

УДК 339.13:546.86

## ОБЗОР СОСТОЯНИЯ СУРЬМЯНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

**Хатьков Виталий Юрьевич**<sup>1,2</sup>,  
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

**Боярко Григорий Юрьевич**<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

**Болсуновская Людмила Михайловна**<sup>1</sup>,  
bolsunovskl@tpu.ru

**Дибров Артём Михайлович**<sup>3</sup>,  
dibrov5@yandex.ru

**Ткачева Евгения Владимировна**<sup>1</sup>,  
belayaev@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> ПАО «Газпром»,  
Россия, 196143, г. Санкт-Петербург, пл. Победы, 2.

<sup>3</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

**Актуальность** работы обусловлена наличием противоречия экспортного товарного потока добываемого сурьмяного сырья и тотальной импортозависимости России по товарным сурьмяным продуктам.

**Цель:** изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) сурьмяного сырья в России, его цен (мировых и российских), сырьевой базы сурьмы России и перспектив ее национальной добычи и переработки.

**Методы:** статистический, графический, логический.

**Результаты.** Являясь одним из мировых лидеров добычи сурьмяного сырья (до 26 тыс. т/год), Россия практически не ведет его переработку и импортирует до 1 тыс. т/год металлической сурьмы и до 2 тыс. т/год оксидов сурьмы. Вывоз сурьмяного сырья превышает ввоз товарных сурьмяных продуктов в 1,9...8,4 раза. Сурьма в России является стратегическим видом минеральных продуктов с достаточной минерально-сырьевой базой и одновременно критическим продуктом ввиду тотальной импортозависимости при потреблении. Необходимо создание национального перерабатывающего сурьмяного производства с выпуском сурьмяных продуктов с большей прибавочной стоимостью. Текущая добыча сурьмяного сырья (месторождения Сарылах, Олимпиадинское) многократно перекрывает внутреннюю потребность в сурьмяных товарных продуктах. Возможно расширение добычи сурьмы путем вовлечения в эксплуатацию законсервированных (Сентачан, Жипкоша) и новых месторождений (Солонеченское), а также увеличение минерально-сырьевой базы за счет поисковых и геологоразведочных работ, в первую очередь, в пределах Восточно-Забайкальской и Сарылах-Сентачанской сурьмяноносных провинций. Возможно улучшение технологий переработки сурьмяного сырья (энергосбережения, гидрометаллургии, биоокисления) с целью снижения операционных издержек и повышения экологической безопасности производства сурьмяных продуктов.

**Ключевые слова:**

Сурьмяное сырье, экспорт сырья, импортозависимость, критический товарный продукт, минерально-сырьевая база, проекты.

Сурьма используется преимущественно для упрочнения свинцовых сплавов (в производстве аккумуляторов, оболочек кабелей и других изделий), а также при производстве антипиренов (огнестойких материалов), входящих в состав пластмасс и пропитку тканей [1]. В настоящее время увеличивается востребованность сурьмяных продуктов и в других направлениях использования с растущим спросом – в производстве солнечных батарей перовскитового типа [2] и фотокатализаторов [3], термоэлектрических элементов [4, 5], ионно-калиевых батарей [6] и электрокатализаторов окисления при утилизации органических отходов [7, 8].

В мировом предложении сурьмяного сырья (до 195 тыс. т 100 % Sb/год) лидируют Китай (55...79 % рынка), Россия (10...18 %) и Таджикистан (10...17 %) [9]. Добыча небольших объемов сурьмяного сырья

осуществляется также в Австралии, Боливии, Турции и Мьянме. Переработка на металлическую сурьму и ее триоксид осуществляется на основе собственного сырья в Китае и Боливии, а на импортном – в Киргизии, США, Франции и Бельгии [10]. Сурьмяные продукты как критические импортозависимые материалы заявлены в США [11] и Европейском Союзе [12].

В период плановой экономики СССР производилось до 20 тыс. т/год сурьмяной продукции [13]. Единым центром переработки сурьмяных руд и концентратов являлся Кадамжайский сурьмяный комбинат, построенный на сырьевой базе месторождений сурьмы Киргизии и Таджикистана. Даже богатые золото-сурьмяные руды и концентраты весьма отдаленных месторождений в Якутии для переработки вывозились в Киргизию. Переработка сурьмяного сырья осуществлялась преимуще-

ственно пирометаллургическим способом по энергозатратной технологии процесса Нидершлага [1, 14].

Промышленные типы *месторождений сурьмы* представлены двумя геологическими и технологическими типами: собственно сурьмяными (стибнитовыми или антимонитовыми) и золото-сурьмяными рудами [1, 10].

На территории России до 1990-х гг. в разработке находились только два собственно сурьмяных месторождения – Сарылахское (с 1972 г.) и Сентачанское (с 1989 г.) в Республике Саха (Якутия) (рис. 1). В 1980-е–90-е гг. на них производилось 16...22 тыс. т/год сурьмяного концентрата, содержащего 9...12 тыс. т сурьмы [15].



**Рис. 1.** Месторождения сурьмы, добывающие предприятия и предприятия, перерабатывающие и потребляющие сурьмяное сырье: 1 – сурьмяные провинции (I – Северо-Енисейская, II – Восточно-Забайкальская, III – Сентачан-Сарылахская); 2 – месторождения сурьмы (a – запасы свыше 15 тыс. т Sb, b – запасы и ресурсы менее 15 тыс. т Sb); 3 – горнодобывающие предприятия (a – действующие, b – остановившие производство); 4 – предприятия по переработке сурьмяного минерального сырья; 5 – предприятия по переработке вторичной сурьмы; 6 – предприятия по производству антипиренов; 7 – предприятия по выпуску сурьмяно-свинцовых аккумуляторов

**Fig. 1.** Antimony deposits, extractive and processing plants and plants producing and consuming antimony raw materials: 1 – antimony provinces (I – North Yenisei, II – East Transbaikalian, III – Sentachan-Sarylakh); 2 – antimony deposits (a – stocks over 15 thousand tons of Sb, b – stocks and resources less than 15 thousand tons of Sb); 3 – mining plants (a – operational, b – halted production); 4 – plants processing antimony mineral raw materials; 5 – plants processing secondary antimony; 6 – plants producing fire retardants; 7 – plants producing antimony-lead batteries

Разработку Сарылахского месторождения осуществляет АО «Сарылах-Сурьма». В 2007 г. по экономическим причинам была остановлена добыча на Сентачанском месторождении [16]. В 2006 г. компанией ООО «Хара-Шибирский сурьмяной комбинат» начата добыча сурьмяных руд на Жипкошинском месторождении в Забайкальском крае с выпуском концентрата до 1,5 тыс. т/год [17]. В 2020 г. на Олимпиадинском ГОКе (ПАО «Полус») в Красноярском крае началась попутная добыча сурьмяной продукции из неокисленных первичных руд одноименного золото-рудного месторождения с реализацией свыше 1,0 тыс. т/год сурьмяного сырья [17].

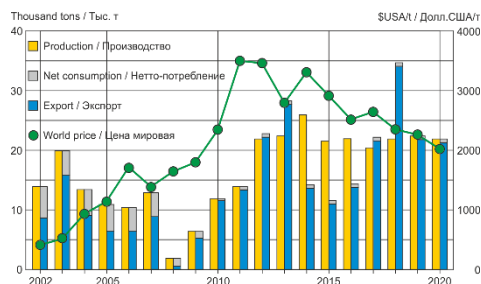
Национальные объемы добычи сурьмяного концентрата в 2002–2007 гг. составляли 11...20 тыс. т/год, но в кризисный 2008 г. они просели до 2 тыс. т, после на фоне роста экспортных цен объемы реализации возросли до 22 тыс. т в 2012 г. и остаются на этом уровне (22...26 тыс. т/год) в дальнейшем (рис. 2). Качество выпускаемого сурьмяного концентрата коле-

балось в широких пределах – от 60 до 30 %  $Sb_2O_3$ . Импорт сурьмяного концентрата практически отсутствует.

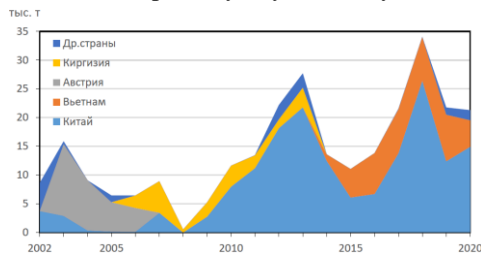
Национальное потребление в период низких цен на сурьмяный концентрат 2002–2007 гг. составляло 4,0...5,3 тыс. т/год, но после увеличения его экспортных цен оно упало до 0,4 тыс. т в 2010 г. и находится на уровне 0,6...0,7 тыс. т/год в последующие годы.

Предприятия по переработке сурьмяных концентратов в России до 1990-х гг. отсутствовали, но в дальнейшем небольшие объемы производства металлической сурьмы были созданы на базе Бурктинского никелевого завода в Оренбургской области (ООО «Саха-Уральский сурьмяный завод», работал до 2003 г.), а в НПЦ «Электрум» (Новосибирская обл.) – трехокси сурьмы и металлической сурьмы. В 2020 г. АО «Уралэлектромедь» (предприятие металлургического комплекса УГМК) подготовило к эксплуатации опытный участок по производству металлической сурьмы (до 200 т/год).

### Балансы/Balances



### Объемы экспорта по странам-покупателям Exports by buyer country



В динамике цен на сурьмяный концентрат следует отметить, что в период 2004–2007 гг. цены экспорта (353...744 \$США/т) были значительно ниже (–40...–80 %) среднемировых цен. Поэтому оставался выгодным частичный передел сурьмяного концентрата на необходимые национальные потребности. В дальнейшем экспортные цены выросли к 2011 г. до 3878 \$США/т, а к 2020 г. снизились до 2038 \$США/т, при этом разница с мировыми ценами снизилась (–6...–33 %), и это с учетом включения в его стоимость золота и серебра, содержащегося в сырье.

Если в 2002–2007 гг. на экспорт отправлялось 59...67 % произведенного сурьмяного концентрата, то в дальнейшем его доля увеличилась до 90...100 %. В 2003–2006 гг. основные поставки шли в Австрию (63...96 %), а затем лидерство покупок возглавил Китай (52...92 %) и Вьетнам (22...52 %). В 2006–2011 гг. имели место экспортные поставки в Киргизию (7...62 %).

Стоимость экспорта сурьмяного концентрата в 2002–2007 гг. была относительно небольшой (3,1...6,1 млн \$США/год), но рост цен привел к ее увеличению до максимума 65,6 млн \$США в 2012 г. и сохранению высокого уровня стоимости в последующем периоде (23...48 млн \$США/год).

Национальное потребление оксидов сурьмы невелико и составляет 1...2 тыс. т/год (рис. 3). Производство же этого продукта составляло в 2002–2007 гг. 0,5...0,8 тыс. т/год, в последующие годы – до 0,2 тыс. т/год. Большая часть потребностей в оксидах сурьмы обеспечивалась по импорту: 0,2...0,9 тыс. т/год в 2002–2007 гг. (4...56 % от потребления), в последующие годы – 1,0...2,0 тыс. т/год (100 % от потребления). Импорт осуществляется в основном из Китая (40...100 %), Боливии (22...49 %) и Бельгии (до 27 %). Экспорт оксидов сурьмы был довольно значимым в 2002–2007 гг. (0,2...0,7 тыс. т/год, или 28...100 % от производства) и исчезающе малым в последующие годы.

### Цены/Prices



Рис. 2. Динамика показателей товарных потоков сурьмяных руд и концентратов за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

Fig. 2. Dynamics of indicators of antimony ore commodity flow and its concentrates for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19] and TrendEconomy [20]

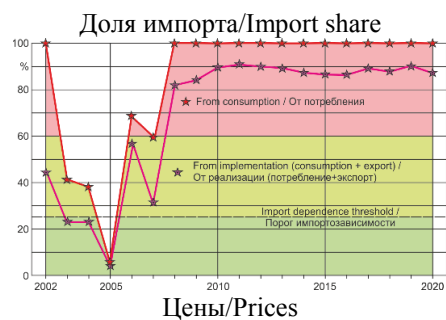
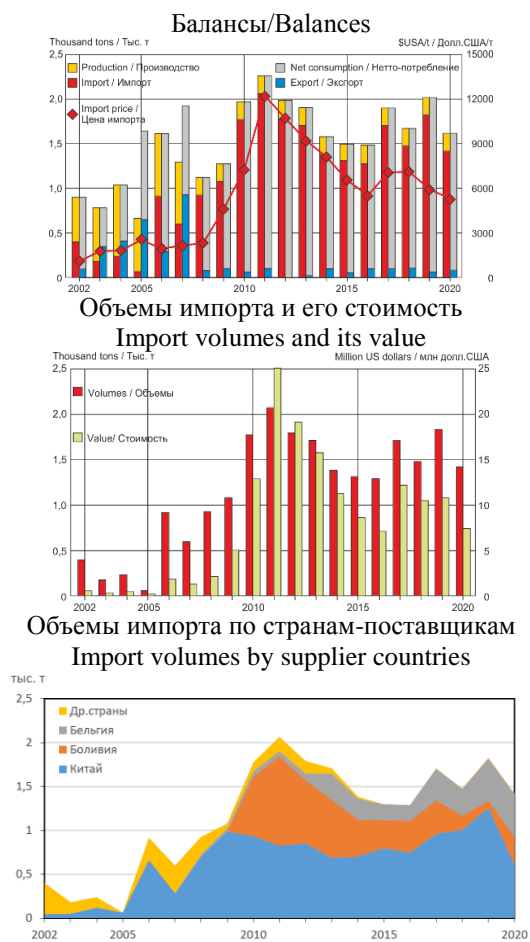
В динамике мировых цен на оксиды сурьмы повторяются тренды цен на сурьмяный концентрат – рост с 1550 \$США/т в 2002 г. до 11325 \$США/т в 2011 г. и последующее снижение до 5300 \$США/т в 2020 г. Если в 2002–2007 гг. цены российского импорта оксидов сурьмы были преимущественно ниже мировых (–10...–55 %), то в дальнейшем – на уровне мировых (–4...+8 %).

Стоимость импорта оксидов сурьмы в 2002–2008 гг. была относительно небольшой (0,1...2,1 млн \$США/год), но рост цен привел к ее увеличению до максимума 7,9 млн \$США в 2011 г., после чего наметился тренд снижения до 0,9 млн \$США в 2020 г.

Потребители оксидов сурьмы – предприятия по производству антипиренов огнезащиты – ООО «НПО «Антипирен», г. Москва, ООО «Группа «ВитаХим», г. Москва, г. Дзержинск, Нижегородская обл., г. Ростов-на-Дону, г. Краснодар, г. Пермь, г. Новосибирск, ООО «ТД «НовоХим», г. Томск.

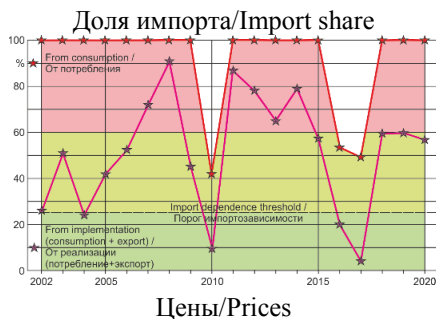
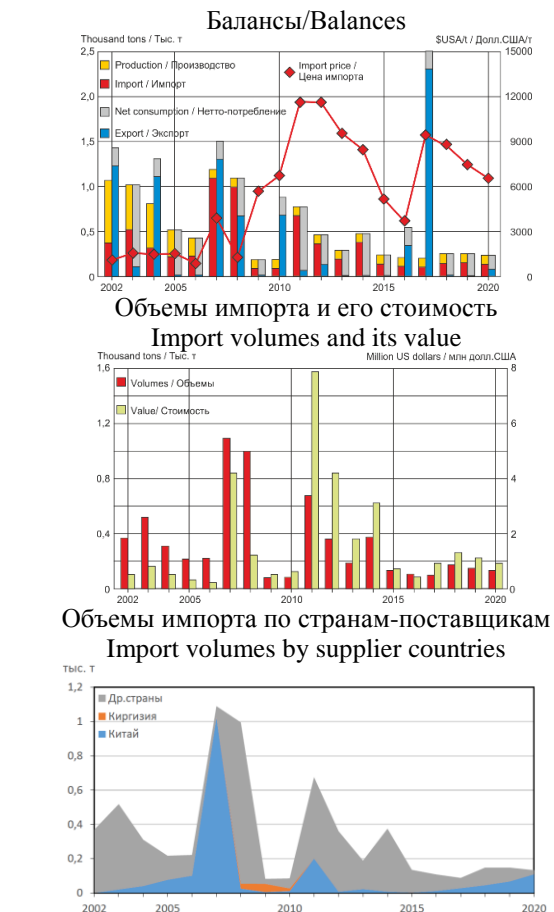
Потребление металлической сурьмы оценивается на уровне 1,5...2,0 тыс. т/год, при этом предложение первичной металлической сурьмы находится на уровне 0,2...0,5 тыс. т/год (рис. 4). Как и для оксидов сурьмы производство этого металла медленно сокращалось с 0,7 тыс. т в 2002 г. до 0,1 тыс. т в 2007 г. Этот уровень производства сохраняется до настоящего времени.

В России достаточно эффективно осуществляется утилизация свинцовых сплавов, в т. ч. содержащих сурьму [21]. Производством вторичных сплавов с сурьмой занимается множество предприятий, из которых наиболее значимые – АО «РязЦветМет», г. Рязань, АО «Метком Групп», г. Зарайск, Московская обл., АО «ПО «Цветметсервис», г. Озерск, Челябинская обл., АО «Вторсплав», г. Ульяновск, АО «Вологодский аккумуляторный завод», г. Вологда, ООО «Мост-Цветмет», г. Батайск, Ростовская обл., ООО «ТД «Эко-сплав», г. Новосибирск. Оценочно они выпускают 1,0...1,5 тыс. т/год вторичных сурьмяных сплавов.



**Рис. 3.** Динамика показателей товарных потоков оксидов сурьмы за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

**Fig. 3.** Dynamics of antimony oxide commodity flows for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19], and TrendEconomy [20]



**Рис. 4.** Динамика показателей товарных потоков металлической сурьмы за 2002–2020 гг. Составлено по данным Росстата [18], Федеральной таможенной службы РФ [19] и TrendEconomy [20]

**Fig. 4.** Dynamics of indicators of metallic antimony commodity flow for 2002–2020. Compiled from Federal State Statistics Service RU [18], the Federal Customs Service RU [19], and TrendEconomy [20]

По импорту в Россию поступления металлической сурьмы неравномерны, изменяясь от 0,08 до 1,1 тыс. т/год. Объемы импорта этого металла практически весь период превышают его первичное потребление, лишь в отдельные годы составляя менее 100 %. Импорт осуществляется из разных стран, а наибольшие поставки – из Китая и Киргизии. Экспорт металлической сурьмы (преимущественно вторичного металла) составляет 0,1...2,5 тыс. т/год.

В динамике мировых цен на металлическую сурьму повторяются тренды цен на оксиды сурьмы и сурьмяный концентрат – рост с 1480 \$США/т в 2002 г. до 9200 \$США/т в 2012 г., и последующего снижения до 6700 \$США/т в 2020 г. Если в 2002–2007 гг. цены российского импорта металлической сурьмы были преимущественно ниже мировых (–20...–78 %), то в дальнейшем – преимущественно выше мировых (+10...+46 %). Величины стоимости импорта оксидов сурьмы за анализируемый период были крайне неупорядочены, как следствие переменной объемов торговли и цен на товарные продукты – от 0,2 до 7,9 млн \$США/год.

Потребители металлической сурьмы – предприятия по производству аккумуляторов – АО «Курский аккумуляторный завод», г. Курск, ООО «Рязанский аккумуляторный завод «Тангстоун», г. Рязань, АО «Тюменский аккумуляторный завод», г. Тюмень, АО «Алькор», г. Тюмень, АО «Электроисточник», г. Саратов, ООО «Аккумуляторный завод «Резерв», г. Аксай, Ростовская обл., ООО «Тубор», г. Дзержинск, Нижегородская обл., ООО «Аккумуляторные технологии», г. Свирск, Иркутская обл., АО «Электротяга», г. Санкт-Петербург.

Минерально-сырьевая база сурьмяного сырья России весьма значительна: подготовленные запасы категорий А+В+С<sub>1</sub> – 173 тыс. т, а и прогнозные ресурсы Р<sub>1</sub>+Р<sub>2</sub>+Р<sub>3</sub> – 737 тыс. т [22–24]. Здесь и богатые по сурьме и золоту месторождения Сентачан-Сарылахской провинции, и многочисленные средние по качеству месторождения Восточно-Забайкальской провинции, и малоизученные месторождения Северо-Енисейской провинции. В принципе, возможна до-разведка известных месторождений и проявлений сурьмы в пределах сурьмяноносных провинций, но ввиду отсутствия достаточных мощностей национальных перерабатывающих предприятий и неопределенности на мировом рынке сурьмяного концентрата новые разведочные и добывающие проекты сурьмяного сырья не очень привлекательны.

Тем не менее следует отметить проекты разработки Солонеченского сурьмяного месторождения в Восточном Забайкалье (ООО «ГРК «Солонеченское»), а также геолого-разведочные проекты на сурьмяное сырье на площадях Кимовского, Киняского и Тарынского рудных полей (Сентачан-Сарылахской провинция), а также в пределах Тьргетуй-Жипкошинской, Итака-Дарасунской и Газимуро-Приаргунской рудных зон (Восточно-Забайкальская провинция) [22, 23].

Добыча сурьмяного сырья именно как попутного полезного компонента возможна, что и осуществлено

на Олимпиадинском золоторудном месторождении (Северо-Енисейская провинция), из руд которого, несмотря на низкое среднее содержание ценного компонента (всего 0,16 % Sb), начиная с 2020 г. организовано извлечение сурьмяного материала [17]. Схожая процедура формирования цепочки извлечения попутного сурьмяного концентрата может быть организована на Холоднинском полиметаллическом месторождении в Республике Бурятия (нераспределенный фонд).

Серьезным препятствием для проектов развития национальных перерабатывающих производств сурьмяного сырья является относительно невысокая прибавочная стоимость при переработке сурьмяного концентрата на металлическую сурьму [до +72 %] и оксид сурьмы [+104...+211 %] (рис. 5), а также технологические затруднения его переработки (особенно при извлечении золота и серебра).



Рис. 5. Отношение стоимости конечных сурьмяных продуктов и стоимости потребного для их производства сурьмяного сырья

Fig. 5. Ratio of the cost of the final antimony products and the cost of antimony raw materials required for their production

Технологии переработки сурьмяного сырья. Сурьмяные руды традиционно называются упорными ввиду сложности их передела, в первую очередь ввиду необходимости разделения всех полезных компонентов, находящихся в составе этих руд (сурьмы, золота, свинца, меди, цинка, серебра и др.), и их рафинирования (включая собственно сурьму).

Собственно, обогащение сурьмяных руд гравитационным и флотационным способами с получением стибнитового (антимонитового) концентрата не вызывает серьезных осложнений [1, 17, 27]. Здесь возможно и улучшение показателей обогащения за счет использования методов радиометрической рудоподготовки [26, 28, 29]. Некоторая сложность возникает при обогащении окисленных сурьмяных руд за счет снижения степени раскрытия полезных минералов, но она решаема с использованием специальных реагентов-собирателей [17].

Проблема переработки сурьмяного сырья на металл остается открытой. Пирометаллургический метод, несмотря на неизбежность высоких энергетических затрат, остается основным для передела сурьмяного концентрата [1, 14]. Исследования по улучшению пирометаллургических технологий направлены в



основном на снижение затрат энергии [23, 30–33] и снижение загрязнения окружающей среды [34].

Ведутся исследования по переработке сурьмяного сырья гидрометаллургией путем выщелачивания сурьмы как в агитационном варианте [35, 36], так и при кучном и подземном выщелачивании [28, 29].

Новым направлением в исследованиях по переработке сурьмяного сырья является использование биотехнологий. Это технологии непосредственного химического выщелачивания сурьмы [37], и биоокисления сульфидов сурьмы до безвредных оксидов [38]. Последний способ нашел промышленное применение на Олимпиадинском ГОКе в Красноярском крае [39].

*Экологический фактор в сурьмяной отрасли.* Сурьма и ее соединения воспринимаются как высокотоксичные продукты. Пыль сурьмяного концентрата и триоксида сурьмы, а также аэрозоль металлической сурьмы относятся ко второму классу опасности. Несомненно, наличие морально и физически устаревших технологий переработки сурьмяного сырья на действующем производстве является потенциальным источником опасных загрязнений. Именно по этой причине в 2010 г. была прекращена переработка российского сурьмяного концентрата на заводе ООО «Рязцветмет».

В Китае, мировом лидере добычи сурьмяного сырья, его передела и потребления сурьмяных продуктов, в части охраны окружающей среды предложены программы стратегии управления рисками загрязнения сурьмяными продуктами [40], включающие модернизацию действующих сурьмяных производств, ужесточающие природоохранные мероприятия, а также программы ликвидации имеющихся очагов загрязнений.

Несмотря на возможность организации защищенных технологических цепочек производства и полной утилизации отходов при довольно небольших объемах потребного выпуска сурьмяных продуктов, протестная общественность все же крайне негативно реагирует на проекты строительства подобных производств. В частности, не состоялся проект строительства сурьмяного завода ООО «Национальная сурьмяная компания», г. Дегтярск, Свердловская обл., после общественных протестов в городах Асбест и Дегтярск в марте 2017 г. В то же время в России известны предприятия, которые перерабатывают вторичные содержащие сурьму материалы, и претензий по их опасности (в т. ч. потенциальной) не имеется.

На стадии проектирования добывающих и перерабатывающих производств имеются все условия по выбору наиболее «чистых» технологий добычи, обогащения и передела сурьмяного сырья (в частности – биогидрометаллургии), проектов строительства хранилищ отходов повышенной защищенности, а также систем мониторинга качества окружающей среды и защитных мероприятий при риске опасных ситуаций. Проекты геологоразведочных работ на сурьму, строительство добывающих и перерабатывающих сурьмяных предприятий реализуются и в странах с весьма высокими требованиями к охране окружающей среды – в Европейском Союзе [41] и США [9, 11]. И в России, обла-

дающей крупной минерально-сырьевой базой по сурьме, возможно организовать самостоятельное национальное производство сурьмяных товарных продуктов с более высокой прибавочной стоимостью и с соблюдением всех природоохранных требований.

### Заключение

Ситуация в сурьмяной отрасли в России весьма сложная: добывающий сурьмяное сырье дивизион является *полностью экспортноориентированным*, а предприятия, потребляющие оксид сурьмы, – *только импортозависимыми*. В отношении металлической сурьмы имеется демпфер значительных объемов использования вторичной сурьмы (при утилизации свинцовых аккумуляторов) до 1,5 тыс. т/год, но имеется также импортный поток первичной металлической сурьмы до 1 тыс. т/год. Таким образом, и по металлической сурьме имеется *значительная импортозависимость*.

Налицо перекоп избыточного экспорта сурьмяного сырья из России при наличии внутреннего потребления промежуточных сурьмяных продуктов (оксидов сурьмы и металлической сурьмы), причем вывоз сырья превышает ввоз промпродуктов в 1,9...8,4 раза (в пересчете на 100 % Sb) (рис. 6).

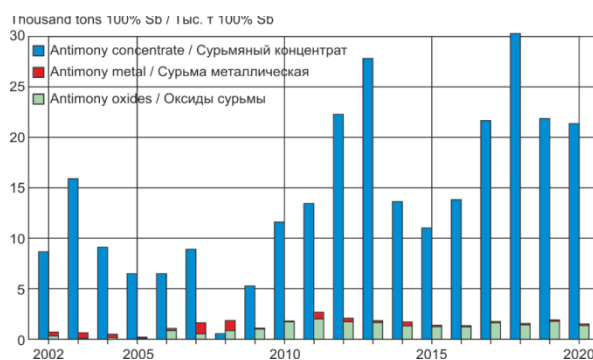


Рис. 6. Объемы экспорта сурьмяного сырья и импорта сурьмяных продуктов в пересчете на 100 % Sb. Составлено по данным Федеральной таможенной службы РФ [18]

Fig. 6. Export volume of antimony raw materials and import volume of antimony products in terms of 100 % Sb. Compiled according to the data of the Russian Federal Custom Service [18]

Необходимо создание новых достаточных объемов производства оксидов сурьмы и металлической сурьмы в рамках интеграции или кооперации компаний, ныне осуществляющих только добычу сурьмяного сырья. Передельное производство оксидов сурьмы и металлической сурьмы может быть организовано вблизи добывающих рудников (при наличии достаточности энергетических ресурсов и обеспеченности квалифицированного персонала) или, учитывая небольшие объемы достаточно ценного добываемого сурьмяного сырья, в любом удобном месте урбанизированной промышленной инфраструктуры России.

Возможно и улучшение технологий переработки сурьмяного сырья (особенно это актуально для золотосодержащих концентратов) с целью снижения опе-

рациональных издержек и повышения экологической безопасности производства сурьмяных продуктов.

В части воспроизводства минерально-сырьевой базы сурьмы России возможна доразведка известных месторождений и проявлений сурьмы в пределах сурьяноносных провинций: в первую очередь в пределах Сентачан-Сарылахской и Восточно-Забайкальской провинций. Поисковые работы на сурьму возможны не только в пределах известных сурьяноносных провинций, но и на других территориях, где известны

проявления сурьмы (Приморский и Хабаровский край, Хакассия, Северный Кавказ).

Возможна расконсервация ранее работавших рудников на месторождениях сурьмы Сентачан и Жипкоша, а также реализация новых проектов разработки месторождений Солонеченское (Восточно-Забайкальская провинция) и Ким (Сентачан-Сарылахская провинция).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-28-01742).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорчук В.П. Минеральное сырье. Сурьма. Справочник. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 34 с.
2. Bismuth-antimony mixed double perovskites Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>Br<sub>6</sub> in solar cells / M. Pantaler, S. Olthof, K. Meerholz, D.C. Lupascu // *MRS Advances*. – 2019. – Т. 4. – В. 64. – P. 3545–3552. DOI: 10.1557/adv.2019.404.
3. Ertl M., Wöß E., Knör G. Antimony porphyrins as red-light powered photocatalysts for solar fuel production from halide solutions in the presence of air // *Photochemical and Photobiological Sciences*. – 2015. – V. 14. – № 10. – P. 1826–1830. DOI: 10.1039/c5pp00238a.
4. Realizing high-efficiency power generation in low-cost PbS-based thermoelectric materials / B. Jiang, X. Liu, Q. Wang, J. Cui, B. Jia, Y. Zhu, J. Feng, Y. Qiu, M. Gu, Z. Ge, J. He // *Energy and Environmental Science*. – 2020. – V. 13. – № 2. – P. 579–591. DOI: 10.1039/c9ee03410b.
5. Kumari M., Sharma Y.C. Effect of alternate layers of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films on structural, optical and thermoelectric properties // *Chalcogenide Letters*. – 2020. – V. 17. – № 2. – P. 59–67.
6. Cheng G.-Z., Liu S., Wang H.-L. Potential high-performance anode material for potassium ion batteries: Antimony // *Chinese Journal of Applied Chemistry*. – 2021. – V. 38. – № 2. – P. 170–180. DOI: 10.19894/j.issn.1000-0518.200243.
7. Influence of the Sb content in Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb electrodes on the electrocatalytic behaviour for the degradation of organic matter / D. Lim, Y. Kim, D. Nam, S. Hwang, S.E. Shim, S.-H. Baek // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 197. – P. 1268–1274. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.301.
8. Subba Rao A.N., Venkatarangaiah V.T. Preparation, characterization, and application of Ti/TiO<sub>2</sub>-NTs/Sb-SnO<sub>2</sub> electrode in photo-electrochemical treatment of industrial effluents under mild conditions // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25. – № 12. – P. 11480–11492. DOI: 10.1007/s11356-017-1179-4.
9. Klochko K. Antimony [advance release] 2017 Minerals Yearbook. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. – 2021. – 11 p. URL: antimony 2017 (amazonaws.com) (дата обращения: 10.01.2022).
10. Комин М.Ф., Ключарев Д.С., Волкова Н.М. Минерально-сырьевая база сурьмы в России: проблемы и решения // *Разведка и охрана недр*. – 2006. – № 9–10. – С. 26–29.
11. Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply / K.J. Schulz, J.H. de Young, R.R. Seal, D.C. Bradley. – Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. – 862 p. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (дата обращения: 10.01.2022).
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 417–422. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.08.082.
13. Усова Т.Ю., Бугов В.А., Иванов В.С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы России // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 1998. – № 1. – С. 4–12.
14. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process // *TMS Annual Meeting. 7th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Code 121635. – 2016. – P. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
15. Тенденции добычи и производства сурьмы в Республике Саха (Якутия) / Г.Ф. Безносков, Р.Р. Ноговицин, В.А. Шерстов, Е.П. Жирков // *Горная промышленность*. – 2005. – № 6 (64). – С. 59–62.
16. Батугина Н.С., Катюжан Л.Л. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике Республики Саха (Якутия) // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2009. – № 5. – С. 51–58.
17. Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Линия обогащения оксидных форм сурьмы на примере месторождения «Жипкоша» // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2021. – Т. 27. – № 5. – С. 36–43.
18. Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss> (дата обращения: 10.01.2022).
19. Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (дата обращения: 10.01.2022).
20. TrendEconomy. URL: [dataexplorer \(trendeconomy.ru\)](http://dataexplorer.trendeconomy.ru) (дата обращения: 10.01.2022).
21. Шустров А.Ю., Денисов В.В. Комплексная технология производства свинца и сурьмы // *Цветные металлы*. – 2004. – № 10. – С. 37–40.
22. Минерально-сырьевая база сурьмы – проблемы и пути развития / М.Ф. Комин, Т.А. Блинова, Н.М. Волкова, Д.С. Ключарев // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2011. – № 6. – С. 19–29.
23. Спорыхина Л.В., Орлова Н.И., Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база цветных металлов: перспективы развития и освоения // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2013. – № 5. – С. 99–118.
24. Состояние минерально-сырьевой базы цветных металлов (олово, вольфрам, молибден, сурьма и алюминиевое сырье) / Л.В. Спорыхина, А.В. Акимова, М.В. Данилин, Л.И. Ремизова // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. – 2017. – № 4. – С. 19–27.
25. Павленко Ю.В., Поляков О.А. Восточно-Забайкальская сурьяная провинция // *Вестник Читинского государственного университета*. – 2010. – № 9 (66). – С. 77–84.
26. Павленко Ю.В. Геолого-технологический прогноз: Кочковское золото-сурьянное месторождение // *Вестник Забайкальского государственного университета*. – 2012. – № 12 (91). – С. 129–139.
27. Евдокимов С.И., Дациев М.С., Подковыров И.Ю. Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
28. Поляков О.А., Павленко Ю.В. Совершенствование процессов рудоподготовки основных типов сурьянных месторождений Восточного Забайкалья // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2012. – № S1-1. – С. 243–257.
29. Поляков О.А. Перспективы освоения сурьянных руд Восточного Забайкалья с использованием методов радиометрической рудоподготовки и кучного выщелачивания ценного компонента из хвостов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – № S. – С. 137–143.
30. Myzenkov F.A., Tarasov A.V. Development and creation of modern metallurgical technology for antimony production with gold recovery from domestic gold-antimony concentrates in Russia // *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*. – San Diego, California, 2006. – V. 4. – P. 121–128. – Code 68886.

31. Padilla R., Chambi L.C., Ruiz M.C. Antimony production by carbothermic reduction of stibnite in the presence of lime // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2014. – V. 50. – № 1. – P. 5–13. DOI: 10.2298/JMMB130604003P.
32. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Melting of crude antimony in the low-tonnage production // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novokuznetsk: 20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy. Code 141585*. – 2018. – V. 411. – № 119. – Article number 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012021.
33. Способ переработки золотосодержащего сурьмяного концентрата и линия для его осуществления: пат. Рос. Федерация, № 2692135 С1, заявл. 03.09.2018; опубл. 21.06.2019 Бюл. № 18. – 13 с.
34. Separation of antimony from a stibnite concentrate through a low-temperature smelting process to eliminate SO<sub>2</sub> emission / J.-G. Yang, C.-B. Tang, Y.-M. Chen, M.-T. Tang // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2011. – V. 42. – № 1. – P. 30–36. DOI: 10.1007/s11663-010-9453-6.
35. Zekavat M., Yoozbashizadeh H., Khodaei A. Leaching of antimony from stibnite ore in KOH solution for sodium pyroantimonate production: systematic optimization and kinetic study // *JOM*. – 2021. – V. 73. – № 3. – P. 903–912. DOI: 10.1007/s11837-020-04531-8.
36. Исследование и оценка возможности применения различных гидрометаллургических технологий по извлечению сурьмы из флотационных концентратов ПАО «Полус» / Д.И. Головкин, Р.Э. Русалев, Д.А. Рогожников, С.С. Набойченко // *Металлургия цветных металлов: Материалы IV международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.И. Кузнецова*. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018. – С. 151–155.
37. Efficient reduction of antimony by sulfate-reducer enriched biocathode with hydrogen production in a microbial electrolysis cell / S.R.B. Arulmani, J. Dai, H. Li, Z. Chen, H. Zhang, J. Yan, T. Xiao, W. Sun // *Science of the Total Environment*. – 2021. – V. 77420. – Article number 145733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.10.17580/tsm.2016.10.04.
38. Булаев А.Г., Першина Е.В., Украинцев И.В. Состояние развития современных биоидрометаллургических технологий и перспективы их использования в России // *Цветные металлы*. – 2016. – № 10 (886). – С. 29–35. DOI: 145733.10.17580/tsm.2016.10.04.
39. Переработка золотоносных руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера / В.К. Совмен, В.Н. Гуськов, А.В. Белый, З.П. Кузина, С.В. Дроздов, С.И. Савушкина, А.М. Майоров, М.П. Закревский. – Новосибирск: Наука, 2007. – 144 с.
40. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: a case study from South China / J.-C. Fei, X.-B. Min, Z.-X. Wang, Z.-H. Pang, Y.-J. Liang, Y. Ke // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – № 35. – P. 27573–275861. DOI: 10.1007/s11356-017-0310-x.
41. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping / P. Négrel, A. Ladenberger, C. Reimann, M. Birke, A. Demetriades, M. Sadeghi, S. Albanese, M. Andersson, R. Baritz, M.J. Batista, B. Flem, A. Bellan // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 111. – Article number 104425. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104425.

Поступила 02.02.2022 г.

#### Информация об авторах

**Хатьков В.Ю.**, начальник департамента, ПАО Газпром; соискатель нефтегазового отделения Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Боярко Г.Ю.**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Болсуновская Л.М.**, кандидат филологических наук, доцент, отделение иностранных языков, Школа инженерной базовой подготовки, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Дибров А.М.**, старший преподаватель, кафедра экономики, Экономический факультет, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

**Ткачева Е.В.**, инженер, Инженерная школа природных ресурсов Администрация Национальный исследовательский Томский политехнический университет.



UDK 339.13:546.86

## REVIEW OF CURRENT ANTIMONY INDUSTRY POSITION IN RUSSIA

Vitaly Yu. Khatkov<sup>1,2</sup>,  
V.Khatkov@adm.gazprom.ru

Grigory Yu. Boyarko<sup>1</sup>,  
gub@tpu.ru

Liudmila M. Bolsunovskaya<sup>1</sup>,  
bolsunovskl@tpu.ru

Artem M. Dibrov<sup>3</sup>,  
dibrov5@yandex.ru

Evgeniya V. Tkacheva<sup>1</sup>,  
belayaev@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> PJSC «Gazprom»,  
2, Pobedy square, St. Petersburg, 196143, Russia.

<sup>3</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is conditioned by the existence of contradiction between the export commodity flow of the extracted antimony raw materials and the total import dependence of Russia on commodity antimony products.

**Purpose:** to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of antimony raw materials in Russia, their prices (world and Russian), the resource base of antimony in Russia, and the national economic prospects of its extraction and processing.

**Methods:** statistical, graphical, and logical.

**Results.** As one of the world leaders in the extraction of antimony raw materials (up to 26 thousand tons/year), Russia practically does not process them and imports up to 1 thousand tons/year of metallic antimony and up to 2 thousand tons/year of antimony oxides. The export of antimony raw materials exceeds the import of marketable antimony products by 1,9 ... 8,4 times. Antimony in Russia is a strategic type of mineral product with a sufficient mineral resource base and at the same time a critical product due to the total dependence of imports on consumption. There is a need to create a national antimony processing industry producing antimony products with an extra surplus value. The current production of antimony raw materials (Sarylakh and Olimpiada deposits) many times overshadow the internal demand for antimony marketable products. It is possible to expand the production of antimony by bringing into operation the suspended (Sentachan, Zhipkoshka) and new deposits (Solonechenskoy), as well as increasing the mineral resource base through prospecting and exploration, primarily within the East Transbaikal and Sarylakh-Sentachan antimony provinces. It is possible to improve the technologies for processing antimony raw materials (energy saving, hydrometallurgy, biooxidation) in order to reduce operating costs and increase the environmental safety of the production of antimony products.

**Key words:**

Antimony raw materials, export of raw materials, import dependence, critical commodity product, raw-materials base, projects.

*This work is supported by the Russian Science Foundation under grant no. 22-28-01742.*

**REFERENCES**

1. Fedorchuk V.P. *Mineralnoe syre. Surma. Spravochnik* [Mineral raw materials. Antimony. Directory]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 34 p.
2. Pantaler M., Olthof S., Meerholz K., Lupascu D.C. Bismuth-antimony mixed double perovskites  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Br}_6$  in solar cells. *MRS Advances*, 2019, vol. 4, no. 64, pp. 3545–3552. DOI: 10.1557/adv.2019.404.
3. Ertl M., Wöb E., Knör G. Antimony porphyrins as red-light powered photocatalysts for solar fuel production from halide solutions in the presence of air. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2015, vol. 14, no. 10, pp. 1826–1830. DOI: 10.1039/c5pp00238a.
4. Jiang B., Liu X., Wang Q., Cui J., Jia B., Zhu Y., Feng J., Qiu Y., Gu M., Ge Z., He J. Realizing high-efficiency power generation in low-cost PbS-based thermoelectric materials. *Energy and Environmental Science*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 579–591. DOI: 10.1039/c9ee03410b.
5. Kumari M., Sharma Y.C. Effect of alternate layers of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  thin films on structural, optical and thermoelectric properties. *Chalcogenide Letters*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 59–67.
6. Cheng G.-Z., Liu S., Wang H.-L. Potential high-performance anode material for potassium ion batteries: Antimony. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, vol. 38, no. 2, pp. 170–180. DOI: 10.19894/j.issn.1000-0518.200243.
7. Lim D., Kim Y., Nam D., Hwang S., Shim S.E., Baeck S.-H. Influence of the Sb content in  $\text{Ti/SnO}_2$ -Sb electrodes on the electrocatalytic behaviour for the degradation of organic matter. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 197, pp. 1268–12741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.301.
8. Subba Rao A.N., Venkatarangaiah V.T. Preparation, characterization, and application of  $\text{Ti/TiO}_2$ -NTs/ $\text{Sb-SnO}_2$  electrode in photoelectrochemical treatment of industrial effluents under mild conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, no. 12, pp. 11480–114921. DOI: 10.1007/s11356-017-1179-4.

9. Klochko K. *Antimony [advance release] 2017. Minerals Yearbook*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2021. 11 p. Available at: [antimony2017 \(amazonaws.com\)](https://antimony2017.amazonaws.com) (accessed 10 January 2022).
10. Komin M.F., Klyucharev D.S., Volkova N.M. Antimony mineral resource base in Russia: problems and solutions. *Prospect and protection of mineral resources*, 2006, no. 9–10, pp. 26–29. In Rus.
11. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2017. 862 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802> (accessed 10 January 2022).
12. Martins F.F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – a circular economy approach. *Energy Reports*, 2020, no. 6, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.082.
13. Usova T.Yu., Butov V.A., Ivanov V.S. The state and prospects of development of the antimony mineral resource base. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 1998, no. 1, pp. 4–12. In Rus.
14. Basag S.P., Turan A., Yucel O. An investigation on antimony production by using Niederschlag process. *TMS Annual Meeting. 7<sup>th</sup> International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 2016. pp. 117–121. DOI: 10.1002/9781119274643.ch15.
15. Beznosov G.F., Nogovicin P.P., Sherstov V.A., Zhirkov E.P. Tendentsii dobychi i proizvodstva surmy v Respublike Sakha (Yakutiya) [Trends in antimony mining and production in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Gornaya promyshlennost*, 2005, no. 6 (64), pp. 59–62.
16. Batugina N.S., Katyuzhan L.L. Mineral resources in the economy of the Republic of Sakha (Yakutia). *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2009, no 5, pp. 51–58. In Rus.
17. Miheev G.V., Bogidaev S.A. The line of enrichment of oxide forms of antimony on the example of the «Zhiphosh» deposit. *Transbaikalian State University Journal*, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 36–43. In Rus.
18. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Rossii* [Federal state statistics service of Russia]. Available at: <https://gks.ru/emiss> (accessed 10 January 2022).
19. *Federalnaya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal customs service of Russia]. Available at: <http://stat.customs.gov.ru/analysis> (accessed 10 January 2022).
20. *TrendEconomy*. Available at: [dataexplorer \(trendconomy.ru\)](https://dataexplorer.trendeconomy.ru) (accessed 10 January 2022).
21. Shustrov A.Yu., Denisov V.V. Complex technology of lead and antimony production. *Tsvetnye metally*, 2004, no. 10, pp. 37–40. In Rus.
22. Komin M.F., Blinova T.A., Volkova N.M., Klyucharev D.S. Antimony mineral resource base – problems and ways of development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2011, no. 6, pp. 19–29. In Rus.
23. Sporyhina L.V., Orlova N.I., Bykhovskiy L.Z. Mineral resource base of non-ferrous metals: prospects for development and development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2013, no. 5, pp. 99–118. In Rus.
24. Sporyhina L.V., Akimova A.V., Danilin M.V., Remizova L.I. The state of the mineral resource base of non-ferrous metals (tin, tungsten, molybdenum, antimony and aluminum raw materials). *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2017, no. 4, pp. 19–27. In Rus.
25. Pavlenko Yu.V., Polyakov O.A. East Trans-Baikalian antimony province. *Bulletin of the Chita State University*, 2010, no. 9 (66), pp. 7–84. In Rus.
26. Pavlenko Yu.V. Geological and technological forecast: Kochkovskoe gold-antimony deposit. *Transbaikalian State University Journal*, 2012, no. 12 (91), pp. 129–139. In Rus.
27. Evdokimov S.I., Daciev M.S., Podkovyrov I.Yu. Development of a new scheme and method of ore flotation of the Olympiadinsky deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2014, no. 1, pp. 3–11. In Rus.
28. Polyakov O.A., Pavlenko Yu.V. Improvement of ore preparation processes of the main types of antimony deposits in Eastern Transbaikalia. *Mining informational and analytical bulletin*, 2012, no. S1-1, pp. 243–257. In Rus.
29. Polyakov O.A. Prospects for the development of antimony ores of Eastern Transbaikalia using methods of radiometric ore preparation and heap leaching of a valuable component from tailings. *Mining informational and analytical bulletin*, 2014, no. S, pp. 137–143.
30. Myzenkov F.A., Tarasov A.V. Development and creation of modern metallurgical technology for antimony production with gold recovery from domestic gold-antimony concentrates in Russia. *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*. San Diego, California, 2006. No. 4, pp. 121–128, code 68886.
31. Padilla R., Chambi L.C., Ruiz M.C. Antimony production by carbothermic reduction of stibnite in the presence of lime. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 5–13. DOI: 10.2298/JMMB130604003P.
32. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Melting of crude antimony in the low-tonnage production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novokuznetsk: 20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy*, 2018, vol. 411, no. 119, article no. 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012021.
33. Solozhenkin P.M., Rynnikova M.V., Kushakov Sh.T., Kovalev V.N., Solozhenkin O.I. *Sposob pererabotki zolotosoderzhashchego surmyanogo kontsentrata i liniya dlya ego osushchestvleniya* [A method for processing gold-containing antimony concentrate and a line for its implementation]. Patent RF no. 2692135 C1, 2019.
34. Yang J.-G., Tang C.-B., Chen Y.-M., Tang M.-T. Separation of antimony from a stibnite concentrate through a low-temperature smelting process to eliminate SO<sub>2</sub> emission. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2011, vol. 42, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.1007/s11663-010-9453-6.
35. Zekavat M., Yoozbashizadeh H., Khodaei A. Leaching of antimony from stibnite ore in KOH solution for sodium pyroantimonate production: systematic optimization and kinetic study. *JOM*, 2021, vol. 73, no. 3, pp. 903–912. DOI: 10.1007/s11837-020-04531-8.
36. Golovkin D.I., Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboychenko S.S. Issledovanie i otsenka vozmozhnosti primeneniya razlichnykh gidrometallurgicheskikh tekhnologiy po izvlecheniyu surmy iz flotatsionnykh kontsentratorov PAO «Polyus» [Research and evaluation of the possibility of using various hydrometallurgical technologies for the extraction of antimony from flotation concentrates of PJSC Polyus]. *Metallurgiya tsvetnykh metalloiv. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Metallurgy of non-ferrous metals. Materials of the IV International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2018. pp. 151–155.
37. Arulmani S.R.B., Dai J., Li H., Chen Z., Zhang H., Yan J., Xiao T., Sun W. Efficient reduction of antimony by sulfate-reducer enriched bio-cathode with hydrogen production in a microbial electrolysis cell. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 77420, article no. 145733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.
38. Bulaev A.G., Pershina E.V., Ukrainsev I.V. The state of development of modern biohydrometallurgical technologies and prospects for their use in Russia. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 10 (886), pp. 29–35. In Rus. DOI: 145733. 10.17580/tsm.2016.10.04.
39. Sovmen V.K., Guskov V.N., Bely A.V., Kuzina Z.P., Drozdov S.V., Savushkina S.I., Mayorov A.M., Zakrevskiy M.P. *Pererabotka zolotonosnykh rud s primeneniem bakterialnogo okisleniya v usloviyakh Kravnego Severa* [Processing of gold-bearing ores using bacterial oxidation in the conditions of the Far North]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 144 p.
40. Fei J.-C., Min X.-B., Wang Z.-X., Pang Z.-H., Liang Y.-J., Ke Y. Health and ecological risk assessment of heavy metals pollution in an antimony mining region: a case study from South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 35, pp. 27573–275861. DOI: 10.1007/s11356-017-0310-x.
41. Négrel P., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., Demetriades A., Sadeghi M., Albanese S., Andersson M., Baritz R., Batista M.J., Flem B., Bellan A. GEMAS: Geochemical background and mineral potential of emerging tech-critical elements in Europe revealed from low-sampling density geochemical mapping. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 111, article no. 104425. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104425.

Received: 2 February 2022.

**Information about the authors**

**Vitaly Yu. Khatkov**, department head, Gazprom PJSC; post graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Grigory Yu. Boyarko**, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Liudmila M. Bolsunovskaya**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Artem M. Dibrov**, senior lecturer, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Evgeniya V. Tkacheva**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.