

---

---

**МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ**

---

---

**ВЕЙССБЕРГИТ ( $TlSbS_2$ ) И АВИЦЕННИТ ( $Tl_2O_3$ ) – РЕДКИЕ  
МИНЕРАЛЫ ТАЛЛИЯ. ПЕРВЫЕ НАХОДКИ В ЯКУТИИ**© 2021 г. д. чл. Г. С. Анисимова<sup>1, \*</sup>, д. чл. Л. А. Кондратьева<sup>1</sup>, д. чл. В. Н. Кардашевская<sup>1</sup><sup>1</sup>*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, просп. Ленина, 39, Якутск,  
Республика Саха (Якутия), 677980 Россия**\*e-mail: gsanisimova1952@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.10.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

В Хохойском рудном поле Верхнеамгинской золотоносной площади (Южная Якутия), в карстовых зонах впервые обнаружены редкие минералы таллия – авиценнит и вейссбергит. Вейссбергит  $TlSbS_2$  (вторая находка в России) найден в виде зерен в обломках джаспероидов среди карста. Химический состав: Tl 50.3–55.8%, Sb 27.4–30.9%, S 14.1–16.9%. Он ассоциирует с самородным золотом. Авиценнит  $Tl_2O_3$  (первая находка в России) обнаружен в карстовых полостях среди окисленных руд. Минерал находится в ассоциации с ритмично-зональными выделениями неназванных фаз, предположительно антимоната Tl и карбоната Tl, иногда с адуляром и гётитом. Присутствие разных минералов таллия, как и наличие губчатого и горчичного золота, должно учитываться при выборе технологии извлечения золота в ходе эксплуатации рудопроявления.

*Ключевые слова:* вейссбергит, авиценнит, таллий, теллур, минералы таллия, Хохойское рудное поле

**DOI:** 10.31857/S0869605521020027**ВВЕДЕНИЕ**

На данный момент насчитывается около 120 минералов таллия (вместе с неназванными минеральными видами: <http://www.mindat.org>). Подавляющее большинство из них представлено сульфидами и сульфосолями, и только небольшая часть – это оксиды, алюмосиликаты, сульфаты и селениды. Уникальным местонахождением таллиевых минералов является Ленгенбах (Швейцария), где известно их самое большое число в мире: 33 минеральных вида (Raber, Roth, 2018). Л.Т. Швыревым (2015) дана подробная информация о закономерностях распределения таллия в литосфере Земли, историко-минераграфический анализ таллиеносных объектов. В природе собственные минералы Tl встречаются настолько редко, что о промышленном использовании их в качестве таллиевого сырья не может быть и речи. Собственных месторождений таллий не образует, а извлекается попутно при переработке цинковых, медных и свинцовых руд. Только в некоторых случаях он может являться одним из главных или даже основным извлекаемым компонентом – это месторождения Алшар в Северной Македонии, Ланьмучань, Сянькуан, Зимудань и другие в Китае, Баррейраш в Бразилии (Шевырев, 2015). Сейчас отмечается возрастающий интерес к таллию из-за его важности для “новой” высокотехнологичной экономики.

Редкие минералы таллия – авиценнит и вейссбергит впервые обнаружены в карстовых образованиях на участке Левобережный в северной части Хохойского рудного поля (Южная Якутия).

Вейссбергит – сульфoантимонит таллия –  $TlSbS_2$  впервые был обнаружен на месторождении золота Карлин, Невада, США (Dickson et al., 1978), где находится в небольших количествах в ассоциации с антимонитом и кварцем в окремнелых доломитизированных карбонатных породах вдоль зон брекчирования и крутопадающих разломов. Отдельные зерна вейссбергита длиной от 0.005 до 0.5 мм заключены в небольших массах кварца и частично контактируют с более крупными зернами антимонита; в большинстве случаев вейссбергит, антимонит и кварц, видимо, образовались в пустотах брекчий.

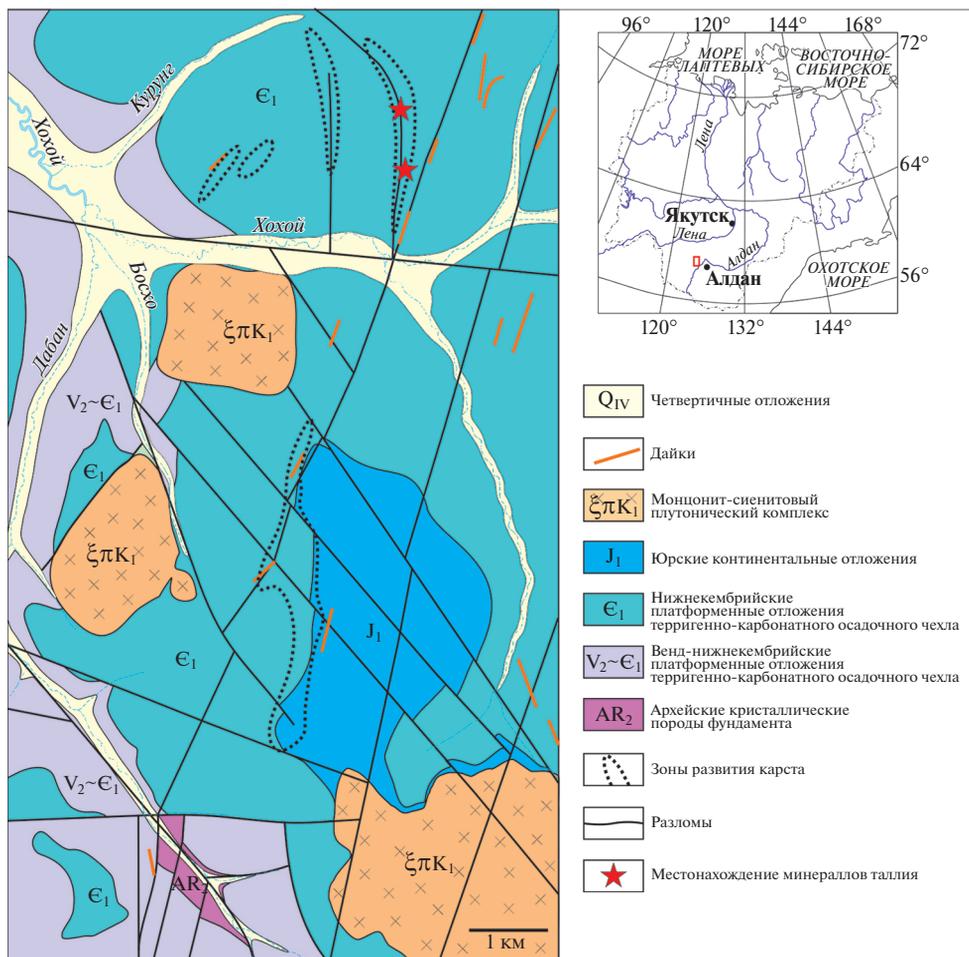
Авиценнит – редкий гипергенный минерал, представляющий собой практически чистый оксид трехвалентного таллия –  $Tl_2O_3$  (79.5% Tl), названный в честь арабского ученого Авиценны, найден в 1956 г. Х.Н.Карповой в образцах из древних выработок близ кишлака Джузумли в Зирабулакских горах в Узбекистане (Карпова и др., 1958). Он образует мелкие кубические кристаллы в массе полосчатого лимонита в карбонатных жилах среди известняков в ассоциации с кальцитом и гематитом (Конькова, Савельев, 1960).

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХОХОЙСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Хохойское рудное поле входит в состав Верхнеамгинской золотоносной площади. Оно расположено в бассейне верхнего течения ручья Хохой, правого притока р. Амга. Этот участок находится на северном склоне Алданского щита, в области погружения фундамента и наращивания мощности осадочного чехла (рис. 1). Основной объем осадков здесь представлен нижнекембрийскими терригенно-карбонатными (преимущественно доломитовыми) отложениями со стратиграфическим несогласием перекрытых нижнеюрскими терригенными песчанистыми отложениями (Анисимова и др., 2018). Мезозойские магматические образования представлены небольшими пластовыми интрузиями, лакколитами монцонитов и сиенит-порфиоров, а также дайками щелочных габброидов (Ivanov et al., 2019). Структурный план рудного поля определяется наличием протяженной зоны разломов северо-восточного простирания. Оруденение развито в узлах пересечения оперяющих срывов на тектонизированном контакте кембрийских и юрских отложений. Руды сконцентрированы в карстовых полостях, образующих протяженную зону северо-восточного простирания длиной более 10 км. Практически на всем своем протяжении аномальная зона представлена совокупностью шелевидных карстовых полостей, как открытых, так и перекрытых толщей песчаников. Карстовые полости выполнены интенсивно лимонитизированными суглинисто-супесчаными образованиями бурого цвета с разноразмерными обломками первичных руд и вмещающих пород. Первичные руды представляют собой джаспероиды – пирит-адуляр-кварцевые метасоматиты, насыщенные мельчайшими вкрапленниками гидроксидов железа, реже – крупнокристаллическим гематитом.

**Минеральный состав руд.** Геохимические ассоциации элементов Хохойского рудного поля – Au, Ag, As, Tl, Te и Sb. Основными минералами карстовых полостей являются тонкозернистый кварц, халцедон, опал, адуляр, серицит, кальцит, барит, флюорит, гётит, лимонит и гематит. Редко встречаются галенит, бертьерит, арсенопирит, халькозин, голландит, акантит, хлораргирит, незаванный сульфид Re и W и минералы Tl – вейссбергит, авиценнит, неидентифицированные карбонаты Fe, Mn, Te и Tl, теллулаты и антимонаты Tl, Fe, Mn, сульфаты Tl (Анисимова и др., 2018; Anisimova et al., 2020).

Главной особенностью Хохойского рудного поля является распространение нескольких типов самородного золота и его тесная ассоциация с минералами таллия



**Рис. 1.** Геологическое строение рудного поля Хохой. Составлено по материалам Е. П. Соколова и др., 2017 г. с дополнениями авторов.

**Fig. 1.** The geological structure of the Khokhoy gold ore field. Compiled based on the materials of Sokolov et al. (2017) with additions by authors.

(Anisimova et al., 2020). В первичных рудах самородное золото находится в тонкодисперсном или невидимом состоянии: золотины крайне редко достигают 0.005 мм. В окисленной рыхлой массе карста гипогенное или гипергенное золото наблюдается в виде частиц размером 0.01–0.1 мм, иногда до 0.5 мм. Первый тип золота представлен кристаллами и комковидными золотинами монокристаллического строения, пробыность которых варьирует от 835 до 1000‰.

Второй тип – пористое золото – представлено губчатым и горчичным золотом двух видов, различающихся по внутреннему строению: микропористым и дендритовидным. Гипергенное золото характеризуется выдержанной высокой пробой. Из примесей в составе золота, кроме серебра, постоянно присутствуют ртуть (до 5.78%) и висмут, реже свинец, медь и железо. Гипергенное золото химически однородно, характе-

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) вейссбергита  
**Table 1.** Chemical composition (wt %) of weissbergite

№ anal.	№ пробы	Tl	Sb	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	6-48-1	53.74	30.63	15.91	100.28	Tl <sub>1.06</sub> Sb <sub>0.94</sub> S <sub>2.00</sub>
2	6-48-2	52.87	30.12	16.09	99.08	Tl <sub>1.03</sub> Sb <sub>0.97</sub> S <sub>2.00</sub>
3	6-49-3	54.91	27.42	16.86	99.19	Tl <sub>1.02</sub> Sb <sub>0.98</sub> S <sub>2.00</sub>
4	6-50-1	53.16	29.15	16.48	98.79	Tl <sub>1.01</sub> Sb <sub>0.99</sub> S <sub>2.00</sub>
5	6-51-1	52.46	30.05	16.32	98.83	Tl <sub>1.01</sub> Sb <sub>0.99</sub> S <sub>2.00</sub>
Среднее		53.43	28.95	16.33	99.23	Tl <sub>1.06</sub> Sb <sub>0.94</sub> S <sub>2.00</sub>
Теорет. состав		52.37	31.20	16.43	100.00	TlSbS <sub>2</sub>

ризуется высокой пробностью по всему объему золотин, без каких либо каемок и оторочек.

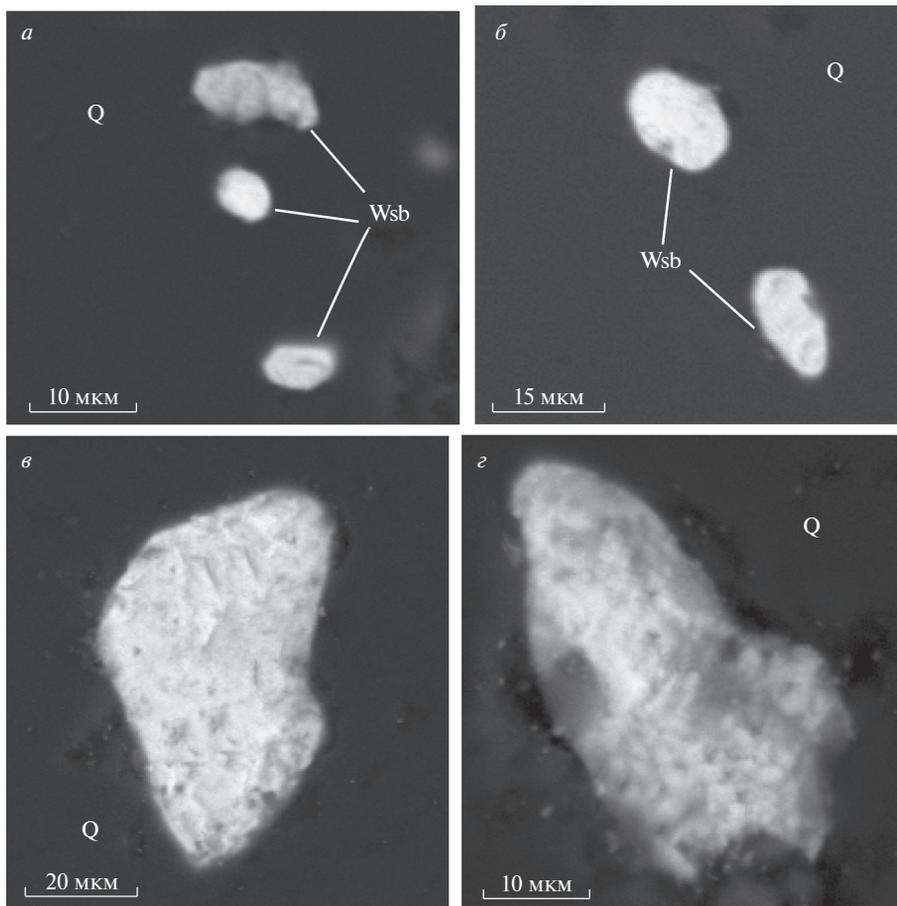
С учетом Au–Tl–As–Sb–Te–Ba геохимического профиля оруденения и развития низкотемпературной минерализации, предполагается эпипермальная природа образования руд (Anisimova et al., 2020). По структурно-морфологическим и минералого-геохимическим параметрам золотого оруденения Хохойское рудное поле сопоставимо с золоторудными месторождениями куранахского типа Центрально-Алданского района Якутии (Анисимова и др., 2018; Anisimova et al., 2020), содержащими уникальные гипергенные мелкозалегающие, рыхлые со свободным золотом руды в карстовых полостях и характеризующиеся большими запасами при относительно невысоких содержаниях золота.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований был рыхлый материал суглинисто-супесчано-обломочных образований, взятый из поверхностных горных выработок. Из шлиховых проб суглинисто-супесчаных образований объемом 3 кг путем гидросепарации была получена тяжелая фракция. Под бинокляром были выделены отдельные золотины и сопутствующие минералы, которые затем запрессовывались в эпоксидные шашки и полировались. Все полировки изучены под рудным микроскопом фирмы Jenavert в отраженном свете. С целью определения химического состава минералов (рудных, жильных и гипергенных), а также диагностики неизвестных минералов, был использован электронно-зондовый микроанализ. Препараты были проанализированы на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax-micro фирмы “Cameca” (аналитик Н.В. Христофорова). Основной объем образцов был проанализирован на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энерго-дисперсионным спектрометром фирмы OXFORD (аналитики С.К. Попова и С.А. Карпова); на нем же проводились и фотосъемки. Количественный анализ проводился с использованием Software INCA Energy. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.08 нА, время измерения 10 с. Условия съемки: напряжение 20 кВ, ток – 17 нА. Аналитические линии: Cu, Fe, Zn – K $\alpha$ ; Sb, S – L $\alpha$ . Стандарты: золото 750‰ – Au, Ag; HgTe (колорадоит) – Hg, Te; CuSbS<sub>2</sub> (халькостибит) – Cu, Sb, S; Tl – Tl (Br, I); ZnS (сфалерит) – Zn; CuFeS<sub>2</sub> (халькопирит) – Fe; PbS (галенит) – Pb; FeAsS (арсенопирит) – As.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

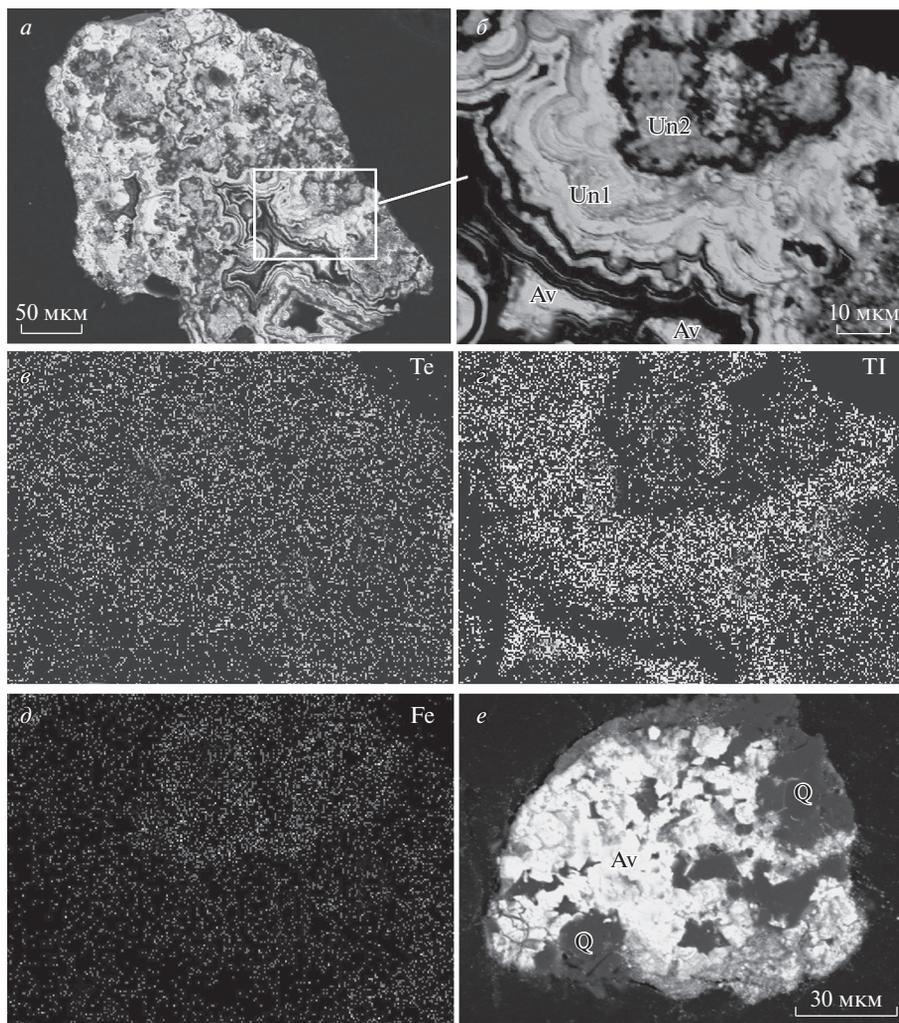
**Вейссбергит** найден в виде нескольких зерен в обломках джаспероидов – первичных руд среди карста. Форма выделения – ксеноморфные, иногда эллипсоидальные зерна



**Рис. 2.** Выделения вейсбергита овальной и эллипсоидальной формы в кварце (Q).  
**Fig. 2.** Weissbergite grains of oval and ellipsoidal shape in quartz (Q).

(рис. 2, *a*). Цвет – стально-серый. Блеск металлический. Минерал хрупкий, в отраженном свете анизотропный. Максимальные размеры зерен достигают 0.3 мм. Ассоциирующий минерал – высокопробное самородное золото. Химический состав вейсбергита стехиометричен (табл. 1).

**Авиценнит** обнаружен в карстовых полостях среди окисленных руд. Цвет минерала черный. Блеск металлический. Минерал непрозрачный. Он находится в ассоциации с ритмично-зональными выделениями неидентифицированных фаз, предположительно антимоната таллия и карбоната таллия (рис. 3, *a–d*). Нередко примазки авиценнита толщиной до 1 мкм обволакивают зерна кварца (рис. 3, *e*). Иногда более крупные выделения авиценнита встречаются в ассоциации с адуляром и гётитом (рис. 4, *a*). Часто в таких агрегатах этого минерала отмечается массивное или губчатое золото высокой пробы (рис. 4, *б–г*, табл. 2, ан. 5–8). Химический состав авиценнита стехиометричен. В связи с микроскопическими размерами и тесной ассоциацией с другими минералами рентгеновское исследование авиценнита провести не удалось.

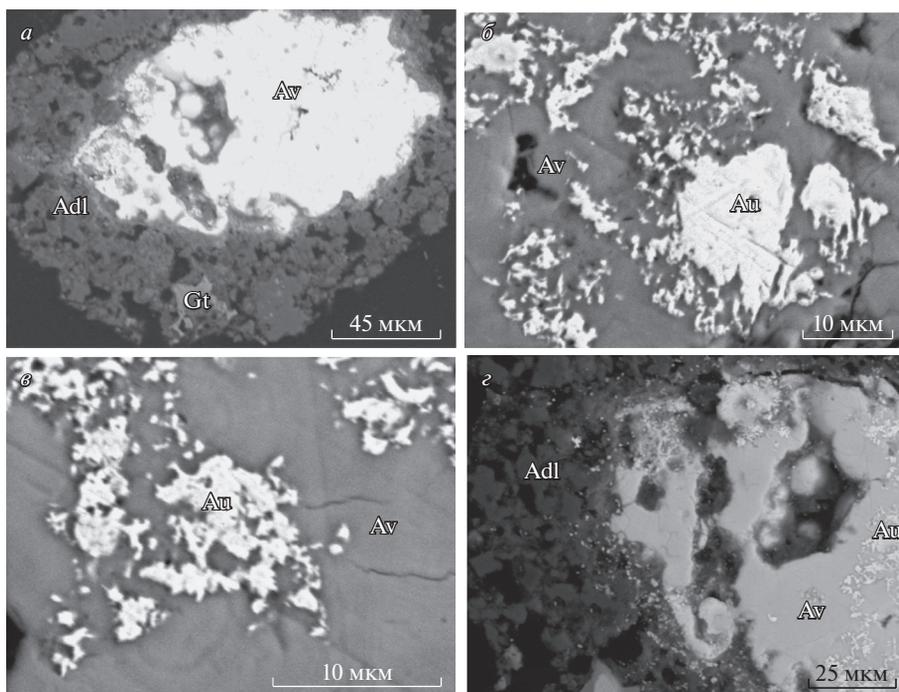


**Рис. 3.** Авиценнит Хохойского рудного поля: *a* – ритмично-зональные выделения авиценнита (Av), незванных теллуриатов (Un1) и карбонатов (Un2) таллия, общий вид; *б–д* – увеличенные фрагменты рис. 3, *a*: *б* – в отраженных электронах; *в, з* – в рентгеновском излучении элементов: *в* – Te; *з* – Tl; *д* – Fe; *е* – примазки авиценнита (Av) на зерне кварца (Q).

**Fig. 3.** Avicennite from the Khokhoy gold ore field: *a* – rhythmically-zonal particles of avicennite (Av), unnamed tellurates (Un1) and thallium carbonates (Un2), general view, *б–д* – enlarged fragments of fig. 3, *a*: *б* – in reflected electrons, *в, з* – X-ray of the following elements: *в* – Te, *з* – Tl, *д* – Fe, *е* – avicennite (Av) coatings on a quartz grain (Q).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В Якутии первый Tl-содержащий (до 0.5 мас. % Tl) минерал был открыт в As-Hg-Sb-месторождении Гал-Хая Лево-Сакынджинского рудного узла в бассейне р. Уяндина (Груздев и др., 1972). Минерал оказался новым и по месту нахождения был назван галхаитом. Это арсеносульфид ртути с цезием и примесями таллия, меди, цинка и сурьмы (Cs, Tl)(Hg, Cu, Zn)<sub>6</sub>(As, Sb)<sub>4</sub>S<sub>12</sub>. Он ассоциирует с киноварью, антимонитом, метацин-



**Рис. 4.** Авиценнит с включениями самородного золота: *a* – авиценнит (Av) в гётит (Gt) – адуляровом (Adl) материале (общий вид); *b–c* – фрагменты рис. 4, *a*: *b–c* – самородное золото (Au) массивного и губчатого облика в авиценните (Av), *d* – авиценнит с вкраплениями самородного золота.

**Fig. 4.** Avicennite with native gold inclusions: *a* – avicennite (Av) in goethite (Gt) – adularia (Adl) material (general view), *b–c* – fragments of fig. 4, *a*: *b–c* – massive and porous gold of (Au) in avicennite (Av), *d* – avicennite with inclusions of gold.

набаритом, вакабаяшилитом, реальгаром, флюоритом, кварцем, кальцитом и др. Галхаит – малораспространенный минерал, лишь в месторождениях Гетчелл (Навада, США) и Чаувай (Кыргызстан) он присутствует в значительных количествах. И.В. Пекков и И.А. Брызгалов (2006) по достоверным опубликованным и оригинальным данным установили следующие пределы колебаний содержаний основных химических компонентов галхаита (мас. %): Cs 3.3–7.1, Tl 0.0–4.2, Hg 47.6–53.0, Cu 1.6–3.6, Zn 0.3–3.0, Fe 0.0–0.5, Ag 0.0–2.9, As 14.3–17.2, Sb 0.0–5.5, S 20.2–22.7.

Наша находка вейсбергита и авиценнита является второй находкой таллиевых минералов в Якутии.

Отметим, что на уникальном Куранахском месторождении Центрально-Алданского региона одним из типоморфных элементов является таллий, но его минеральная форма до сих пор не выявлена. Хохойское рудное поле характеризуется присутствием разнообразного спектра минералов таллия: авиценнит, вейсбергит, неназванные антимонаты, теллулаты, сульфаты и карбонаты таллия (Anisimova et al., 2020). По этому признаку данный объект близок к уникальным золоторудным месторождениям карлинского типа в западных штатах США (Hofstra et al., 2000; Cline et al., 2005; Volkov et al., 2018), эпitherмальному Au-As-Hg-Tl месторождению Алшар в Северной Македонии (Volkov et al., 2006; Palinkaš et al., 2018), Воронцовскому месторождению на Урале России (Murzin et al., 2017; Vikentyev et al., 2019) и ряду других. На Воронцовском место-

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) авиценнита и ассоциирующего с ним самородного золота  
Table 2. Chemical composition (wt %) of avicennite and associated with native gold

№ anal.	№ пробы	Tl	Au	Ag	O	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	6-15-1	90.42	—	—	10.17	100.59	Tl <sub>2.20</sub> O <sub>2.80</sub>
2	6-15-5	89.26	—	—	11.68	100.94	Tl <sub>2.16</sub> O <sub>2.84</sub>
3	6-15-6	89.03	—	—	11.88	100.91	Tl <sub>2.16</sub> O <sub>2.84</sub>
4	6-15-7	91.38	—	—	9.32	100.7	Tl <sub>2.20</sub> O <sub>2.80</sub>
5	6-12-1	—	93.17	6.59	—	99.76	Au <sub>0.89</sub> Ag <sub>0.11</sub>
6	6-12-2	—	93.18	6.17	—	99.35	Au <sub>0.89</sub> Ag <sub>0.11</sub>
7	6-14-3	—	94.34	4.34	—	98.68	Au <sub>0.92</sub> Ag <sub>0.08</sub>
8	6-14-4	—	94.81	4.85	—	99.66	Au <sub>0.91</sub> Ag <sub>0.09</sub>

Примечание. Анализы 1–4 – авиценнит, 5–8 – самородное золото.

рождении помимо нескольких очень редких минералов, таких как бернардит, шабурнеит, кристит, дальнегроит, хатчинсонит, имхофит, парапьерротит, пикотполит, зихерит, врбаит и др., обнаружены четыре новых Tl-содержащих минерала, уже утвержденных Международной минералогической ассоциацией: воронцовит, ферроворонцовит, цыганкоит и гладковскийит. Воронцовит (Hg<sub>5</sub>Cu)<sub>26</sub>TlAs<sub>4</sub>S<sub>12</sub> и ферроворонцовит (Fe<sub>5</sub>Cu)<sub>26</sub>TlAs<sub>4</sub>S<sub>12</sub> – аналоги галхаита с содержанием таллия до 12 и 13% соответственно (Kasatkin et al., 2018a). Цыганкоит – Mn<sub>8</sub>Tl<sub>8</sub>Hg<sub>2</sub>(Sb<sub>21</sub>Pb<sub>2</sub>Tl)<sub>24</sub>S<sub>48</sub>, сульфосоля с концентрацией таллия до 26% (Kasatkin et al., 2018b). Гладковскийит – MnTlAs<sub>3</sub>S<sub>6</sub>, сульфосоля с самым высоким из них содержанием таллия: до 30% (Kasatkin et al., 2019). Первая находка вейссбергита в России также сделана М. Цыганко в Воронцовском месторождении. Зерна вейссбергита до 100 мкм найдены в кальцит-силикатной породе с арсенопиритом и золотом (<https://www.webmineral.ru/deposits/gallery.php?id=1306&filter=213247>, <https://www.webmineral.ru/minerals/image.php?id=9138>).

Находка авиценнита в рудах Хохойского поля является первой для России.

Интересной особенностью таллийсодержащих руд Хохойского рудного поля является их теллуруносность. В геохимическом поле территория характеризуется высокими содержаниями золота во вторичных ореолах рассеяния (1.0–34.0 г/т), ассоциацией золота с сурьмой, таллием, мышьяком, серебром, образующими контрастную линейную аномалию. Концентрация таллия колеблется от 0.5 до 50 г/т. Следует заметить, что в последние годы описаны несколько неназванных оксидов, в составе которых присутствует теллур – Pd<sub>4</sub>(Bi,Te,Tl)O<sub>6</sub> и Pd<sub>4</sub>(Tl,Bi,Te)O<sub>6</sub> из Аномального Cu-ЭПГ месторождения Кондёрского щелочно-ультраосновного комплекса, Хабаровский край (Barkov et al., 2016). По мнению авторов, эти минералы образовались in situ в результате реакций окисления за счет связанных сростаний МПГ.

Золотое оруденение Хохойского рудного поля имеет гипогенно-гипергенную природу. Рыхлые золотоносные образования являются вторичными, их формирование связано с окислением, дезинтеграцией и переотложением в карстовых полостях первичных руд – пирит-адуляр-кварцевых метасоматитов, образованных в результате кремнекалиевого метасоматоза карбонатных пород. Сильное обогащение руд летучим элементом – Tl – происходит именно при калиевом метасоматозе, в зонах разломов (Шевырев, 2015), что мы и наблюдаем на территории Хохойского рудного поля. Этим можно объяснить появление таллиевых минералов в описываемом рудопроявлении. Авиценнит, вероятно, образовался в процессе карстообразования при окислении вейссбергита – минерала первичных руд.

## ВЫВОДЫ

Обнаружение вейсбергита, авиценнита и неназванных минералов таллия в Хохойском рудном поле имеет большое значение. Это в основном связано с сильной токсичностью Тl для живых организмов и с увеличением экономической стоимости, которую таллий продемонстрировал за последние 20 лет (с 1278 долларов за кг в 1995 г. до 7400 долларов за кг в 2015: Ober, 2018). Вейсбергит и авиценнит характеризуются значительным количеством Тl (56 и 90 мас. % соответственно). В рудах описываемого поля возможны открытия новых минералов таллия. Тесная ассоциация авиценнита с самородным золотом массивного и губчатого облика, присутствие широкого спектра минералов таллия в рудах в дальнейшем должно учитываться при выборе технологии извлечения золота в ходе эксплуатации Хохойского рудного поля.

Статья подготовлена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2019-0004 и при поддержке гранта РФФИ (№18-45-140045 p\_a).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н. Золотое оруденение лебединского и куранахского типов в Верхнеамгинском районе (Южная Якутия) // Отечественная геология. **2018**. № 5. С. 3–13.

Волков А.В., Серафимовский Т., Кочнева Н.Т., Томсон И.Н., Тасев Г. Au–As–Sb–Tl-эпитермальное месторождение Алшар (Южная Македония) // Геол. рудн. месторождений. **2006**. Т. 48. № 3. С. 205–224.

Волков А.В., Сидоров А.А. Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа // Литосфера. **2016**. № 6. С. 145–165.

Груздев В.С., Степанов В.И., Шумкова Н.Г., Черницова Н.М., Юдин Р.Н., Брызгалов И.А. Галхаит  $HgAsS_2$  – новый минерал из мышьяково-сурьмяно-ртутных месторождений СССР // Докл. АН СССР. **1972**. Т. 205. С. 1194–1197.

Карпова К.Н., Конькова Е.А., Ларькин Е.Д., Савельев В.Е. Авиценнит – новый минерал // Докл. АН УзССР. **1958**. № 2. С. 23–26.

Конькова Е.А., Савельев В.Е. Новый таллиевый минерал – авиценнит // ЗВМО. **1960**. Вып. 89. № 3. С. 316–320.

Пеков И.В., Брызгалов И.А. Новые данные о галхаите // Новые данные о минералах. **2006**. Вып. 41. С. 26–32.

Шевырёв Л.Т. Закономерности в распределении летучих элементов в поверхностной оболочке Земли: вероятная историко-минерогенетическая интерпретация. Статья 3. Таллий // Вестник ВГУ. Серия: Геология. **2015**. № 3. С. 5–16.

**Weissbergite ( $TlSb_2$ ) and Avicennite ( $Tl_2O_3$ ) as Rare Thallium Minerals.  
First Finds in Yakutia**

**G. S. Anisimova<sup>a,\*</sup>, L. A. Kondratieva<sup>a</sup>, and V. N. Kardashevskaya<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch RAS,  
Yakutsk, Sakha Republic (Yakutia), Russia*

*\*e-mail: gsanisimova1952@mail.ru*

Rare thallium minerals – avicennite and weissbergite were discovered in the Khokhoy gold ore field of the Verkhneamginskiy gold-bearing area (South Yakutia, Russia) in karst zones for the first time. Weissbergite,  $TlSb_2$ , the second find in Russia, found as grains in jasperoid debris in the karst. The chemical composition is: Tl 50.3–55.8%, Sb 27.4–30.9%, S 14.1–16.9%. It is associated with native gold. Avicennite,  $Tl_2O_3$ , the first found in Russia, found in karst cavities in oxidized ores. The mineral is associated with rhythmically zonal particles of unnamed phases, presumably antimonate Tl and carbonate Tl, sometimes with adularia and goethite. The presence of different thallium minerals, as well as porous and mustard gold should be taken into account when choosing the technology for extracting gold during operation of the Khokhoy ore occurrence.

**Keywords:** weissbergite, avicennite, thallium, tellur, minerals of thallium, Khokhoy gold ore field

## REFERENCES

- Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Sokolov E.P. Kardashevskaya V.N. Gold mineralization of the Lebedinsky and Kuranach types in the Verkhneamginsky district (South Yakutia). *National Geology*. **2018**. N 5. P. 3–13 (in Russian).
- Anisimova G.S., Kondratieva, L.A., Kardashevskaya, V.N. Mineralogical and geological features of ores in typication of gold mineralization of the Verkhneamginsky area (Southern Yakutia). *Proc. 19th Int. Multidis. Scientific GeoConf. SGEM*: **2019**. P. 883–886.
- Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Kardashevskaya V.N. Characteristics of supergene gold of karst cavities of the Khokhoy gold ore field (Aldan Shield, East Russia). *Minerals*. **2020**. N 10. P. 139.
- Barkov A.Y., Shvedov G.I., Polonyankin A.A., Martin R.F. New and unusual Pd-Tl-bearing mineralization in the Anomal'nyi deposit, Kondyor concentrically zoned complex, northern Khabarovskiy kray, Russia. *Miner. Mag.* **2016**. Vol. 80. Iss. 3. P. 679–688.
- Cline J.S., Hofstra A.H., Muntean J.L., Tosdal R.M., Kenneth K.A. Carlin-type gold deposits in Nevada: critical geologic characteristics and viable models. *Econ. Geol.* **2005**. Vol. 100. P. 451–484.
- Dickson F.W., Radtke A.S. Weissbergite, TlSb<sub>2</sub>, a new mineral from the Carlin gold deposit, Nevada. *Amer. Miner.* **1978**. Vol. 63. N 7–8. P. 720–724.
- Gruzdev V.S., Stepanov V.I., Shumkova N.G., Chernitzova N.M., Yudin R.N., Bryzgalov I.A. Galkhaite HgAsS<sub>2</sub> – a new mineral from arsenic-antimony-mercury deposits of the USSR. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1972**. Vol. 205. P. 1194–1197 (in Russian).
- Hofstra A.H., Cline J.S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Econ. Geol.* **2000**. Vol. 13. P. 163–220.
- Ivanov A., Kondratyeva L., Loskutov E., Kravchenko A., Zhuravlev A., Ermakov N. Geochemical features of the composition of the mesozoic igneous rocks of the Khokhoy ore field (Upper-Amga gold-mining district, Aldan shield, North Asian Craton). *Proc. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. WMES*, **2019**. P. 012012.
- Karpova K.N., Kon'kova E.A., Larkin E.D., Savelev V.E. Avicennite – a new mineral. *Doklady Uzbek. SSR Acad. Sci.* **1958**. N 2. P. 23–26 (in Russian).
- Kasatkin A.V., Agakhanov A.A., Karpenko V.Y., Makovicky, E., Plášil J., Škoda R., Nestola F. Tsygankite, Mn<sub>8</sub>Tl<sub>8</sub>Hg<sub>2</sub>(Sb<sub>21</sub>Pb<sub>2</sub>Tl)<sub>224</sub>S<sub>48</sub>, a new sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*. **2018**. Vol. 8. N 5. P. 218.
- Kasatkin, A.V., Karpenko, V.Y., Škoda R., Tsyganko M.V., Plášil J. Vorontsovite, (Hg;Cu)<sub>26</sub>TlAs<sub>4</sub>S<sub>12</sub>, and ferrovorontsovite, (Fe;Cu)<sub>26</sub>TlAs<sub>4</sub>S<sub>12</sub>: the Tl- and Tl-Fe-analogues of galkhaite from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *Minerals*. **2018**. Vol. 8. N 5. P. 185.
- Kasatkin A.V., Agakhanov, A.A., Makovicky E., Plasil J., Škoda R., Chukanov N.V., Stepanov S.Y., Nestola F. Gladkovskyite, MnTlAs<sub>3</sub>S<sub>6</sub>, a new thallium sulfosalt from the Vorontsovskoe gold deposit, Northern Urals, Russia. *J. Geosci.* **2019**. Vol. 64. N 3. P. 207–218.
- Kon'kova E.A., Savelev V.E. A new thallium mineral – avicennite. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1960**. Vol. 89. N 3. P. 316–320 (in Russian).
- Murzín V.V., Azovskova O.B., Ravnushkin, M.Y., Naumov E.A., Varlamov D.A., Pirajno F. The Vorontsovskoe Au–Hg–As ore deposit (Northern Urals, Russia): geological setting, ore mineralogy, geochemistry, geochronology and genetic model. *Ore Geol. Rev.* **2017**. Vol. 85. P. 271–298.
- Ober J.A. Mineral commodity summaries 2018. *U.S. Geological Survey: Reston. VA. USA*. **2018**. P. 168–169.
- Palinkaš S.S., Hofstra A.H., Percival T.J., Šoštarč S.B., Palinkaš L., Bermanec V., Pecskay Z., Boev B. Comparison of the Allchar Au–As–Sb–Tl Deposit, Republic of Macedonia, with Carlin-type gold deposits. *Rev. Econ. Geol.* **2018**. Vol. 20. P. 335–363.
- Pekov I.V., Bryzgalov I.A. New data on galkhaite. *New Data on Minerals*. **2006**. Vol. 41. P. 26–32 (in Russian).
- Raber T., Roth F. The Lengenbach quarry in Switzerland: classic locality for rare thallium sulfosalts. *Minerals*. **2018**. N 8. P. 409.
- Radtke A.S., Dickson F.W., Slack J.W. Occurrence and formation of avicennite, Tl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, as a secondary mineral at the Carlin gold deposit, Nevada. *J. Res. U.S. Geol. Surv.* **1978**. Vol. 6. P. 241–246.
- Shevyrev L.T. Regularities in the volatile elements distributions within the surficial envelope of Earth: probable historical-mineragenic interpretation. *Proc. VSU. Geology*. **2015**. N 3. P. 5–16 (in Russian).
- Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Vikent'eva O.V., Chugaev A.V., Dubinina, E.O., Prokofiev V.Y., Murzín V.V. Vorontsovka Carlin-style gold deposit in the North Urals: mineralogy, fluid inclusion and isotope data for genetic model. *Chem. Geol.* **2019**. Vol. 508. P. 144–166.
- Volkov A.V., Serafimovskiy T., Kochneva N.T., Tomson I.N., Tasev G. The Alshar epithermal Au–As–Sb–Tl deposit, Southern Macedonia. *Geol. Ore Depos.* **2006**. Vol. 48. P. 175–192 (in Russian).
- Volkov A.V., Sidorov A.A. The geological-genetic model of Carlin type gold deposits. *Lithosphere*. **2016**. N 6. P. 145–165 (in Russian).