Включения: 1 – первичные, 2 – первично-вторичные.

комнатной температуре включения преимущественно газовой-жидкие. В газовом пузырьке, кроме пара, присутствует незначительное количество углекислоты низкой плотности. На это указывает спонтанное, активированное нагревающейся лампой микроскопа, перемещение газового пузырька по объему вакуоли.

Месторождение Намовское является среднеглубинным (1.5–5 км) объектом залегания. Давление этого периода рассчитано по методике, описанной [12], и оценивается в значениях около 0.5–1.7 кбар. Средний термический градиент равен 30–33 град/км, термобарический градиент гидротермальной деятельности – 11 ± 1 бар/град. Получаем 0.5–1.7 кбар (формулы $(31.5 \cdot 11 \cdot 1.5) - (31.5 \cdot 11 \cdot 5)$).

Таким образом, исходя из полученных данных мы предполагаем, что образование первой рудной стадии при высокой температуре варьировалось в пределах от 530 °C до 270 °C, а также при повышенной фугитивности f_{Te} . Учитывая наличие сернистого арсенопирита (II) во второй рудной стадии, разнообразных Pb-Bi сульфосолей, акантита, то можно предположить, что образование второй рудной стадии происходило в пределах от 350 до 150 °C. Руды второй стадии сформировались в средне-низкотемпературных условиях с умеренной или высокой концентрацией солей и низким давлением (0.5–1.7 кбар).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведённые исследования позволили выявить ряд новых закономерностей, отражающих условия образования руд, которые, несомненно, имеют важное значение для выявления физико-химических и генетических условий формирования золото-висмутовой минерализации Намовского месторождения. В первую очередь, необходимо акцентировать внимание на том, что для ранней стадии выделяются две ассоциации: Со-арсенопирит-сам.висмут-мальдонит и вторая ассоциация арсенопирит-теллуриды и сульфотеллуриды висмута с самородным золотом. На месторождении Намовское минералы висмута и теллура, сформированные в первую рудную стадию, находятся в тесной ассоциации с арсенопиритом (I), данаитом, иногда пиритом, представлены самородным висмутом (I), хедлейитом, пильзенитом, жозеитом А, В, тетрадимитом, икунолитом, что предполагает образование их в восстановленных условиях при низких f_{S_2} , f_{O_2} и значительной фугитивности f_{Te} , в соответствии с данными [14, 37, 42]. Как показано на диаграмме (рис. 7), изученные висмутовые минералы попадают в область восстановительных условий. В арсенопирите (I) зафиксированы каплевидные выделения самородного золота и висмута (I), а также последний заполняет микропрожилки в минерале-хозяине. Как известно

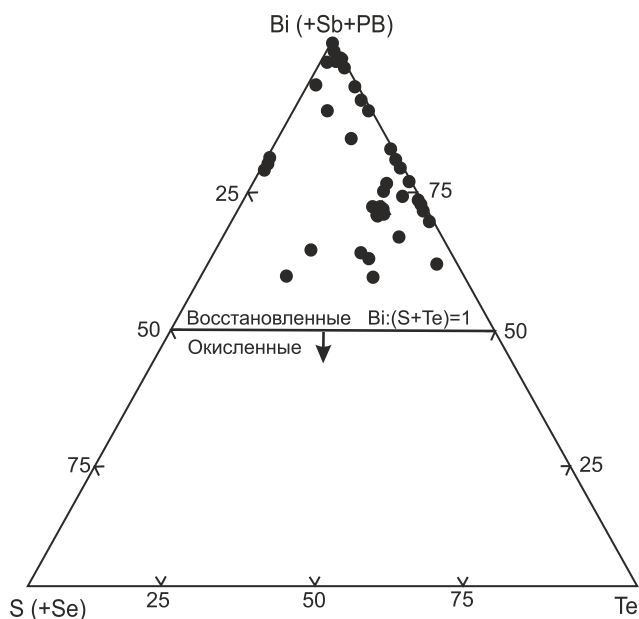


Рис. 7. Тройная диаграмма (Bi + Sb + Pb) – Te – (S + Se) показывает составы висмутовых минералов месторождения золота Намовское (с модификациями по [24, 33, 43]). Линия $\text{Bi}/\text{Te} + \text{S} = 1$, разделяет висмутовые минералы, образующиеся в восстановленных или окисленных жидкостях [21, 22].

из литературных данных [26, 39, 40, 41], расплав висмута может активно сорбировать самородное золото из твердых фаз путем диффузии, так и из гидротермальных растворов/флюидов, причем даже недосыщенных золотом. Поэтому самородный висмут называют «поглотитель золота» – «scavenger of gold» [22, 23]. Он играет значительную роль в формировании и преобразовании месторождений золото-висмутового типа. А именно, на мобилизацию, миграцию и переотложение золота активно влияют соединения висмута в течение всего гидротермального процесса [14]. Это может отображаться в частичном или полном растворении золота ранней генерации висмутсодержащими растворами и его переотложение в виде мальдонита. Именно соединения висмута влияют на подвижность самородного золота [14].

Наличие теллуридов висмута в первой рудной стадии отражает высокую фугитивность теллура f_{Te} и низкую серы f_{S_2} . На фоне понижения температуры и увеличения фугитивности серы теллуриды висмута сменяются сульфотеллуридами висмута, что является свидетельством эволюции состава флюидов и активности их главных компонентов от самородных элементов и теллуридов в ассоциации с арсенопиритом через сульфотеллуриды с арсенопиритом к сульфосолям и сульфидам [14] в ассоциации с сульфидами (пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, пирротин). Ар-

сенопирит в ходе эволюции подвергается изменениям от кобальтовой разновидности к мышьяковистой, а далее к более сернистой.

Сосуществование теллуридов и сульфотеллуридов висмута с самородным висмутом и золотом, мальдонитом, а также иногда с ними встречаются лиллианит и викингит, которые сформированы позже в интерстициях арсенопирита (I), все это свидетельствует о резком падении температуры, в результате чего возникали капельки висмут-минерального расплава [14]. Режим «заковки», а именно резкое падение температуры отвечает за сохранность мальдонита, считал И.Я. Некрасов [14]. Как выявлено [21], стабильное состояние самородного висмута и мальдонита контролируется и восстановительными обстановками, перекрывающими поля устойчивости пирротина и магнетита в координатах f_{S_2} и f_{O_2} . Системы, богатые низкотемпературными халькофильными элементами, такими как (Bi, Te, Pb) и их полиметаллическими сплавами, могут концентрировать металлы, все это приводит к образованию высокосортных и сложных полиметаллических руд в гидротермальных месторождениях [22, 23, 28–31]. Стоит заметить, что в гидротермальных месторождениях обогащение металлами может происходить и за счет разделения компонентов водного флюида на сосуществующие металлические расплавы [26].

На фоне увеличения фугитивности f_{S_2} и падения температуры образуются Pb-Bi сульфосоли. Однако при незначительном колебании фугитивности f_{S_2} и понижении температуры образуются своеобразные мирмекитовые сростки двух и более минералов (рис. 3) [4]. Как известно, компоненты с более низкой температурой солидуса остаются в расплаве и мигрируют вслед за более плотными полиметаллическими компонентами, такими как металлосодержащие Bi-сульфосоли, которые извлекаются путем несмешиваемости с образованием затяжных металлических LMCE (Bi, Te, Pb)-обогащенных расплавов. LMCE «low-melting point chalcophile elements», по [28, 29].

По данным [14, 25, 34], верхний предел устойчивости лиллианита и его гомологов варьируется в пределах температур 350–325 °C. На основании изучения флюидных включений, наличия Pb-Bi сульфосолей, минерала серебра (акантит), температура образования второй рудной стадии варьируется от 350 до 150 °C.

Как было отмечено выше, для более поздней стадии характерны разнообразные по составу висмут-свинцовые сульфосоли (рис. 5), преимущественно гомологи лиллианита, которые представлены ашамальмитом, канницаритом, лиллианитом. Другие Pb-Bi

поведение главных рудных компонентов (висмута, теллура, свинца и серы) в гидротермальном процессе. Всё это отображается и в схеме последовательности отложения висмутовых минералов (рис. 8).

Таким образом, руды Намовского месторождения характеризуются разнообразными по составу минералами висмута и теллура и Pb-Bi сульфосолями, что в свою очередь отражается в первой рудной стадии значительными концентрациями Te в рудном флюиде и низкой фугитивностью fS_2 . Температурные условия минералообразования для первой рудной стадии варьируются от 530 до 270 °С, а для более поздней стадии характерен интервал температур от 350 до 150 °С и увеличение фугитивности fS_2 , понижение температуры кристаллизации и активность Pb и Ag, что отображается в образовании сложных сульфосолей, а также минералов серебра (гессит и акантит).

ВЫВОДЫ

1. На месторождении Намовское выделено восемь групп висмут-теллуридных минералов: 1) самородный висмут; 2) интерметаллид золота (мальдонит); 3) теллурид (хедлейит); 4) сульфотеллуриды (тетрадимит, жозеит -А, -В); 5) сульфид (висмутин, икунолит); 6) сульфовисмутит Ag (матильдит); 7) Pb-Bi сульфосоли (ашамальмит, канницарит, козалит, лиллианит, наффилдит, козалит, галенобисмутит, викингит); 8) гессит; разнообразие минералов висмута и теллура отражает эволюционную направленность рудоотложения на месторождении.

2. Первая рудная стадия характеризуется низкой fS_2 , fO_2 и значительной фугитивностью fTe , что отражается в значительной кристаллизации теллуридов висмута. Каплевидные включения теллуридов висмута, самородного висмута в арсенопирите отражают восстановительные условия образования изученных минералов висмута и теллура. В конце первой рудной стадии идет повышение фугитивности серы, когда образуются сульфотеллуриды висмута. Основными элементами-примесями в минералах висмута являются свинец и селен. Температурные условия минералообразования для первой рудной стадии варьируются от 530 до 270 °С.

3. Вторая рудная стадия связана с кристаллизацией разнообразных по составу Pb-Bi сульфосолей в основном лиллианитовой гомологической серии, которая представлена ашамальмитом, викингитом и лиллианитом. Отложение сульфосолей происходит на фоне повышения фугитивности fS_2 , температурные условия минералообразования более поздней стадии варьируются в пределах от 350 до 150 °С. Рудообразующие флюиды были богаты висмутом, свинцом,

селеном, а на завершающем этапе серебром, что отражается в образовании минералов серебра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 23-47-00064.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
2. Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минер. журн. 1986. Т. 8, № 3. С. 65–71.
3. Годовиков А.А. Висмутовые сульфосоли. М.: Наука, 1972. 303 с.
4. Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Хубанов В.Б. Геологическая позиция и золото-висмутовая минерализация месторождения Намовское (Южный Сихотэ-Алинь, ДВ России) // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42, № 6. С. 96–117.
5. Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И., Шлыков С.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Вещественный состав и геохимические особенности руд Малиновского золоторудного месторождения (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 5. С. 59–74.
6. Доброшевский К.Н., Горячев Н.А. О возрасте и геодинамических факторах формирования золотого оруденения Малиновского месторождения (Сихотэ-Алиньская золотоносная провинция, Россия) // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 3. С. 28–40.
7. Иванов Б.А. Центральный Сихотэ-Алинский разлом. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1972. 116 с.
8. Колонин Г.Р. О самородном висмуте как о геологическом термометре. V. Кристаллизация висмута в гидротермальных условиях: Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск: Наука, 1971. С. 15–25.
9. Литвиненко И.С., Соломенцева Л.А. Мальдонит в золоторедкометалльных проявлениях Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 2. С. 68–77.
10. Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Мальдонит, ютенбогаардит и разновидности самородного золота из рудных проявлений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) // ЗРМО. 2020. С. 18–37.
11. Наумов В.Б. Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах / Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М.: Недра, 1982. С. 85–94.
12. Наумов Г.Б., Миронова О.Ф. Параметры гидротермальных флюидов и их изменения в процессах рудообразования: Материалы XIII Междун. конф. по термобарогеохимии и IV симпозиума APIFIS. М.: ИГЕМ РАН, 2008. Т. 2. С. 90–93.
13. Некрасов И.Я. Экспериментальное изучение условий образования интерметаллидов серебра и золота // Минер. журн. 1985. Т. 7, № 2. С. 61–71.
14. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
15. Петраченко Е.Д., Петраченко Р.И., Родионов А.Н. О полигенности и полихромности Ороченско-Приманкинского

- вулканического поля Центрального Сихотэ-Алиня / Соотношение разных типов оруденения вулканоплутонических поясов Азиатско-Тихоокеанской зоны сочленения. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. С. 95–110.
16. Сахно В.Г., Степанов В.А., Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н. Малиновская золоторудная магматическая система Центрального Сихотэ-Алиня: геохронология, петрогеохимический состав и изотопная характеристика магматических комплексов (Приморье, Россия) // Докл. АН. 2013. Т. 45, № 1. С. 1–8.
17. Ханчук А.И., Панченко И.В., Кемкин И.В. Геодинамическая эволюция Сихотэ-Алиня и Сахалина в палеозое и мезозое. Владивосток: ДВО РАН, 1988. 56 с.
18. Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 9. С. 1635–1645.
19. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.
20. Bodnar R.-J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusion // Fluid inclusion in minerals: methods and application / Ed. By: Benedetto De Vivo, Maria Luce Frezzotti Pontignano-Siena. 1994. P. 117–130.
21. Ciobanu C., Cook N. Tellurides, selenides and Bi-sulphosalts in gold deposits // 11th IAGOD Symp Geocongress. CD. V. GeolSurv Namibia. 2002.
22. Ciobanu C.L., Cook N.J., Damian F., Damian G. Gold scavenged by bismuth melts: an example from Alpine shear-mobilizates in the Highiş Massif, Romania // Mineral Petrol. 2006. V. 87. P. 351–384.
23. Ciobanu C.L., Birch W.D., Cook N.J., Pring A., Grundler P.V. Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia // Lithos. 2010. V. 116. P. 1–17.
24. Cook N.J., Ciobanu C.L., Wagner T., Stanley C.J. Minerals of the system Bi–Te–Se–S related to the tetradyrite archetype: Review of classification and compositional variation // Can. Miner. 2007. V. 45. P. 665–708.
25. Czamanske G.K., Hall W.E. The Ag–Bi–Pb–Sb–S–Se Te mineralogy of the Darwin leadsilver-zinc deposit, southern California // Econ. Geol. 1975. V. 70. P. 1092–1110.
26. Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R. The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism // Searching for a sustainable future: 15th Australian Geol. Convention Sydney, 2000. Abstr. N 59. P. 135.
27. Foord E.E., Shawe D.R. The–Pb–Bi–Ag–Cu (Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts: a review and some new data from Colorado, California and Pennsylvania // Can. Mineral. 1989. V. 27. P. 363–382.
28. Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism // Can. Mineral. 2002. V. 40. P. 1–18.
29. Frost B.R., Swapp S.M., Mavrogenes J. Textural evidence for extensive melting of the Broken Hill Orebody // Econ Geol. 2011. V. 106. P. 860–882.
30. Hofmann B.A. Formation of a sulfide melt during alpine metamorphism of the Lengenbach polymetallic sulfide mineralization, Binntal, Switzerland // Miner. Deposita, 1994. V. 29. P. 439–442.
31. Hofmann B.A., Knill M.D. Geochemistry and genesis of the lengenbach Pb–Zn–As–Tl–Ba-mineralization. Binn Valley, Switzerland // Mineralium Deposita. 1996. V. 31. P. 319–339.
32. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // Canad. Mineral. 1976. V. 14. P. 364–386.
33. Meng L., Huang F., Gao W., Gao R., Zhao F., Zhou Y., Li Y. Multi-Step Gold Refinement and Collection Using Bi-Minerals in the Laozuoshan Gold Deposit // Minerals. 2022. 12. 1137.
34. Moëlo Y., Marcoux E., Makovicky E., Karup-Munler S., Legendre O. Homotogues de la lillianite (gustavite, vikingite, heyrovskyite riche en Ag et Bi) de l'Indice ~ W–As–(Pb,Bi,Ag) de La Roche-Baluc (Loire Atlantique, France) // Bull. Mineral. 1987. V. 110. P. 43–64.
35. Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N. N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Zunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindl L., Bente K., Shimizu M. Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy // Eur. J. Mineral. 2008. N. 20. P. 7–46.
36. Shin D., Park H.-I., Lee I., Lee K.-S., Hwang J. Hydrothermal As–Bi mineralization in the Nakdong deposits, South Korea: insight from fluid inclusions and stable isotopes // The Canadian Mineralogist. 2004. V. 42, N 5. P. 1465–1481.
37. Skirrow R.G., Walshe J.L. Reduced and oxidized Au–Cu–Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek inlier, Australia: an integrated geologic and chemical model // Econ. Geol. 2002. V. 97, N 6. P. 1167–1202.
38. Sugaki A., Yamae N. Thermal studies in the intergrowth of chalcopyrite and sphalerite // Sci. Rep. Tohoku Univ. Sendai. 1952. P. 103–110.
39. Tooth B., Brugger J., Ciobanu C.L., Liu W. Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids // Geology. 2008. V. 36. P. 815–818.
40. 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.
41. Tooth B., Etschmann, B., Pokrovski G.S., Testemale D., Hazemann J., Grundler P.V., Brugger J. Bismuth speciation in hydrothermal fluids: an X-ray absorption spectroscopy and solubility study // Geochim. Cosmochim. Acta. 2013. V. 101. P. 156–172.
42. Voudouris P.C., Spry P.G., Mavrogenatos C., Sakellaris G.-A., Bristol S.K., Melfos V., Fornadel A.P. Bismuthinite derivatives, lillianite homologues, and bismuth sulfotellurides as indicators of gold mineralization in the Stanos shear-zone related deposit, Chalkidiki, Northern Greece // Can. Mineral. 2013. V. 51. P. 119–142.
43. Wei B., Wang C.Y., Wang Z.C., Cheng H., Xia X.P., Tan W. Mantle-derived gold scavenged by bismuth-(tellurium)-rich melts: Evidence from the mesozoic wulong gold deposit in the North China Craton // Ore Geol. Rev. 2021. V. 131. P. 104047.

Рекомендована к печати В.В. Раткиным

после доработки 04.07.2025 г.

принята к печати 08.07.2025 г.

**BISMUTH-TELLURIUM MINERALIZATION OF THE NAMOVSKOE GOLD DEPOSIT
(SOUTHERN SIKHOTE-ALIN, FAR EAST OF RUSSIA)**

A.A. Grebennikova^{a,c}, V.N. Bakhtina^{a,c}, K.N. Dobroshevsky^{b,c}, N.A. Goryachev^c, D.G. Fedoseev^a

^a*Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;
e-mail: anylotina@mail.ru*

^b*OOO Malinovskoe; Dalnerechensky district, village Ariadnoe, Russia*

^c*North-East Scientific Center, N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia*

Detailed mineralogical studies on ores of the Namovskoe deposit revealed their different mineral compositions. Two stages of ore formation were identified at the Namovskoe deposit, each characterized by compositionally different bismuth and tellurium minerals. A total of eight groups of bismuth and tellurium minerals were identified and studied. Native bismuth, gold intermetallic compound (maldonite Au_2Bi), compositionally different bismuth tellurides and sulfotellurides (hedleyite Bi_2Te , pilsenite Bi_4Te_3 , tetradymite $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$, joseite-A Bi_4TeS_2 , joseite-B $\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$) appeared in the first stage. Pb-Bi sulfosalts of variable composition (ashamalmite $\text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$, vikingite $\text{Ag}_5\text{Pb}_8\text{Bi}_{13}\text{S}_{30}$, galenobismutite PbBi_2S_4 , cannizzarite $\text{Pb}_8\text{Bi}_{10}\text{S}_{23}$, cosalite $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$, lillianite $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, nuffieldite $\text{Pb}_2\text{Cu}(\text{Pb},\text{Bi})\text{Bi}_2\text{S}_7$), bismuth sulfides (bismuthinite Bi_2S_3 , icunolite Bi_4S_3), sulfobismuthite Ag (matildite AgBiS_2), and silver telluride – hessite Ag_2Te , crystallized in the second stage. Permanent elemental impurities Pb, Ag, and Se are established in bismuth sulfotellurides, and Ag is a typomorphic impurity in Pb-Bi sulphosalts. The first ore-forming stage occurred at high temperatures of 530 °C to 270 °C with low sulfur fugacity $f\text{S}_2$ and high $f\text{Te}$. The second-stage ore formation occurred within a temperature range of 350 to 150 °C.

Key words: bismuth, tellurides, sulphotellurides, Bi-Pb-sulphosalts, Primorye, Sikhote-Alin, Russia Far East.