

ISSN 0869-5997

**И РУДЫ**   
**МЕТАЛЛЫ**  
**ORES AND METALS**

**1/2023**

# РУДЫ И МЕТАЛЛЫ 1/2023

## Учредитель

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»  
Роснедра Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Свидетельство о регистрации средства массовой информации № 01919 от 21 декабря 1992 г.

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включён в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук»

Москва, ЦНИГРИ, 2023

Журнал издаётся при поддержке Международной ассоциации по генезису рудных месторождений



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### **Черных Александр Иванович**

главный редактор  
генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Иванов Анатолий Иннокентьевич**

заместитель главного редактора  
научный руководитель ФГБУ «ЦНИГРИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Пирайно Франко**

заместитель главного редактора  
по международным публикациям  
профессор, Университет Западной Австралии,  
г. Перт, Австралия

### **Наумов Евгений Анатольевич**

заместитель главного редактора по общим вопросам  
заместитель генерального директора  
по научной работе ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Жаркова Вера Сергеевна**

заместитель главного редактора  
по редакционно-издательской деятельности  
заместитель начальника редакционно-оформительского  
отдела ФГБУ «ЦНИГРИ»

### **Аракчеев Дмитрий Борисович**

генеральный директор ФГБУ «Росгеолфонд»  
кандидат технических наук

### **Волчков Алексей Гордеевич**

заведующий научно-методическим отделением ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Вымазалова Анна**

Чешская геологическая служба, г. Прага, Чешская Республика

### **Голубев Юрий Конкордьевич**

заведующий отделом алмазов ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Горячев Николай Анатольевич**

главный научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН  
доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН

### **Дементьев Владимир Евгеньевич**

генеральный директор АО «Иргиредмет»  
кандидат технических наук

### **Звездов Вадим Станиславович**

заведующий отделом  
металлогении ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Калинин Юрий Александрович**

главный научный сотрудник ИГМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кременецкий Александр Александрович**

советник генерального директора ФГБУ «ИМГРЭ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кряжев Сергей Гаврилович**

заведующий отделом минералогии  
и изотопной геохимии ФГБУ «ЦНИГРИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Кузнецов Владимир Вениаминович**

заведующий отделом цветных  
металлов ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Мишенин Сергей Григорьевич**

заведующий отделом геофизики ФГБУ «ЦНИГРИ»  
кандидат геолого-минералогических наук

### **Похиленко Николай Петрович**

научный руководитель ИГМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук,  
академик РАН

### **Проскурнин Василий Фёдорович**

заведующий отделом региональной геологии  
и полезных ископаемых  
Восточных районов России ФГБУ «ВСЕГЕИ»  
доктор геолого-минералогических наук

### **Зельтманн Реймар**

профессор, Музей естественной истории,  
г. Лондон, Великобритания

### **Толстов Александр Васильевич**

директор НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)  
доктор геолого-минералогических наук

### **Фридовский Валерий Юрьевич**

директор ИГАБМ СО РАН  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор

# ORES AND METALS 1/2023

Founded by FSBI «Central research institute of geological prospecting for base and precious metals» (TsNIGRI)  
Federal Agency for Subsoil Use

Mass media registration certificate No 01919 (21.12.1992)

Published since 1992

Moscow, TsNIGRI, 2023

The Journal is published with the support of the IAGOD  
(International association on the genesis of ore deposits)



## EDITORIAL BOARD

### **Alexander I. Chernykh**

Editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, General Director  
PhD

### **Anatoly I. Ivanov**

Deputy editor-in-chief FSBI TsNIGRI, Scientific Director  
PhD

### **Franco Pirajno**

Deputy editor-in-chief for international publications  
Dr., Adjunct Professor at Centre for Exploration Targeting,  
University of Western Australia

### **Evgeniy A. Naumov**

Deputy Editor-in-chief  
FSBI TsNIGRI, Deputy Director for Research  
PhD

### **Vera S. Zharkova**

Deputy editor-in-chief for editorial and publishing activities  
Deputy head of editorial and design department, FSBI TsNIGRI

### **Dmitry B. Arakcheev**

FSBI Rosgeolfond, General Director  
PhD

### **Alexey G. Volchkov**

Head of scientific and methodical department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Anna Vymazalova**

Dr., Czech Geological Survey, Czech Republic

### **Yuri K. Golubev**

Head of diamond department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay A. Goryachev**

Chief researcher, NEISRI FEB RAS  
Corr. Member of RAS

### **Vladimir E. Dementiev**

General Director, JSC Irgiredmet  
PhD

### **Vadim S. Zvezdov**

Head of metallogeny department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Yuri A. Kalinin**

Chief researcher, IGM SB RAS  
PhD

### **Alexander A. Kremenetsky**

Advisor to General Director, FSBI IMGRE  
PhD

### **Sergey G. Kryazhev**

Head of mineralogy and isotope geochemistry  
department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Vladimir V. Kuznetsov**

Head of base metals department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Sergey G. Mishenin**

Head of geophysics department, FSBI TsNIGRI  
PhD

### **Nikolay P. Pokhilenko**

Scientific Director, IGM SB RAS  
Academician of RAS

### **Vasily F. Proskurin**

Head of the eastern Russia regional geology  
and minerals department, FSBI VSEGEI  
PhD

### **Reimar Seltmann**

Dr., Professor, Head of CERCAMS  
(Centre for Russian and Central EurAsian  
Mineral Studies),  
Natural History Museum, London

### **Alexander V. Tolstov**

Director, JSC ALROSA (PJSC)  
PhD

### **Valery Yu. Fridovsky**

Director, IGABM SB RAS  
PhD, Professor



**С Днём Геолога!**



# СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

**Егорова И. В.**

Перспективы мирового рынка  
природного урана

06

## SUBSOIL USE

**Egorova I. V.**

Prospects for the natural  
uranium world market

## СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Владимирцева О. В.,  
Коноплев В. А., Березнев М. В.**

Состав и золотоносность  
неогеновых отложений  
среднего течения р. Селенных  
(Республика Саха (Якутия))

17

## GEOLOGY OF THE ORE DEPOSITS

**Vladimirtseva O. V.,  
Konoplev V. A., Bereznev M. V.**

Composition and gold-bearing potential  
of Neogene deposits in the middle  
reaches of the Selennyakh river,  
Republic of Sakha (Yakutia)

**Сажина Т. И., Дамдинова Л. Б.,  
Дамдинов Б. Б.**

Минеральный состав и условия  
формирования кварц-берилловой  
минерализации Первомайского  
молибденового месторождения  
(Джидинское рудное поле,  
Юго-Западное Забайкалье)

25

**Sazhina T. I., Damdinova L. B.,  
Damdinov B. B.**

The mineral composition  
and formation conditions of quartz-beryl  
mineralization of the Pervomaiskoe  
molybdenum deposit,  
Dzhida ore field,  
Southwestern Transbaikalian region

**Степанов В. А.**

О золотоносности  
сурьмяного и ртутного  
оруденения Приамурья

40

**Stepanov V. A.**

On the gold content in the antimony  
and mercury mineralization  
in Priamurye

## КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

**Веселовский А. А., Лагуткин С. В.**

Безотходная переработка отвальных  
никелевых шлаков

52

## COMPLEX USE OF MINERAL RAW MATERIALS

**Veselovsky A. A., Lagutkin S. V.**

Waste-free processing  
of waste nickel slags



## Перспективы мирового рынка природного урана

Егорова И. В.

Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Рассматриваются различные сценарии развития мировой урановой отрасли, высказывается предположение о вероятности реализации сценария быстрого роста по версии МАГАТЭ, предполагающего ежегодные темпы роста суммарной мощности АЭС в 2–2,5 %. На базе этого прогноза даётся оценка возможностей мировой сырьевой базы урана по обеспечению потребностей АЭС в ядерном топливе. Показано, что только восстановление производства на законсервированных добывающих предприятиях, рост выпуска продукции на действующих рудниках и вторичные источники урана гарантируют достаточное количество сырья для обеспечения спроса на уран в ближайшее десятилетие. Более того, дефицит сырья для ядерного топлива в ближайшее время может вновь смениться его избытком. Однако к концу текущего или в начале следующего десятилетия в связи с истощением ресурсной базы некоторых действующих рудников, в том числе Фор-Майл и Сигар-Лейк в Канаде, мощности действующих добывающих предприятий окажутся недостаточными для обеспечения потребностей АЭС в топливе. Может вновь возникнуть дефицит урана, который в дальнейшем будет быстрыми темпами нарастать. Это будет означать новый виток роста цен на природный уран, что, в свою очередь, будет стимулировать наращивание добычи урана во всём мире и расширит перспективы реализации проектов освоения новых урановых месторождений в России, в первую очередь Аргунского и Жерлового в Стрельцовском урановорудном районе.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, ядерное топливо, потребность, уран, цена, добыча, прогноз.

Для цитирования: Егорова И. В. Перспективы мирового рынка природного урана. Руды и металлы. 2023. № 1. С. 6–16. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10001.

---

## Prospects for the natural uranium world market

Egorova I. V.

MGRI-RGGRU, Moscow, Russia

**Abstract.** Various scenarios for development of the world uranium industry are considered, and an assumption is made of a high probability of the rapid growth scenario, according to the IAEA, which assumes an annual growth rate of the total nuclear power plants (NPPs) capacity of 2–2.5%. Based on this forecast, an assessment is made of capabilities of the uranium world mineral base to meet the NPPs needs in the nuclear fuel. It is demonstrated that only the restoration of production at temporary closed down mining enterprises, the growth of output at existing mines, and using secondary sources of uranium guarantee a sufficient amount of the raw materials to meet the demand for uranium in the next decade. Moreover, the shortage of raw materials for nuclear fuel in the near future may again be replaced by its excess. However, by the end of the current or early next decade, due to the depletion of the resource base of some operating mines, including Four Mile and Cigar Lake in Canada, the capacities of mining enterprises will be insufficient to meet the fuel needs of NPPs. A shortage of uranium may appear again, that will grow rapidly in the future. This will mean a new round of growth in prices for natural uranium, which, in turn, will stimulate an increase in uranium production throughout the world and will expand the prospects for the implementation of projects for the development of new uranium deposits in Russia, primarily Argunskoe and Zherlovoe in the Streltsovskoe uranium ore region.

**Key words:** nuclear power plant, nuclear fuel, demand, uranium, price, production, forecast.

For citation: Egorova I. V. Prospects for the natural uranium world market. Ores and metals, 2023, № 1, pp. 6–16. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10001.



Мировая атомная энергетика периодически испытывает кризисы, связанные, как правило, с катастрофами на действующих атомных электростанциях. Крупнейшими среди них признаны авария на втором энергоблоке АЭС «Три-Майл-Айленд» в штате Пенсильвания (США) в марте 1979 г., катастрофа на Чернобыльской АЭС в 1986 г. и авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 г.

Авария в Пенсильвании послужила началом длительного периода сокращения цен на уран (рис. 1), но не привела к замедлению строительства новых электростанций и тем более к остановке действующих (рис. 2). Темпы ввода новых установок сначала резко замедлились, но очень быстро вернулись к прежнему уровню, а затем и выросли.

Влияние крупнейшей на сегодняшний день катастрофы на Чернобыльской АЭС оказалось принципиально иным: темпы введения в эксплуатацию мощностей атомной энергетики после 1986 г. резко сократились, при этом в течение четырёх последующих лет быстрыми темпами росло число остановленных энергоблоков. В результате мощность энергогенерации на АЭС в 1991 г. оказалась минимальной за 20-летний период, то есть фактически за всё время существования атомной энергетики. И это оказалось началом следующего

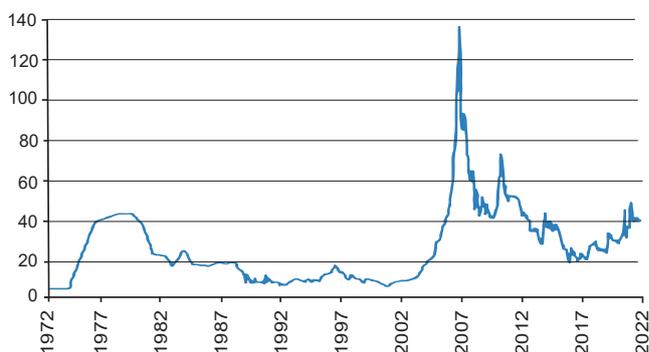


Рис. 1. Динамика цен на урановый концентрат в 1990–2022 гг., долл. за фунт  $U_3O_8$  [17, с дополнениями]

Fig. 1. Dynamics of prices for uranium concentrate in 1990–2022, dollars per pound  $U_3O_8$  [17 with additions]

20-летнего периода – упадка отрасли, когда совокупная производительность АЭС в мире, невзирая на отдельные всплески, находилась на весьма низком уровне, число вновь построенных энергоблоков компенсировалось количеством остановленных, вследствие чего число атомных энергоустановок в мире практически перестало расти.

По времени это совпало с бурным развитием нефтяной, а затем газовой промышленности в мире и началом периода стабильных и сравнительно низких цен на нефть, когда

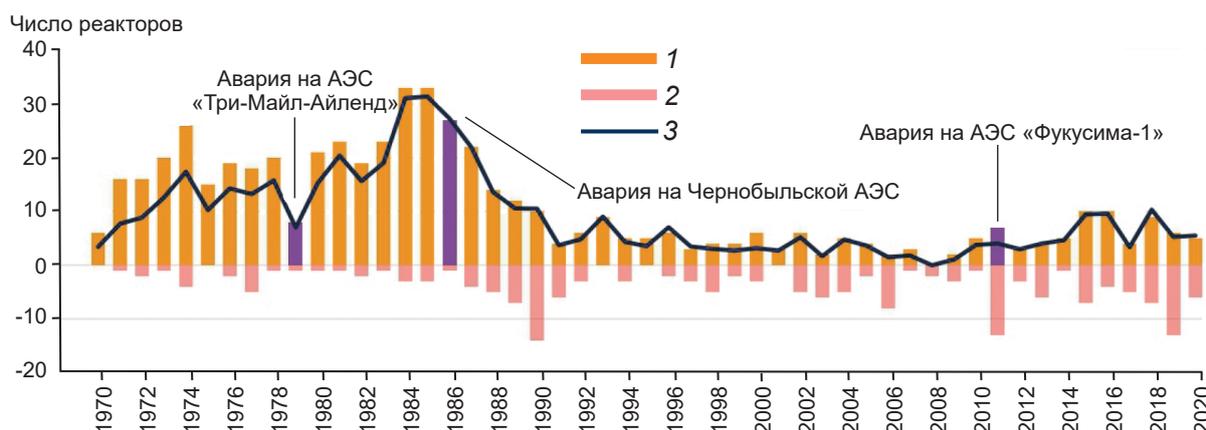


Рис. 2. Динамика ввода в строй и остановки атомных реакторов в мире [15]:

число реакторов: 1 – впервые подключённых, 2 – остановленных; 3 – объём введённых мощностей

Fig. 2 Dynamics of commissioning and shutdown of nuclear reactors in the world [15]

number of reactors: 1 – launched for the first time, 2 – shut down; 3 – the volume of launched capacities



казалось, что нет необходимости развивать дорогую и небезопасную атомную энергетику на фоне обилия на рынке достаточно дешёвых углеводородных энергоносителей. Некоторые государства по этой причине приняли решение отказаться от развития атомной отрасли. Так, в Италии в 1990 г. были закрыты все четыре действующих АЭС.

Всё это оказало мощную поддержку тренду снижения цен на сырьё для атомных электростанций, сформировавшемуся уже после аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», и вскоре отрасль вступила в длительный период крайне низких цен на уран, длившийся в течение полутора десятков лет. Цены в это время в среднем не превышали 20 долл. США за тонну концентрата природного урана, что крайне ограничивало возможности его производства. В рыночных условиях добыча этого сырья оказывалась рентабельной лишь на единичных объектах, в основном на канадских месторождениях «несогласия» с их исключительно богатыми рудами.

В первом десятилетии XXI в. ситуация в атомной отрасли начала меняться. Этому, вероятно, способствовали резкие, невиданные доселе всплески цен на нефть, а также появившиеся в это время многочисленные высказывания экспертов об истощении запасов углеводородов в мире. Однако тенденция ускорения развития отрасли практически в самом начале была нарушена аварией на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г., которая вновь стала причиной остановки в последующие годы действующих реакторов в целом ряде стран. Правительства Германии, Бельгии, Швейцарии и некоторых других стран заявили о намерении полностью отказаться от использования атомной энергии и начали его осуществлять: в Германии в середине 2022 г. из 17 действовавших в 2011 г. продолжали работу только три реактора, и планировалась их полная остановка к концу текущего года [4]. В Бельгии в сентябре 2022 г. остановлен первый из семи действующих реакторов, являющихся частью атомной электростанции Дул, расположенной в порту Антверпена [2].

Однако события 2022 г. поколебали позиции европейских сторонников отказа от атом-

ной энергии. Резкое сокращение поставок российского газа поставило под угрозу энергетическую безопасность региона и привело к катастрофическому подорожанию газообразного топлива. В то же время Франция, где высока доля атомной генерации в энергобалансе, оказалась в несколько лучшем положении. Под влиянием этого решимость противников ядерной энергетики была поколеблена, свидетельством чему явилось, например, решение Бундестага Германии о продлении работы сначала двух, а затем и всех трёх оставшихся в стране реакторов до 15 апреля 2023 г. [3]. Объявлено также, что Бельгия в связи с текущим энергетическим кризисом отложит отказ от атомной энергетики на 10 лет [10].

Изменению отношения к атомной энергогенерации способствовала и активизация разработки новых технологий по обеспечению пассивной безопасности реакторов поколения III+, которую стимулировала авария на Фукусиме. Закономерно, что на этом фоне в мире возникла дискуссия о том, считать ли атомную энергию «зелёной». Первым её результатом явилось то, что власти Канады включили малые модульные реакторы в число экологически чистых энергетических технологий, признав таким образом ядерную энергию «зелёной» наравне с другими низкоуглеродными технологиями [6]. По-видимому, это только начало, поскольку дискуссия продолжается.

Всё это, как представляется, делает перспективы ядерной энергетики в мире более благоприятными, тем более что наибольший интерес к развитию этой отрасли проявляет не столько Европа, сколько азиатские страны, прежде всего Китай и Индия. По последним данным [18], в Китае в 2018 г. из 46 действующих реакторов десять были вновь построенными, в стадии строительства и проектирования находились ещё 11 установок, а по состоянию на 1 января 2022 г. действовали уже 53 реактора, число блоков, находящихся в стадии строительства, достигло 13 [16]. Причём темпы увеличения мощности АЭС предполагается наращивать – доля атомной энергетики в энергобалансе страны к 2050 г. должна составить 21 % (сейчас она составляет примерно 4 %) [7]. Это связано прежде всего с быст-



рым ростом спроса на электроэнергию в стране и тем, что многочисленные действующие угольные электростанции вызывают нарастающие проблемы с охраной окружающей среды.

Сопоставимую активность проявляет Индия, где в 2018 г. в стадии строительства находились семь установок. Долгосрочная стратегия развития Индии предусматривает трёхкратное увеличение мощностей атомной энергетики к 2032 г., а также изучение возможности развёртывания малых модульных ядерных реакторов [9].

Пять новых реакторов сооружалось в Южной Корее, четыре – в ОАЭ, по два в Пакистане и Бангладеш [18]. Всего в мире в 2018 г. строилось 55 атомных энергоустановок.

Таким образом, ожидается, что в ближайшие годы как количество действующих реакторов, так и их суммарная мощность будут увеличиваться. Тем не менее в 2020 г. экспертами МАГАТЭ в качестве одного из сценариев рассматривалось сокращение совокупной мощности АЭС к 2040 г. до 354 ГВт с 396 ГВт. Другой сценарий предполагает рост этого показателя до 626 ГВт в 2040 г. Соответственно, прогноз потребности в уране варьирует от 56 640 т в год при сценарии падения спроса до 100 224 т, если будет реализован сценарий его роста [18].

Необходимо подчеркнуть, что в случае осуществления сценария падения спроса недостатка сырья для обеспечения АЭС ядерным топливом, скорее всего, не возникнет. В 2020 г., когда добыча урана из недр находилась на самом низком уровне за прошедшее десятилетие, составив менее 47,5 тыс. т, дефицит сырья с учётом поставок из вторичных источников, оцениваемых примерно в 10 тыс. т [19], должен был составить всего около 1,5 тыс. т, а в 2021 г. сократился до 750 т. В случае дальнейшего сокращения спроса на ядерное топливо рынок урана будет находиться в равновесии уже при сегодняшнем уровне добычи урана из недр. В этом случае возобновления производства на простаивающих сегодня рудниках не понадобится, не говоря уже о строительстве новых предприятий.

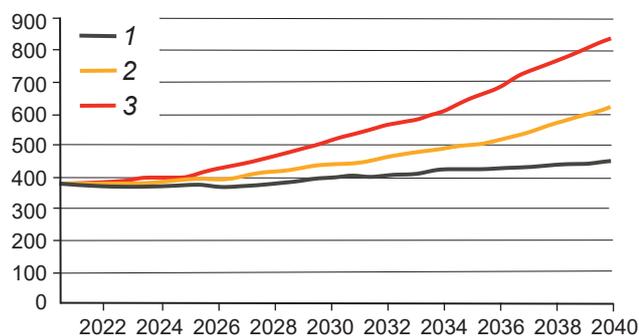
Реализация такого сценария представляется нам маловероятной на фоне значительного числа строящихся сегодня новых энергоблоков, а также медленного, но отчётливого тренда в сторону более конструктивного отношения к ядерной энергии в мире.

Сценарий МАГАТЭ, предполагающий быстрое развитие отрасли, предусматривает, что в 2040 г. мировая потребность ядерных реакторов в уране несколько превысит 100 тыс. т в год. В этом случае уже в 2020 г. должен был возникнуть дефицит сырья в объёме около 5,5 тыс. т, что косвенно подтверждается сменой в 2020 г. на урановом рынке тенденции падения цен на сырьё на противоположную [18].

Всемирная ядерная ассоциация (WNA) даёт гораздо более оптимистические прогнозы: в соответствии со сценарием низких темпов роста суммарная мощность АЭС в мире к 2040 г. должна вырасти до 420–440 ГВт, базовый сценарий предполагает её увеличение до 600–610 ГВт, в случае реализации сценария быстрого роста общая мощность может достигнуть 830–840 ГВт (рис. 3). В соответствии с предполагаемыми темпами роста мощностей АЭС будет расти и потребность в поставках урана, которая может составить к 2040 г. при реализации сценария медленно-го развития около 80 тыс. т, базового сценария – 110–115 тыс. т, более 150 тыс. т при высоких темпах роста [19]. Отметим, что базовый сценарий, предполагаемый WNA, сопоставим со сценарием быстрого роста МАГАТЭ; именно он был использован нами для сопоставления с ожидаемыми уровнями добычи.

В связи с этим возникает вопрос – может ли мировая уранодобывающая промышленность обеспечить требуемые количества сырья для АЭС?

В первом приближении ответ на этот вопрос содержится в последнем издании Красной книги МАГАТЭ, и он положителен. Ресурсная база урана даже без учёта возможных открытий новых месторождений достаточно велика, чтобы обеспечить любой возможный рост спроса на это сырьё. Однако доля рентабельных для эксплуатации запасов урана в недрах не так значительна, и она заметно



**Рис. 3. Сценарии роста суммарной мощности АЭС до 2040 г. по версии Всемирной ядерной ассоциации, ГВт [19]:**

1 – медленный (рост на 1 % в год); 2 – базовый (рост на 2,6 % в год); 3 – быстрый (рост на 4,3 % в год)

**Fig. 3. Scenarios for the growth of the total capacity of nuclear power plants until 2040, according to the World Nuclear Association, GW [19]:**

1 – slow (growth by 1% per year); 2 – basic (growth by 2.6% per year); 3 – fast (growth by 4.3% per year)

варьирует от региона к региону. Запасами, себестоимость добычи которых не превышает 80 долл. за килограмм (30 долл. за фунт  $U_3O_8$ ), располагают только четыре страны [12].

Прежде всего это Канада с её уникальными месторождениями «несогласия» с богатейшими рудами. Из них эксплуатируется в настоящее время только один объект, Сигар-Лейк, причём не на полную мощность (4,7 тыс. т U в 2021 г.) [18].

Месторождение Мак-Артур-Ривер законсервировано в ожидании более высоких цен на уран. Запуск производства на нём и вывод рудника на Сигар-Лейк на полную мощность могут дополнительно обеспечить поставки в объёме более 10 тыс. т металла.

На казахстанских объектах добыча в 2016–2020 гг. сокращалась, что было реакцией на низкий уровень цен, к концу периода она составила немногим меньше 80 % показателя 2016 г. Однако уже в 2021 г. было добыто почти 22 тыс. т, на 12 % больше, чем годом ранее, а в 2025 г. планируется произвести 25 тыс. т. Однако в дальнейшем компания «Казатомпром» планирует сокращать добычу урана, в 2040 г. она может составить только 5 тыс. т. [12].

На месторождении Олимпик-Дам в Австралии уран добывается как попутный продукт, его производство мало зависит от цен. В то же время более половины урана Австралии извлекается в настоящее время экономичным способом подземного выщелачивания (СПВ) на месторождении Фор-Майл. Суммарно эти объекты в 2021 г. дали лишь около 4200 т урана, что составило только две трети производства предыдущего года. Следовательно, в случае разворота ценового тренда действующие горнодобывающие предприятия способны дать дополнительно порядка 2 тыс. т урана.

Себестоимость добычи урана способом подземного выщелачивания на песчаных месторождениях Узбекистана в 2019 г. составляла 62,5 долл. за кг [13]. Однако сведения об уровне производства в этой стране ограничены и базируются преимущественно на экспертных оценках, поэтому роль Узбекистана в возможном наращивании мировых поставок урана неясна и в данной работе не учитывается.

Таким образом, только возобновление на полную мощность добычи на эксплуатируемых месторождениях, себестоимость добычи на которых не превышает 80 долл. за кг, может обеспечить дополнительно 15–17 тыс. т U ежегодно.

В настоящее время это представляется весьма вероятным, поскольку цены находятся на довольно высоком уровне, хотя и не проявляют отчётливой тенденции к росту. С мая по ноябрь 2022 г. котировки урана колеблются в узком коридоре 46,5–53 долл. за фунт  $U_3O_8$ , в среднем составляя около 50 долл. за фунт  $U_3O_8$ , что соответствует примерно 133 долл. за килограмм урана.

Есть также ряд стран, где добыча урана ведётся независимо от цен на него, так как поддерживается государством. Это прежде всего Намибия, где продолжается разработка месторождения Россинг и, вопреки укрепившемуся в последние годы тренду, растёт добыча на месторождении Хусаб. Оба предприятия в значительной мере принадлежат государственным компаниям. Владелец 69 % компании Rossing Uranium Limited является государственная корпорация China National Uranium Corporation Limited (CNNC), рудник Хусаб



эксплуатируется совместным предприятием двух государственных компаний – китайской Guangdong Nuclear Power Company (CGNPC) и намибийской Epangelo Mining (Pty) Ltd.

В Нигере компания Orano Mining продолжает разработку месторождения в песчаниках Сомаир (Арлит), в том числе благодаря поддержке нигерийского правительства, поскольку уран составляет около трети экспорта этой страны.

Количество урана, извлекаемого из недр Китая и Индии, точно неизвестно из-за информационной закрытости этих стран, но предполагается, что по крайней мере в ближайшие пять лет добыча здесь сохранится на сегодняшнем уровне.

Суммируя эти данные, можно с определённой степенью уверенности прогнозировать количество добываемого из недр сырья и сопоставить его с ожидаемым уровнем спроса на него (рис. 4, 5).

График показывает, что текущий дефицит урана, возникший благодаря сокращению производства и обеспечивший рост цен на уран, уже в самое ближайшее время может быть компенсирован возобновлением работы остановленных предприятий, что вновь приведёт к превышению предложения над спросом и, следовательно, к очередному витку снижения цен. Величина этого превышения будет зависеть от темпов восстановления добычи урана в мире, но уровень цен на сегодняшний день таков, что вновь запущены могут быть не только рудники с себестоимостью добычи менее 80 долл. за тонну, но и менее эффективные предприятия, например, Кроу-Батт и Смит-Ренч в США, Лангер-Хейнрих и Треккопье в Намибии. Уже летом текущего года компания Boss Energy Limited объявила о начале работ по запуску производства на месторождении Хонемун в Австралии, начало добычи на нём запланировано на четвёртый квартал 2023 г. [1]. Это означает, что поставки сырья на рынок могут оказаться ещё больше, а очередной период снижения цен – более долгим. Длительность его будет также зависеть от того, насколько близким к действительности окажется прогноз наращивания

суммарных мощностей АЭС в мире, иначе говоря, насколько быстрыми темпами будет расти спрос на ядерное топливо.

Тем не менее представляется, что период перепроизводства урана на рынке едва ли будет длительным, особенно если крупнейший его производитель, Казахстан, будет выполнять свою программу снижения добычи, которая должна начать реализовываться в ближайшее время [12]. В этом случае уже в 2026 г. на рынке может вновь возникнуть дефицит урана, который в дальнейшем будет быстрыми темпами нарастать не только в связи со снижением производства в Казахстане, но и с возможным прекращением добычи из-за истощения ресурсной базы некоторых действующих рудников, в том числе важнейших, таких как Фор-Майл в 2031 г. и Сигар-Лейк в 2034 г.

Принципиально схожий прогноз был опубликован в 2021 г. в статье А. В. Тарханова и Е. П. Бугриевой [12] с той только разницей, что период перепроизводства по их данным должен закончиться в 2030 г. (см. рис. 5).

Возникновение дефицита активизирует реализацию имеющихся проектов освоения новых месторождений урана. Среди них есть несколько предприятий, находящихся на продвинутых стадиях развития. Это прежде всего два проекта разработки месторождений урана в песчаниках в Австралии – Йилирри (Yeelirrie), развиваемый компанией Cameco.com, и Имурарен (Imouraren) компании Orano Mining; после вывода на полную мощность они суммарно могут обеспечить дополнительно до 9 тыс. т урана ежегодно.

На разных стадиях развития находятся ещё около 40 проектов освоения новых урановых месторождений различных типов. Наибольшее их число локализовано в Канаде и Австралии, однако в случае успешной реализации в число заметных производителей природного урана может войти целый ряд стран: Бразилия, Монголия, Танзания, Малави, Ботсвана и др. Сроки ввода в строй предприятий по большей части не определены, но доступные данные о планируемой мощности новых рудников по добычке позволяют ожидать, что в случае благоприятной конъюнктуры рынка к

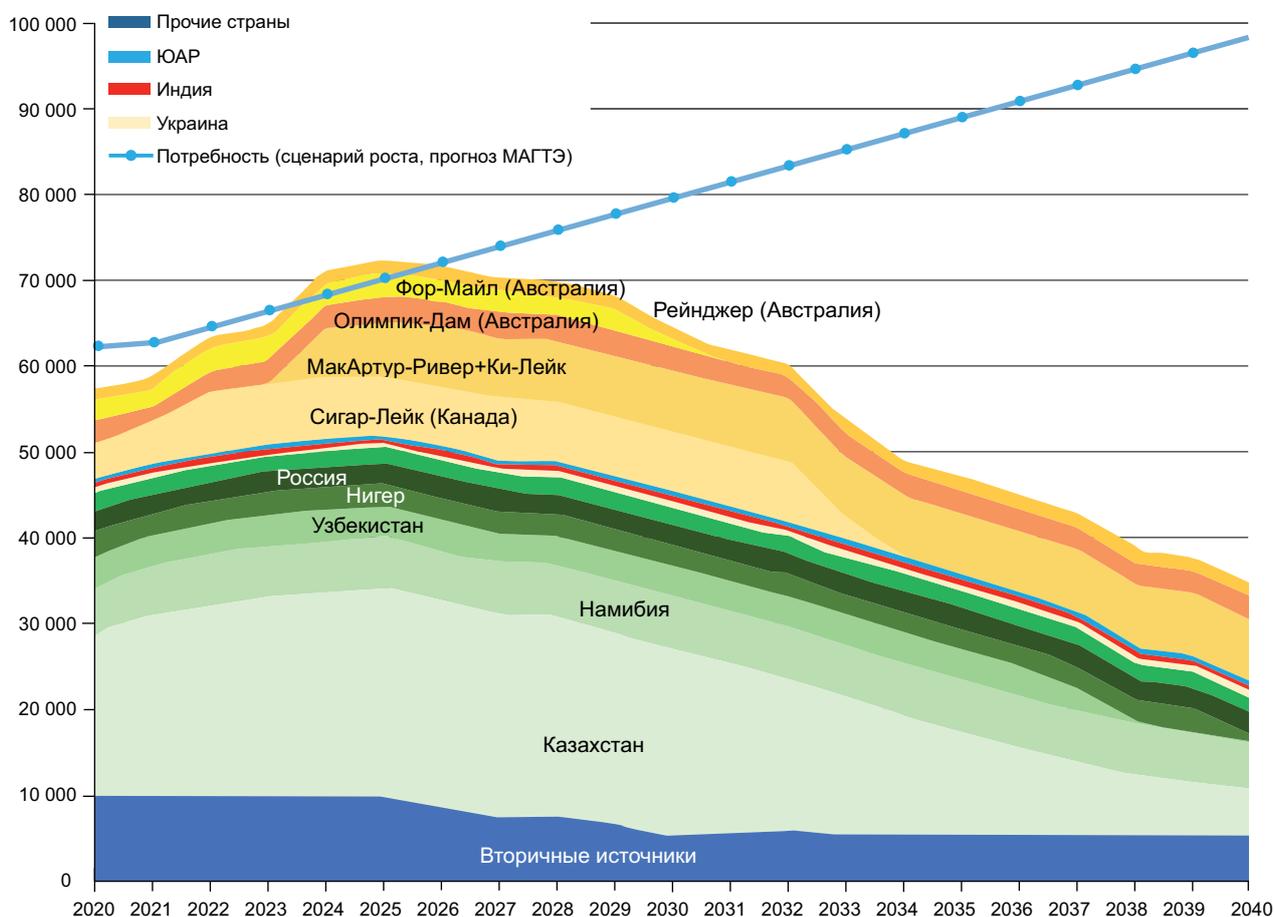


Рис. 4. Прогноз добычи урана в 2020–2040 гг. при условии, что цены на урановый концентрат не превысят 30 долл. за фунт  $U_3O_8$  (себестоимость добычи не более 80 долл. за кг), т U:

1 – прочие страны; 2 – ЮАР; 3 – Индия; 4 – Украина; 5 – потребность (сценарий роста, прогноз МАГТЭ)

Fig. 4. Forecast of uranium production in 2020–2040 provided that prices for uranium concentrate will not exceed \$30 per pound  $U_3O_8$  (mining cost no more than \$80 per kg), t U:

1 – other countries; 2 – South Africa; 3 – India; 4 – Ukraine; 5 – need (growth scenario, IAEA forecast)

2035 г. они смогут суммарно произвести дополнительно более 40 тыс. т урана [18], что позволило бы полностью удовлетворить потребности атомной энергетики в сырье. Несомненно, в полной мере такой сценарий реализован не будет, прежде всего потому, что большинство осваиваемых месторождений характеризуются сравнительно низкими содержаниями урана и, соответственно, себестоимостью добычи выше 80 долл. за кг U, что требует высоких цен для экономически эффективного производства.

Тем не менее весьма вероятно, что, хотя атомную отрасль в ближайшие годы может ожидать очередной виток падения цен, к концу десятилетия урановый рынок может стать рынком продавца, а уранодобывающая промышленность получит мощный стимул развития.

Это утверждение справедливо и для осваиваемых урановых объектов России. Среди них наибольшие перспективы ввода в эксплуатацию в ближайшие годы имеют Аргунское и Жерловое молибден-урановые месторождения

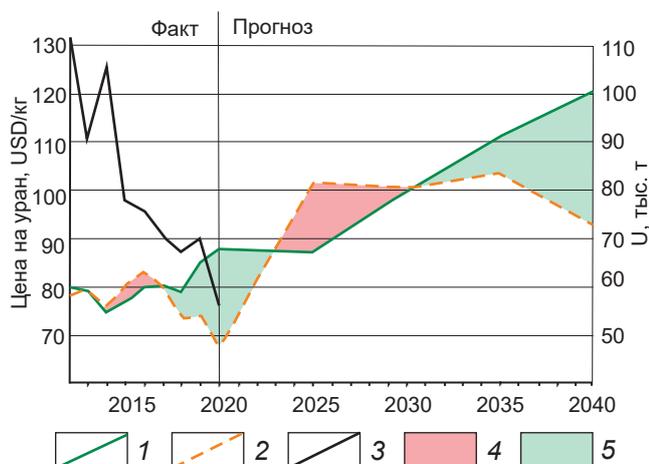


Рис. 5. Соотношение потребностей, производства и цены на уран в 2012–2040 гг. по [12]:

1 – потребности; 2 – производство; 3 – цена; 4 – пере-производство урана; 5 – дефицит урана

Fig. 5. Relations between the needs, production, and prices for uranium in 2012–2040, after [12]:

1 – needs; 2 – production; 3 – price; 4 – uranium overproduction; 5 – uranium deficiency

в вулканитах, расположенные в Стрельцовском урановорудном районе в Забайкальском крае. Район обеспечивает основную долю природного урана, добываемого в стране. Добыча ведётся подземным способом, содержание урана в рудах эксплуатируемых месторождений не столь высоко (0,06 % – месторождение Антей; 0,14 % – Стрельцовское; 0,15 % – Мало-Тулкуевское).

Освоение двух близких объектов планируется совместно, строительство подземного рудника началось в 2018 г. Первая очередь годовой проектной мощностью по добыче 350 млн т руды должна быть введена в строй в 2023 г., она будет обрабатывать запасы руды Аргунского месторождения, содержащие в среднем 0,25 % U. Позднее предполагается вовлечь в отработку Жерловое месторождение с более бедными рудами (0,008 % U). Выход на полную мощность (1200 т U в год) планируется на 2026 г. Рудник будет действовать в течение примерно 40 лет, он станет главным активом Приаргунского производственного гор-

но-химического объединения (ПАО «ППГХО им. Е. П. Славского»), входящего в структуру Уранового холдинга «Атомредметзолото», после того, как иссякнет ресурсная база ныне действующих добывающих предприятий [8].

Проект, несмотря на сравнительно невысокую конкурентоспособность, скорее всего будет реализован в запланированные сроки, поскольку принадлежит подразделению госкорпорации «Росатом» и имеет важное значение для обеспечения сырьём отечественных предприятий по производству ядерного топлива для АЭС. Он включён в госпрограмму РФ «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона» и входит в состав территории опережающего экономического развития «Забайкалье».

Серию небольших урановых месторождений в песчаниках Витимского урановорудного района в Республике Бурятия осваивает компания АО «Хиагда», также входящая в структуру Уранового холдинга «Атомредметзолото». В настоящее время ведётся добыча методом СПВ на Хиагдинском месторождении и экспериментальной площадке Источного, строительство и горно-подготовительные работы завершаются на Вершинном, начато освоение Количиканского и Дыбрынского месторождений, на очереди Намару и Кореткондинское [14]. На каждом из них компания планирует ежегодно извлекать 300–400 т урана в продуктивном растворе. Начало добычи на Количиканском месторождении планировалось на 2021 г., на Дыбрынском – на 2023 г. [8].

Компания АО «Далур», также входящая в структуру Уранового холдинга «Атомредметзолото», завершила доразведку и подтвердила промышленную ценность Добровольного месторождения в песчаниках в Курганской области, которое также планируется обрабатывать методом СПВ; составляется технический проект его отработки [5].

Другие проекты освоения отечественных месторождений урана в настоящее время заморожены. В 2020 г. из-за неблагоприятной конъюнктуры на неопределённый срок приостановлено действие лицензий на разработку золото-урановых месторождений в метасоматитах



Эльконского урановорудного района, на базе которых предполагалось создание крупного центра добычи годовой мощностью до 5 тыс. т урана. Продолжаются работы по освоению только одного из них – Северного месторождения, где планируется добыча золота и серебра; уран в качестве полезного компонента не рассматривается [8].

При успешной реализации существующих российских проектов освоения новых месторождений количество добываемого в стране урана будет планомерно увеличиваться и во второй половине текущего десятилетия может вырасти вдвое по сравнению с сегодняшним уровнем, примерно до 6 тыс. т в год. Это не позволит полностью удовлетворить потребности страны в урановой продукции с учётом экспортного спроса. В настоящее время они

составляют около 17 тыс. т, а к 2030 г. могут достигнуть 20–25 тыс. т в год [11]. Даже при самом благоприятном развитии событий, если конкурентоспособными станут руды месторождений Эльконского урановорудного района, что позволит организовать ещё один крупный центр добычи урана, отечественная добыча сможет обеспечить лишь около половины необходимого количества. А с учётом того, что Казахстан, месторождения которого служат сейчас крупным дополнительным источником сырья для российских предприятий, планирует снижать добычу, и, следовательно, поставки урана, а запасы оружейного урана, как бы они ни были велики, всё же не бесконечны, становится очевидно, что Росатому придётся наращивать усилия по поиску дополнительных источников этой продукции за рубежом.

## Список литературы

1. Австралийская компания Boss Energy возобновит добычу урана на руднике Honeymoon // Атомная энергия 2.0. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/08/05/127041> (дата публикации: 5.08.2022).
2. Бельгия окончательно останавливает первый из семи атомных реакторов страны // Атомная энергия 2.0. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/09/23/128581> (дата публикации: 23.09.2022).
3. Бундестаг проголосовал за продление эксплуатации всех действующих в Германии АЭС до апреля // Neftegaz.Ru. Новости. Атомная энергетика. – URL: <https://neftgaz.ru/news/nuclear/758449-bundestag-progolosoval-za-prodlenie-ekspluatatsii-vsekh-deystvuyushchie-v-frg-aes-do-aprelya/> (дата публикации: 11.11.2022).
4. Германия закрыла три из шести последних атомных станций // Атомная энергия 2.0. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/11/120833> (дата публикации: 11.01.2022).
5. Далур. АРМЗ. Росатом. О компании. – URL: <https://dalur.armz.ru/ru/kompaniya/o-nas> (дата обращения: 26.12.2022).
6. Канада первой в мире признала атомную энергетику экологически чистой // IХBT.com. Новости. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/11/06/kanada-pervoj-v-mire--priznalo-atomnuju-jenergetiku-jekologicheski-chistoj.html> (дата публикации: 06.11.2022).
7. Наши люди в Китае // Атомный эксперт. – 2018. – № 8. – URL: [https://atomicexpert.com/rosatom\\_in\\_china](https://atomicexpert.com/rosatom_in_china) (дата обращения: 26.12.2022).
8. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году : государственный доклад / Минприроды РФ. – М., 2021.
9. Представленная на COP27 энергетическая стратегия Индии предусматривает трёхкратное увеличение атомной мощности к 2032 году // Атомная энергия 2.0. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/11/15/130352> (дата публикации: 15.11.2022).
10. Резервный план. Бельгия не откажется от АЭС в ближайшие 10 лет из-за энергетического кризиса // Neftegaz.Ru. Новости. Атомная энергетика. – URL: <https://neftgaz.ru/news/nuclear/730622-belgiya-ne-otkazhetsya-ot-aes-v-blizhayshie-10-let-iz-za-energeticheskogo-krizisa/> (дата публикации: 20.03.2022).
11. Русстрат. Структура и характер зависимости РФ от импорта стратегического сырья. 18 июля 2021 г. – URL: <https://russtrat.ru/reports/18-iyulya-2021-0010-5096> (дата обращения: 26.12.2022).
12. Тарханов А. В., Бугриева Е. П. Современное состояние мировой и российской урановой промышленности // Сборник докладов на Пятом международном симпозиуме «Уран: геология, ре-



- сурсы, производство». – М., 2021. – С. 32–41. – URL: [https://vims-geo.ru/documents/568/Сборник\\_ВИМС\\_-\\_Уран.pdf](https://vims-geo.ru/documents/568/Сборник_ВИМС_-_Уран.pdf) (дата обращения: 26.12.2022).
13. «Урановый Узбекистан» – сколько добывается и куда продаётся // Spot. – URL: <https://www.spot.uz/ru/2020/09/24/uranium/> (дата публикации: 24.09.2020).
  14. Хиагда. АРМЗ. Росатом. О компании. – URL: <https://khiagda.armz.ru/ru/kompaniya/istoriya> (дата обращения: 26.12.2022).
  15. Энергия атома в эпоху поиска углеродной нейтральности. Энергетические тренды / Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. – 2022. – Вып. 105. – URL: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo\\_105.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo_105.pdf) (дата обращения: 26.12.2022).
  16. EES ЕАЕС. Мировая энергетика. Атомная энергетика Китая. – URL: <https://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-aes/atomnaa-energetika-kitaa> (дата обращения: 26.12.2022).
  17. Uranium Investing News. Uranium Outlook 2022: Prices Have Broken Out, How High Will They Go? Georgia Williams. – URL: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy-investing/uranium-investing/uranium-outlook/> (дата публикации: 22.12.2021).
  18. Uranium 2020: Resources, Production and Demand // A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – OECD, 2020. – URL: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true) (дата обращения: 26.12.2022).
  19. World Nuclear Association. The Nuclear Fuel Report: Expanded Summary. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2021–2040. April 2022. – URL: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/9a2f9405-1135-407a-85c8-480e2365bee7/nuclear-fuel-report-2021-expanded-summary.pdf.aspx> (дата обращения: 26.12.2022).

## References

1. Avstraliiskaya kompaniya Boss Energy vozobnovit dobychu urana na rudnike Honeymoon [The Australian company Boss Energy will resume uranium mining at the Honeymoon mine], *Atomnaya energiya 2.0* [*Atomic Energy 2.0*], available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/08/05/127041> (Accessed: 5.08.2022).
2. Bel'giya okonchatel'no ostanavlivaet pervyi iz semi atomnykh reaktorov strany [Belgium finally stops the first of the country's seven nuclear reactors], *Atomnaya energiya 2.0* [*Atomic Energy 2.0*], available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/09/23/128581> (Accessed: 23.09.2022).
3. Bundestag progolosoval za prodlenie ekspluatatsii vseh deistvuyushchikh v Germanii AES do aprelya [The Bundestag voted to extend the operation of all nuclear power plants operating in Germany until April], *Neftegaz.Ru. Novosti. Atomnaya energetika* [*Neftegaz.Ru. News. Nuclear power engineering*], available at: <https://neftgaz.ru/news/nuclear/758449-bundestag-progolosoval-za-prodlenie-ekspluatatsii-vseh-deystvuyushchie-v-frg-aes-do-aprelya/> (Accessed: 11.11.2022).
4. Germaniya zakryla tri iz shesti poslednykh atomnykh stantsii [Germany has closed three of the last six nuclear power plants], *Atomnaya energiya 2.0* [*Atomic Energy 2.0*], available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/11/120833> (Accessed: 11.01.2022).
5. Dalur. ARMZ. Rosatom. O kompanii [Dalur. ARMZ. Rosatom. About the company], available at: <https://dalur.armz.ru/ru/kompaniya/o-nas> (Accessed: 26.12.2022).
6. Kanada pervoi v mire priznala atomnyu energiyu ekologicheski chistoi [Canada was the first in the world to recognize nuclear energy as environmentally friendly], IXBT.com. Novosti [IXBT.com. News], available at: <https://www.ixbt.com/news/2022/11/06/kanada-pervoj-v-mire--priznalo-atomnuju-jenergetiku-jekologicheski-chistoj.html> (Accessed: 06.11.2022).
7. Nashi lyudi v Kitae [Our people in China], *Atomnyi ekspert* [*Atomic Expert*], 2018, No 8, available at: [https://atomicexpert.com/rosatom\\_in\\_china](https://atomicexpert.com/rosatom_in_china) (Accessed: 26.12.2022).
8. O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu: gosudarstvennyi doklad [On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020: state report], Moscow, 2021.
9. Predstavlenaya na COP27 energeticheskaya strategiya Indii predumtrivaet trekhkratnoe uvelichenie atomnoi moshchnosti k 2032 godu [India's



- energy strategy presented at COP27 provides for a threefold increase in nuclear power by 2032], *Atomnaya energiya 2.0* [*Atomic Energy 2.0*], available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/11/15/130352> (Accessed: 15.11.2022).
10. Rezervnyi plan. Bel'giya ne otkazhetsya ot AES v blizhaishie 10 let iz-za energeticheskogo krizisa [Backup plan. Belgium will not abandon nuclear power plants in the next 10 years due to the energy crisis], *Neftegaz.Ru. Novosti. Atomnaya energetika* [*Neftegaz.Ru. News. Nuclear power industry*], available at: <https://neftegaz.ru/news/nuclear/730622-belgiya-ne-otkazhetsya-ot-aes-v-blizhayshie-10-let-iz-za-energeticheskogo-krizisa/> (Accessed: 20.03.2022).
  11. Russtrat. Struktura i kharakter zavisimosti RF ot importa strategicheskogo syr'ya. 18 iyulya 2021 g. [Russtrat. The structure and nature of Russia's dependence on imports of strategic raw materials. July 18, 2021], available at: <https://russtrat.ru/reports/18-iyulya-2021-0010-5096> (Accessed: 26.12.2022).
  12. Tarkhanov A. V., Bugrieva E. P. Sovremennoe sostoyanie mirovoi i rossiiskoi uranovoi promyshlennosti. Sbornik dokladov na Pyatom mezhdunarodnom simpoziume "Uran: geologiya, resursy, proizvodstvo". FGBU "VIMS" [The current state of the world and Russian uranium industry. Collection of reports at the Fifth International Symposium "Uranium: Geology, resources, production. FSBI "VIMS"], Moscow, 2021, pp. 32–41, available at: [https://vims-geo.ru/documents/568/Sbornik\\_VIMS\\_-\\_Uran.pdf](https://vims-geo.ru/documents/568/Sbornik_VIMS_-_Uran.pdf) (Accessed: 26.12.2022).
  13. "Uranovyi Uzbekistan" – skol'ko dobyvaetsya i kuda prodaetsya ["Uranium Uzbekistan" – how much is mined and where is sold], *Spot* [*Spot*], available at: <https://www.spot.uz/ru/2020/09/24/uranium/> (Accessed: 24.09.2020).
  14. Khiagda. ARMZ. Rosatom. O kompanii [Khiagda. ARMZ. Rosatom. About the company], available at: <https://khiagda.armz.ru/ru/kompaniya/istoriya> (Accessed: 26.12.2022).
  15. Energiya atoma v epokhu poiska uglerodnoi neutral'nosti. Energeticheskie trendy [The energy of the atom in the era of the search for carbon neutrality. Energy trends.], Analytical Center under the Government of the Russian Federation Publ., 2022, V. 105, available at: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo\\_105.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2022/energo_105.pdf) (Accessed: 26.12.2022).
  16. EES EAEC. Mirovaya energetika. Atomnaya energetika Kitaya [EES EAEC. World energy. China's nuclear power industry], available at: <https://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-aes/atomnaa-energetika-kitaa> (Accessed: 26.12.2022).
  17. Uranium Investing News. Uranium Outlook 2022: Prices Have Broken Out, How High Will They Go? Georgia Williams, available at: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/energy-investing/uranium-investing/uranium-outlook/> (Accessed: 22.12.2021).
  18. Uranium 2020: Resources, Production and Demand // A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD, 2020, available at: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true) (Accessed: 26.12.2022).
  19. World Nuclear Association. The Nuclear Fuel Report: Expanded Summary. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2021–2040, April 2022, available at: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/9a2f9405-1135-407a-85c8-480e2365bee7/nuclear-fuel-report-2021-expanded-summary.pdf.aspx> (Accessed: 26.12.2022).

---

**Егорова Ирина Валентиновна** (irinaegorova31@gmail.com)

кандидат геол.-минерал. наук, доцент МГРИ-РГГРУ, г. Москва, Россия

## Состав и золотоносность неогеновых отложений среднего течения р. Селеннях (Республика Саха (Якутия))

Владимирцева О. В.<sup>1</sup>, Коноплев В. А.<sup>2</sup>, Березнев М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; <sup>2</sup> ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского», г. Москва, Россия

**Аннотация.** В связи со значительным истощением базы известных легкодоступных россыпных месторождений золота становится всё актуальнее выявление новых объектов. В районе р. Селеннях – среднего течения р. Индигирка – располагается несколько золотороссыпных узлов, преимущественно по левому берегу р. Селеннях, в её верховьях. Правобережье р. Селеннях, особенно в его средней части, остаётся малоизученным, однако наличие шлиховых ореолов золота, установленных в 1970–80-х гг. без явной связи с вероятными источниками золота, является предпосылкой к изучению этого района как золотоносного. В статье представлены результаты шлихового опробования 2020–2021 гг. на участке Ветвистый (район среднего течения р. Селеннях), приведена типоморфная характеристика россыпного золота, дано описание неогеновых отложений, которые дренирует руч. Ветвистый. Подтверждена принадлежность неогеновых отложений к уяндинской свите, выполняющей Момо-Селенняхскую впадину. Установлена потенциально промышленная золотоносность руч. Ветвистый и его притоков, выявлена знаковая золотоносность неогеновых отложений уяндинской свиты.

**Ключевые слова:** экзогенная золотоносность, россыпи золота, кайнозойские впадины, неогеновые отложения.

Для цитирования: Владимирцева О. В., Коноплев В. А., Березнев М. В. Состав и золотоносность неогеновых отложений среднего течения р. Селеннях (Республика Саха (Якутия)). Руды и металлы. 2023. № 1. С. 17–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10002.

## Composition and gold-bearing potential of Neogene deposits in the middle reaches of the Selennyakh river, Republic of Sakha (Yakutia)

Vladimirtseva O. V.<sup>1</sup>, Konoplev V. A.<sup>2</sup>, Bereznev M. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSBIS "Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia; <sup>2</sup> FSBI All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N. M. Fedorovsky, Moscow, Russia

**Abstract.** Because of significant exhaustion of known easily accessible gold placers, revealing new such objects is becoming increasingly important. Several gold placer clusters are situated in the region of the Selennyakh River in the middle course of the Indigirka River. They are mainly located along the left bank of the Selennyakh River, in its upper reaches. The right banks of the Selennyakh River, especially in its middle course, remain poorly studied. However, the presence of halos of panned gold concentrates with no obvious relation to probable primary sources of gold, revealed in the 1970s–80s, is a reason for this area to be studied as a gold-bearing one. The article presents results of the 2020–2021 panned heavy mineral concentrate sampling within the Vetvistyi site in the middle reaches of the Selennyakh River, provides a characteristic of the alluvial gold typomorphism, and gives a description of the Neogene deposits drained by the Vetvistyi Stream. The belonging of the Neogene deposits to the Uyandina Formation that fills the Momo-Selennyakh depression has been confirmed. Potentially commercial gold-bearing potential of the Vetvistyi Stream and its tributaries has been substantiated, and gold particles (signs) have been revealed in the Neogene deposits of the Uyandina Formation.

**Key words:** exogenous gold-bearing potential, gold placers, Cenozoic basins, Neogene deposits.

For citation: Vladimirtseva O. V., Konoplev V. A., Bereznev M. V. Composition and gold-bearing potential of Neogene deposits in the middle reaches of the Selennyakh river, Republic of Sakha (Yakutia). Ores and metals, 2023, № 1, pp. 17–24. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10002.



Река Селеннях – левый приток р. Индигирка, впадающий в неё в 300 км к югу от пгт. Белая гора. Имеет протяжённость около 800 км. Истоки расположены на северо-западной окраине хребта Черского. В своём верхнем течении р. Селеннях протекает в субмеридиональном направлении (с севера-востока на юго-запад), дренируя отложения Момо-Селенняхской впадины (рис. 1). В среднем-нижнем течении меняет своё направление на субширотное, протекая по Абыйской (известной также как Индигиро-Селенняхская) впадине.

Несмотря на явную экзогенную золотоносность верхнего и нижнего течения р. Селеннях и её притоков, среднее течение р. Селеннях изучено слабо и перспективы его россыпной золотоносности, несмотря на нарастающий интерес недропользователей к междуречью р. Селеннях и р. Индигирки, так до конца и не определены.

Геологическое строение района р. Селеннях контрастное. В верховьях распространены триасово-юрские терригенные комплексы с широким развитием гранитных интрузивов мелового возраста. На них со стратиграфическим несогласием залегают мощные, до 700 м кайнозойские отложения ( $N_2$ ), заполняющие Момо-Селенняхскую впадину. Верховья р. Селеннях и её притоков, известные своими россыпями золота, представлены двумя крупными россыпными районами – Хадараньинский-2 и Селенняхский-2. Россыпи приурочены к аллювиальным отложениям водотоков 2–3-го порядков. Часть россыпных объектов пространственно связана с кайнозойскими отложениями, заполняющими Момо-Селенняхскую впадину.

В среднем течении р. Селеннях распространены юрские и меловые терригенные отложения с ограниченным развитием субвулканистов преимущественно риолитового состава мелового возраста и субвулканических тел и диабазовых даек позднеюрского возраста. Фрагментарно в виде останцов представлены кайнозойские отложения, слагающие краевые части Момско-Селенняхской и Абыйской впадин. Из золотороссыпных объектов известны два проявления: руч. Ветвистый и

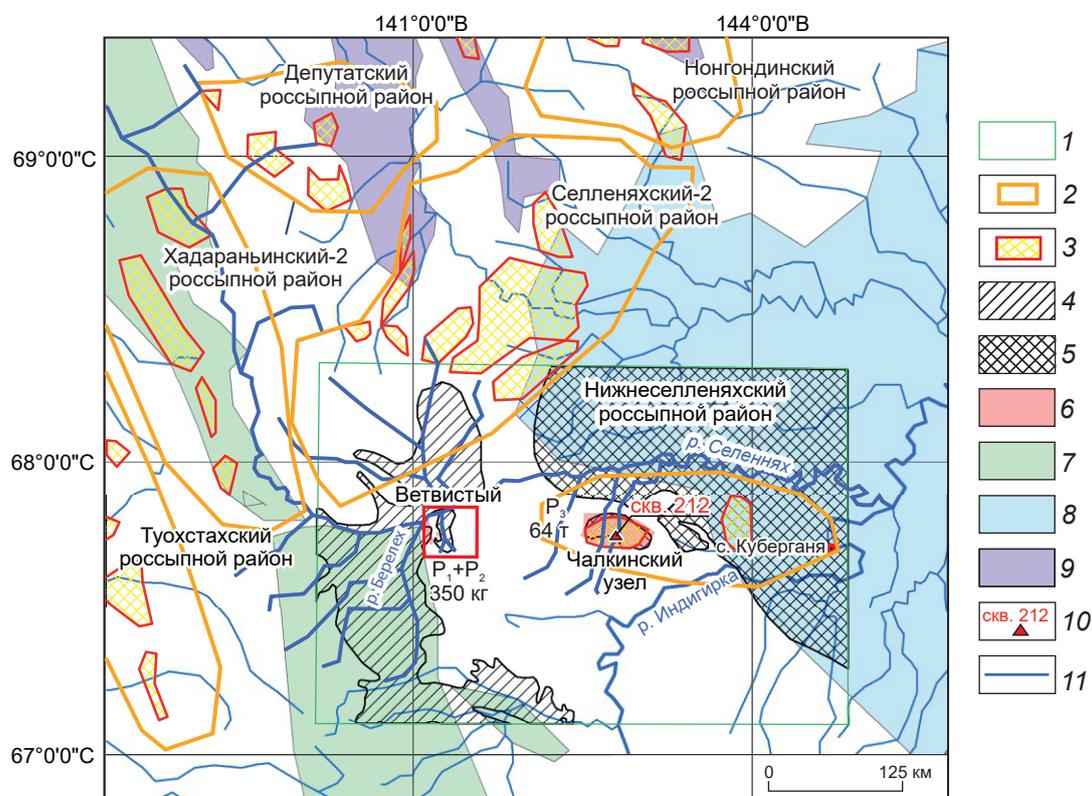
руч. Ночной, объединённые ОАО «Янгеология» в участок Ветвистый, перспективный для выявления золотороссыпных ( $P_1 + P_2 - 350$  кг) объектов.

Нижнее течение р. Селеннях характеризуется широким распространением мощных (до 2500 м) кайнозойских отложений ( $N_{1-3}$ ), заполняющих Абыйскую впадину, которые несогласно залегают на юрских и меловых терригенных отложениях. В районе нижнего течения р. Селеннях и её притоков известен Нижнеселенняхский золотороссыпной район, включающий в себя два россыпных узла: Чалкинский и Нэнньэскэ-Берелехский. Россыпные объекты ( $P_3 - 63$  т) приурочены к аллювиальным отложениям водотоков, дренирующих чалкинскую свиту – мощную толщу золотоносных конгломератов неогенового возраста. Также прогнозируются погребённые россыпи, включённые в эти конгломераты.

При рассмотрении района среднего течения р. Селеннях непосредственный интерес в первую очередь представляют останцы неогеновых отложений и дренирующие их водотоки. Таким объектом является участок Ветвистый (рис. 2).

*Характеристика участка Ветвистый.* Тектонически участок недр располагается в пределах Илиньтасского преддугового прогиба, в 5 км к востоку от Момо-Селенняхской впадины (кайнозойская грабенообразная впадина осевой зоны рифта), по сути, на её периферической части. С запада в 80 км от исследуемого участка располагается асимметричная Абыйская впадина, которая является частью обширного Зырянского прогиба.

Участок недр Ветвистый располагается в междуречье р. Берелех и Ненеске, включает в себя два мелких водотока 2-го порядка – руч. Ветвистый и руч. Ночной. Впервые участок был выделен в 1970–80-х гг. ЯнГРЭ (ОАО «Янгеология», 2014 г.). Тогда была установлена промышленная золотоносность аллювиальных отложений ручьёв и обозначены перспективы выявления промышленной золотоносности неогеновых песчаных отложений (проведена авторская оценка прогнозных ресурсов по кат.  $P_3$  в объёме 9 т).



**Рис. 1. Схема золотоносности района реки Селеннях:**

1 – исследуемый район; 2 – золотоносные районы; 3 – золотороссыпные узлы; области распространения свит: 4 – уяндинской, 5 – чалкинской; 6 – прогнозные ресурсы; впадины: 7 – Момо-Селенняхская, 8 – Абыйская, 9 – прочие кайнозойские межгорные; 10 – скв. 212 (Г. Г. Соловьёв и др., 1983 г.); 11 – реки

**Fig. 1. Scheme of placer gold distribution of Selennyakh river area:**

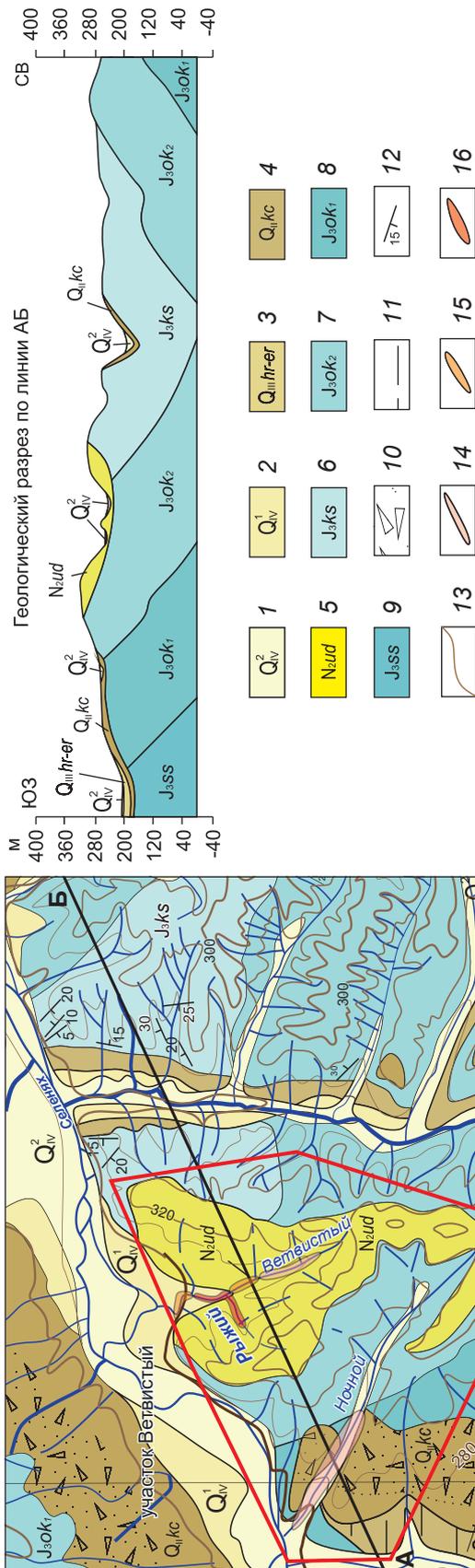
1 – study area; 2 – gold-bearing areas; 3 – gold-placer clusters; distribution areas of formations: 4 – Uyandina Formation, 5 – Chalka Formation; 6 – forecasted resources; depressions: 7 – Momo-Selennyakh, 8 – Abyisk, 9 – other Cenozoic intermontane depressions; 10 – Borehole 212 (G. G. Soloviev et al., 1983); 11 – rivers

Учитывая, что неогеновые отложения связаны с золотоносностью участка Ветвистый, целесообразно подробно остановиться на их характеристике. Первоначально неогеновые отложения были отнесены к чалкинской свите, однако позже (Р. И. Вишневецкая, 1998 г.) эта толща была отнесена к уяндинской свите.

Чалкинская свита выполняет основание Абыйской впадины. Отложения этой свиты распространены восточнее долины р. Никандя, где они слагают водоразделы рек Никандя, Чалкин, Кебергене. Контакт с нижележащими отложениями не установлен. Представлена

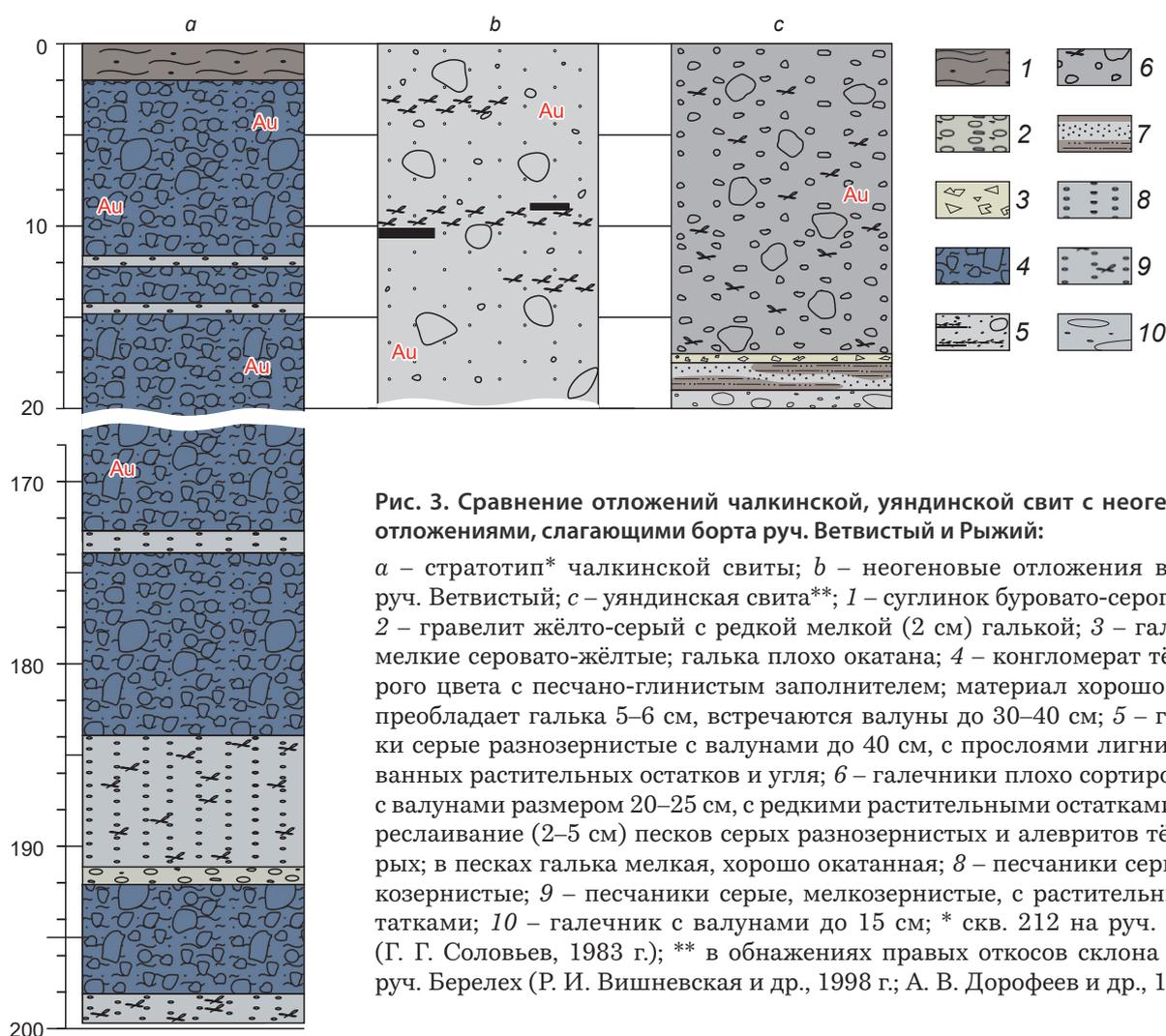
свита слабосцементированными полимиктовыми конгломератами, разномерным песком, редко глиной с примесью карбоната. Количество цемента 10–20 %. Среди конгломератов встречаются редкие прослои (0,5–1,5 м) серых песчаников. Отложения лимонитизированы почти на всю мощность. Мощность чалкинской свиты (рис. 3) около 200 м (стратотип – скв. 212 у р. Чалкин (Г. Г. Соловьёв, 1983 г.)).

Уяндинская свита выполняет основание Момо-Селенняхской, Берелехской и Томмотской впадин, обнажается по их периферии и в наиболее приподнятых блоках. Отложения



**Рис. 2. Геологическая карта участка Ветвистый, выделенного ЯНГРЭ (составлено на основе ГГК, лист Q-54 III, IV с изменениями и дополнениями):** четвертичная система: 1 – верхняя часть (аллювиальные галечники, пески), 2 – нижняя часть (аллювиальные, озерно-болотные отложения; галечники, пески, алевролиты, торф, растительные остатки), 3 – Хайырск-Эрчинский горизонты (аллювиальные, озерно-аллювиальные галечники, пески, алевролиты, растительный детрит); 4 – Кучугуский горизонт (аллювиальные алевролиты, галечники, пески, растительный детрит, ископаемые льды); неогеновая система: 5 – нижний плиоцен, уяндинская свита (гравелиты с прослойками древесных остатков); юрская система, верхний отдел: 6 – крестсалинская свита (аргилиты, песчаники, алевролиты), окончанская свита: 7 – верхняя подсвита (алевролиты, песчаники, редко аргиллиты), 8 – нижняя подсвита (песчаники, алевролиты, гравелиты, аргиллиты), 9 – сисиктэхская свита (алевролиты, аргиллиты, песчаники); 10 – пролювиально-делювиальные отложения; 11 – озерно-речные отложения; 12 – элементы залегания; 13 – изогипсы; результаты шлихового опробования аллювиальных отложений, 2021 г. (14 – знаки золота; содержание золота: 15 – повышенное, 16 – весовое)

**Fig. 2. Geological map of the Vetvistyi site identified by the YanGRE: compiled based on the State Geological Map (GGK) scale 200 000, sheet Q-54 III, IV, with amendments and additions:** quaternary system: 1 – upper section (alluvial pebbles, sands), 2 – lower section (alluvial and lacustrine-boggy deposits; pebbles, sands, silts, plant remnants), 3 – Khayrsk-Erchinsk horizons (alluvial and lacustrine-alluvial pebbles, sands, silts, plant detritus); 4 – Kuczugusky horizon: lacustrine-alluvial and alluvial silts, pebbles, sands, plant remains, fossil ice; 5 – Uyandina Formation of the Lower Pliocene (gravelites with interlayers of tree remnants); Upper Jurassic: 6 – Krest-Salinsk Formation (argillites, sandstones, siltstones), Okochansk Formation: 7 – upper subformation (siltstones, sandstones, rare mudstones), 8 – lower subformation (sandstones, gravelites, claystones), 9 – Sisiktekh Formation (siltstones, claystones, sandstones); 10 – proluvial-deluvial deposits; 11 – lacustrine-river deposits; 12 – attitudes; 13 – isohypses; results of 2021 panned heavy mineral concentrate sampling of alluvial deposits: 14 – gold particles (signs); gold content: 15 – elevated, 16 – weighable



**Рис. 3. Сравнение отложений чалкинской, уяндинской свит с неогеновыми отложениями, слагающими борта руч. Ветвистый и Рыжий:**

*a* – стратотип\* чалкинской свиты; *b* – неогеновые отложения в бортах руч. Ветвистый; *c* – уяндинская свита\*\*; 1 – суглинок буровато-серого цвета; 2 – гравелит жёлто-серый с редкой мелкой (2 см) галькой; 3 – галечники мелкие серовато-жёлтые; галька плохо окатана; 4 – конгломерат тёмно-серого цвета с песчано-глинистым заполнителем; материал хорошо окатан, преобладает галька 5–6 см, встречаются валуны до 30–40 см; 5 – галечники серые разнозернистые с валунами до 40 см, с прослоями лигнитизированных растительных остатков и угля; 6 – галечники плохо сортированные с валунами размером 20–25 см, с редкими растительными остатками; 7 – переслаивание (2–5 см) песков серых разнозернистых и алевролитов тёмно-бурых; в песках галька мелкая, хорошо окатанная; 8 – песчаники серые, мелкозернистые; 9 – песчаники серые, мелкозернистые, с растительными остатками; 10 – галечник с валунами до 15 см; \* скв. 212 на руч. Чалкин (Г. Г. Соловьев, 1983 г.); \*\* в обнажениях правых откосов склона долины руч. Берелех (Р. И. Вишневецкая и др., 1998 г.; А. В. Дорофеев и др., 1976 г.)

**Fig. 3. Comparison of the Chalka and Uyandina formations with the Neogene deposits comprising sides of the Vetvistyi and Ryzhii streams:**

*a* – stratotype\* of the Chalka Formation; *b* – Neogene deposits in the Vetvistyi Stream sides; *c* – Uyandina Formation\*\*, 1 – brownish-gray loam; 2 – yellow-gray gravelite with rare small (2 cm) pebbles; 3 – grayish-yellow small-grained pebbles with poorly rounded pebbles; 4 – dark gray conglomerate with sandy-clayey matrix; the material is well rounded, 5–6 cm pebbles predominate, boulders of up to 30–40 cm are encountered; 5 – gray inequigranular pebbles with boulders of up to 40 cm, with interlayers of lignitized plant remnants and coal; 6 – poorly sorted pebbles with boulders of 20–25 cm in size, with rare plant remnants; 7 – interbedding (2–5 cm) of gray inequigranular sands and dark brown silts; the sands accommodate small well-rounded pebbles; 8 – gray fine-grained sandstones; 9 – gray fine-grained sandstones with plant remnants; 10 – pebbles with boulders of up to 15 cm in size; \* Borehole 212 on the Chalkin Stream (G. G. Solovyov, 1983); \*\* in outcrops of right slopes of the Berelekh Stream valley slope (R. I. Vishnevskaya et al., 1998; A. V. Dorofeev et al., 1976)



**Рис. 4. Неогеновые отложения в долине руч. Ветвистый:**

*a* – левый борт руч. Ветвистый, 50 м вниз по течению от слияния с руч. Рыжий; *b* – ископаемая хвойная шишка из неогеновых отложений

**Fig. 4. Neogene deposits in the Vetvistyi Stream valley:**

*a* – the left side of the Vetvistyi Stream, 50 m downstream from the confluence with the Ryzhii Stream; *b* – fossil coniferous cone from the Neogene deposits

свиты с угловым несогласием залегают на мезозойских толщах. Уяндинская свита представлена галечниками с прослоями песков разнотернистых, алевритов, присутствуют лигнитизированные растительные остатки [2]. Мощность отложений в обрывах рек до 20–70 м, а в пределах Томмотской впадины, по данным буровых работ, превышает 175 м (А. В. Дорофеев и др., 1976 г.). На максимальную мощность вблизи исследуемого района эти отложения описаны (Р. И. Вишневецкая, 1988 г.) в бортах р. Берелех (см. рис. 3).

В ходе рекогносцировочных работ в 2020 г. авторами установлено, что неогеновые отложения представлены светлыми, почти белыми слабощементированными галечниками с прослоями в разной степени окаменелых деревьев и редкими маломощными (до 0,2 м) пропластами угля, встречаются окаменевшие шишки хвойных деревьев (рис. 4). Процент валунистости составляет порядка 20 на наблюдаемую мощность (15–20 м), фактически нет глинистого материала. Эти наблюдения подтверждают принадлежность толщи к уяндинской свите.

*Золотоносность ручьёв участка Ветвистый.* В ходе рекогносцировочных работ, про-

водимых авторами в 2020 г., ручьи, располагающиеся в пределах участка Ветвистый и дренирующие отложения уяндинской свиты, были опробованы шлиховым методом. Шаг опробования составлял от 200–350 до 50–100 м (на месте сгущения сети наблюдения проводились в случае установленной золотоносности), объём материала для шлиховой пробы 12–15 л (два лотка). Материал промывался вручную на лотке до серого шлиха. Пробы отбирались из русла ручьёв, кос, надпойменных террас. Глубина отбора составляла от 0,2 (косы и отложения русла) до 1,0 м (террасы). Всего было отобрано 134 шлиховые пробы.

Ручей Ветвистый представляет собой водоток 2-го порядка с U-образной долиной. Хорошо выражена I надпойменная терраса, имеющая высоту бровки порядка 1,5–2 м, ширина площадки террасы достигает 30–50 м. Аллювий представлен песчано-галечными отложениями мощностью от 1 м (в верховьях) до более 3 м (в нижнем течении). Породы плотика представлены песчаниками уяндинской свиты. В ходе шлихового опробования установлено, что аллювиальные отложения по всей протяжённости руч. Ветвистый включают в себя



**Рис. 5. Золото из аллювиальных отложений руч. Ветвистый**

**Fig. 5. Gold from alluvial deposits of the Vetvistyi Stream**

россыпное золото (рис. 5). Золото ярко-жёлтого цвета, уплощённое: соотношение площади золотины к её толщине в среднем составляет 13,2; обнаружено несколько пластинообразных золотинок. На класс крупности 1+1,25 мм приходится порядка 80 % металла, встречаются золотины размером до 5 × 3 мм. Тяжёлая шлиховая фракция представлена преимущественно касситеритом. Отсутствуют сростки золота с другими минералами. Наибольшие, в том числе весовые, содержания золота установлены в русловых и террасовых отложениях в среднем течении руч. Ветвистый.

Ручей Рыжий – водоток 1-го порядка с V-образной долиной, является левым притоком руч. Ветвистый в его среднем течении. Протяжённость ручья составляет около 700 м. Аллювиальные отложения представлены песчано-галечным материалом, встречаются валуны (до 30–40 %), мощность песчаных отложений 1–1,5 м. Породы плотика представлены гравелитами уяндинской свиты. Наиболее высокие (весовые) содержания золота в аллювиальных отложениях выявлены в месте слияния ручьёв Рыжий и Ветвистый (до 8 знаков на лоток). Тяжёлая фракция также представлена в основном касситеритом, отсутствуют сростки золота с другими минералами. Золото руч. Рыжий существенно крупнее, чем руч. Ветвистый, доминирующей является фракция 1,25+2,5 мм, на которую приходится порядка 70 % металла. Наиболее крупные золотины

встречались в верховьях ручья и на месте его слияния с руч. Ветвистый.

Ручей Ночной – водоток 2-го порядка, впадающий в р. Селеннях. Протяжённость ручья составляет около 12 км. Хорошо выражена надпойменная терраса с высотой уступа около 2 м и шириной площадки от 50 до 150 м, долина ручья корытообразная. Аллювиальные отложения представлены песчано-галечным материалом. Их мощность в ходе рекогносцировочных работ установить не удалось. В ходе шлихового опробования было исследовано нижнее течение ручья (3,5 км от устья вверх по течению). В отличие от руч. Ветвистый и его притока руч. Рыжий, аллювиальные отложения руч. Ночной имеют лишь знаковую золотоносность. Содержания, близкие к весовым, устанавливались только в двух пробах, отобранных с борта ручья в 1,5 км вверх от его устья, а также из проб, отобранных с глубины 1 м из надпойменной террасы. В среднем золотины размером около 1 × 0,4 мм, уплощённой формы, ярко-жёлтого цвета. По данным ЯнГРЭ, золотоносными являются отложения с глубин залегания около 1,5 м, факт наличия золота в приповерхностном аллювии косвенно подтверждает это предположение.

При рекогносцировочных работах авторами также были отобраны копушные пробы гравелитов, обнажающихся по бортам ручьёв. Объём одной копушной пробы составлял около 25 л. Пробы промывались вручную на лотке.



В результате промывки установлены единичные знаки золота. Золотины ярко-жёлтого цвета, уплощённой формы, размером в среднем  $0,5 \times 0,5$  мм. Тяжёлая фракция представлена весьма ограничено.

Ранее исследователи [1] (ОАО «Янгеология», 2014 г.) указывали на неогеновые отложения в долине руч. Ветвистый как на источник золота в аллювиальных россыпных образованиях ручьёв Ветвистый, Рыжий, Ночной. Данные, полученные авторами, подтверждают эти предположения. Однако не следует рассматривать изучаемые россыпные объекты в контексте золотоносных конгломератов чалкинской свиты в периферических частях Абыйской впадины, как это делалось ранее. Неогеновые отложения, распространённые на участке Ветвистый, относятся к уяндинской свите, которая выхо-

дит на поверхность по периферии Момо-Селенныхской впадины. Наличие значительного числа россыпей золота выше по течению р. Селенных (также пространственно связанных с кайнозойскими отложениями Момо-Селенныхской впадины) подразумевает возможность выявления ещё не известных россыпных объектов в среднем течении р. Селенных и её притоков. Вероятно, в качестве объектов-аналогов исследуемых россыпных образований можно рассматривать россыпи Чалкинского узла (Нижнеселенныхский золотороссыпной район), так как несмотря на принадлежность к различным тектоническим структурам, сходные условия всё же наблюдаются: приуроченность к мощным толщам неогеновых отложений, заполняющих кайнозойские впадины, средние-низкие содержания золота в аллювии.

## Список литературы

1. Некрасов А. И. Геология и благороднометальная минерогения Верхояноколымской складчатой области : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерогения» : дис. на соискание учён. степ. д-ра геол.-минерал. наук / Алексей Иванович Некрасов. – М., 2017. – 347 с.
2. Протопопов Г. Х., Трущелев А. М., Кузнецов Ю. В., Радулевич Я. А. [и др.]. Государственная геологическая карта СССР м-ба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Листы Q-54 – Усть-Нера. Объяснительная записка. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2020. – 843 с.

## References

1. Nekrasov A. I. Geologiya i blagorodnometal'naya minerogeniya Verkhoyanokolymskoi skladchatoi oblasti [Geology and noble-metal minerogeny of the Verkhoyanokolymsk folded region: Doctor's thesis], Moscow, 2017, 347 p.
2. Protopopov G. Kh., Trushchelev A. M., Kuznetsov Yu. V., Radulevich Ya. A. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR m-ba 1:1 000 000 (tre't'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolym'skaya. Listy Q-54 – Ust'-Nera. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR sc. 1:1,000,000 (third generation). Verkhoyansk-Kolyma series. Sheets Q-54 – Ust'-Nera. Explanatory note], St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2020, 843 p.

**Владимирцева Ольга Владимировна** (olga\_9\_4@mail.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия

**Коноплев Виктор Алексеевич** ведущий инженер

**Березнев Михаил Владимирович** начальник группы опытно-методических работ

ВИМС, г. Москва, Россия

## Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)

Сажина Т. И., Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б.

Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена определению минерального состава, физико-химических параметров и источников вещества кварц-берилловой минерализации Первомайского месторождения, которая выделяется в качестве самостоятельной стадии минералообразования. Главными минералами являются кварц и берилл, впервые на Первомайском месторождении идентифицирован феноakit. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зёрнами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима. Результаты исследования флюидных включений показали, что температуры гомогенизации флюидных включений в берилле варьируют в интервале от 265 до 191 °С. Рудообразующие растворы характеризуются низкой солёностью 5,9–8,6 экв. NaCl. Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце соответствуют 281–250 °С. Данные по изотопному составу показывают участие в рудообразующем процессе метеорных вод.

**Ключевые слова:** Первомайское месторождение, кварц-берилловые прожилки, флюидные включения.

Для цитирования: Сажина Т. И., Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования кварц-берилловой минерализации Первомайского молибденового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье). Руды и металлы. 2023. № 1. С 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10003.

## The mineral composition and formation conditions of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe molybdenum deposit, Dzhida ore field, Southwestern Transbaikalian region

Sazhina T. I., Damdinova L. B., Damdinov B. B.

N. L. Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude, Russia

**Abstract.** The article is devoted to determination of the mineral composition, physicochemical parameters, and sources of the substance of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe ore deposit, that is distinguished as an independent stage of the mineral formation. The main minerals are quartz and beryl; phenakite has first been identified for the Pervomaiskoe deposit. Ore minerals are represented by molybdenite, pyrite, and rare grains of cassiterite, chalcopyrite, rutile, aikinite, wulfenite, columbite, monazite, and xenotime. Results of studying the fluid inclusions have showed that homogenization temperatures of the fluid inclusions in the beryl vary in the range from 265 to 191°C. The ore-forming solutions are characterized by a low salinity of 5.9–8.6 NaCl equiv. Homogenization temperatures of fluid inclusions in the quartz correspond to 281–250°C. Data on the isotopic composition show the participation of meteoric waters in the ore-forming process.

**Key words:** Pervomaiskoe ore deposit, quartz-beryl veinlets, fluid inclusions.

For citation: Sazhina T. I., Damdinova L. B., Damdinov B. B. The mineral composition and formation conditions of quartz-beryl mineralization of the Pervomaiskoe molybdenum deposit, Dzhida ore field, Southwestern Transbaikalian region. Ores and metals, 2023, № 1, pp. 25–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10003.





*Введение.* Джидинский рудный район, в состав которого входит Джидинское рудное поле, расположен на территории Западного Забайкалья и занимает обширную территорию между водоразделами Хамар-Дабана и Джидинского хребта общей площадью более 10 000 км<sup>2</sup> [1]. Многие учёные связывают W-Mo (Be) оруденение Джидинского рудного поля с наиболее молодым (позднемезозойским) этапом тектономагматической активизации вдоль глубинного Джидинского разлома, в ходе которого формировались гранитоиды гуджирского интрузивного комплекса [1, 10, 11]. Несмотря на многочисленные исследования и планомерные геологические съёмки, важные вопросы по флюидному режиму, *P-T* параметрам, газовой-солевому раствору, продуцирующим W-Mo (Be) оруденение, в настоящее время остаются не до конца решёнными и поэтому требуют дальнейшего подробного исследования. Ранее авторами статьи было изучено Первомайское молибденовое месторождение, которое считается самым ранним в ряду объектов Джидинского рудного поля [17], Инкурское штокверковое вольфрамовое месторождение [6], а также Холтосонское вольфрамовое месторождение [7]. В результате были выявлены некоторые особенности минерального состава и условия формирования молибденовых и вольфрамовых руд, уточнён изотопный возраст молибденового оруденения, получены концентрации металлов в рудообразующих растворах по методике, описанной в работе А. А. Боровикова [4]. Однако данные о минеральном составе и условиях образования кварц-бериллиевой минерализации, присутствующей на Первомайском молибденовом месторождении, практически отсутствуют. Кварц-берилловые прожилки образуют отдельную стадию при формировании рудной минерализации Джидинского рудного поля, но данному типу оруденения ранее не уделялось достаточного внимания из-за небольшого распространения и низкой рудопродуктивности, ведь месторождения рассматриваемого рудного поля представляли интерес как источники молибдена и вольфрама. В то же время для уточнения эволюции Джидинской рудно-магматической системы необходимо детальное изучение состава, последова-

тельности и флюидного режима формирования всех типов рудной минерализации.

*Геологическое строение Первомайского месторождения.* В состав Джидинского рудного поля входят три крупнейших в регионе и стране месторождения – Первомайское (Mo), Инкурское и Холтосонское (W). В качестве примесных компонентов в рудах встречается ряд других полезных элементов, в том числе и бериллий (Be). В геологическом строении рудного поля принимают участие кембрийская хохюртовская осадочно-эффузивная свита, а также Модонкульский гранитоидный массив раннего палеозойского возраста, на контакте которого проходит субмеридиональный Джидинский глубинный разлом, и Первомайский шток гранит-порфиров, с которым связывается Mo-W оруденение.

Хохюртовская осадочно-эффузивная свита занимает восточную часть данного рудного поля и сложена песчаниками, сланцами, известняками, а также вулканитами основного и среднего составов.

Модонкульский гранитоидный интрузив представляет собой фрагмент крупного массива, вытянутого в северо-западном направлении и сложенного преимущественно кварцевыми диоритами и диоритами [11].

Первомайское молибденовое месторождение приурочено к северо-западной апикальной части одноимённого массива гранит-порфиров (рис. 1), имеющего форму лакколита с многочисленными апофизами. Площадь выхода массива на дневную поверхность составляет 0,35 км<sup>2</sup> [18]. В апикальной части отмечаются ксенолиты гранитов и граносиенитов верхнего палеозоя, а также кембрийских отложений кровли, свидетельствующие о небольшой глубине эрозионного среза. На Первомайском массиве, в большей степени в его эндоконтактной части, отмечаются апофизы и дайкообразные тела разнообразных гранитоидов. В становлении данного массива выделяются четыре интрузивные фазы: 1) фельзиты, фельзит-порфиры, слагающие апофизы и краевые части интрузива; 2) биотитовые граниты и гранит-порфиры основного тела и даек; 3) аплитовидные граниты; 4) аплиты и ап-

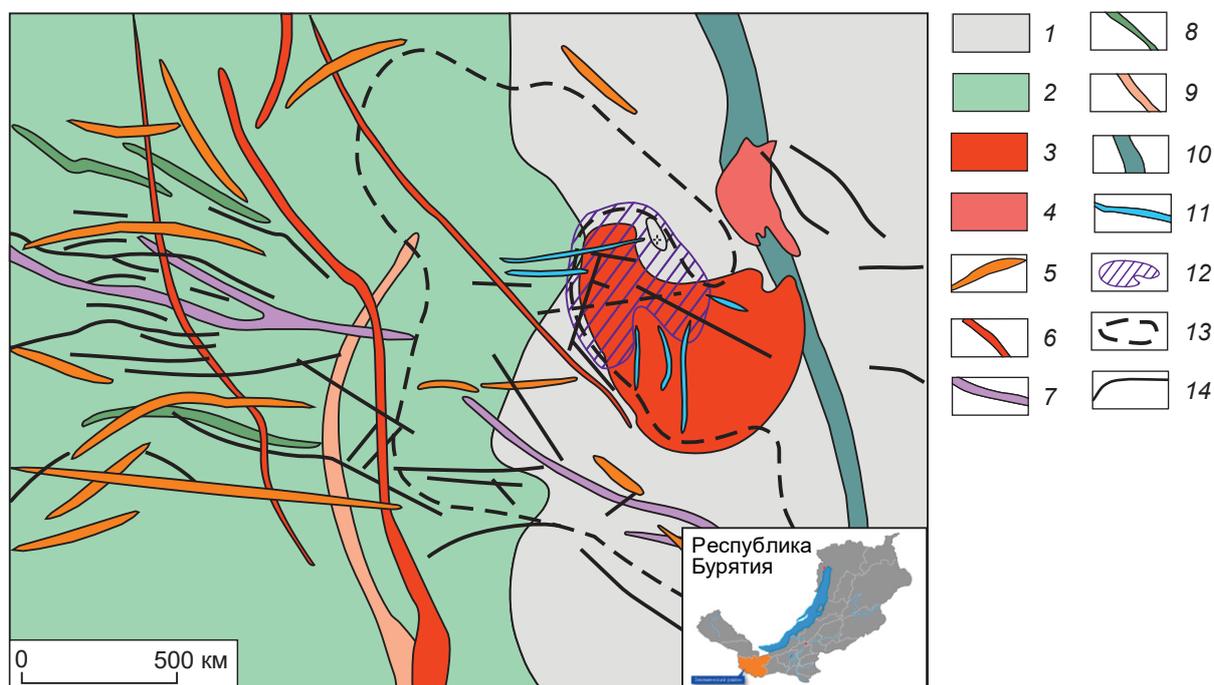


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Джидинского рудного поля, по [17]:

1 – хохюртовская свита: эффузивы, пирокласты, сланцы; массивы: 2 – Модонкульский (диориты, кварцевые диориты), 3 – Первомайский, 4 – Горкинский; дайки: 5 – серых сиенитов, 6 – гранит-порфиров, 7 – бостонитов, 8 – микродиоритов, 9 – плагιοгранитов; 10 – Джидинский глубинный разлом; 11 – кварц-молибденитовые жилы; 12 – Первомайский молибденовый штокверк; 13 – Инкурский вольфрамовый штокверк; 14 – кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы [8]; на врезке географическое положение рудного поля

Fig. 1. Schematic geological map of the Dzhida ore field, after [17]:

1 – Khokhyurt Formation (effusives, pyroclasts, shales); massifs: 2 – Modonkul (diorites, quartz diorites), 3 – Pervomaisky, 4 – Gorkinsky; dikes: 5 – gray syenites, 6 – granite-porphyrines, 7 – bostonites, 8 – microdiorites, 9 – plagiogranites; 10 – Dzhida deep-seated fault; 11 – quartz-molybdenite veins; 12 – Pervomaiskoe molybdenum stockwork; 13 – Inkur tungsten stockwork; 14 – quartz-sulfide-hubnerite veins [8]; in the inset, the geographic location of the ore field

лит-порфиры, образующие в апикальной части множество полого- и крутопадающих даек мощностью от 0,5 до 3–5 м [11].

Предшественниками полужены разные датировки возраста гранитов Первомайского массива. U-Pb датирование гранит-порфиров апикальной части массива, проведённое в ГИН СО РАН методом LA-ICP-MS, показало значение возраста гранитов  $123,5 \pm 1,5$  млн лет [12], Rb-Sr датирование –  $124,3 \pm 1,6$  [13] и  $137 \pm 4,8$  млн лет [2]. Также Re-Os методом получены два модельных возраста молибденита  $118,5$  и  $122,4$  млн лет [18].

Оруденение на Первомайском молибденовом месторождении прожилково-вкрапленное, представлено сетью различно ориентированных, в большей степени маломощных, кварцевых, кварц-полевошпатовых прожилков и жил с вкрапленностью молибденита [11]. На месторождении наблюдаются как мелкие, так и мощные (до 1,0–1,5 м и более) кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы с вкрапленностью молибденита протяжённостью до 100, иногда 250 м, имеющие субширотное и субмеридиональное, редко северо-западное и северо-восточное простирание. Самый большой

интерес с практической точки зрения представляет прожилковое оруденение с мощностью прожилков от 1 мм до 5 см, редко до 10–30 см, сопровождающихся зонами вкрапленных молибденовых руд непосредственно во вмещающих гранит-порфирах. Основную часть Первомайского штокверка составляют руды с содержанием Mo 0,1–0,15 %. Оруденение распространено весьма неравномерно, отмечаются окна пустых пород и обогащённые участки, распределение которых зависит от густоты прожилков и характера их минерализации [5].

Для штокверка характерно наличие многочисленных дорудных и внутриминерализованных даек аплитов, гранит-порфиров. Дайки серых сиенитов, кварцевых сиенитов и лейкократовых гранит-порфиров пересекают молибденитсодержащие прожилки [11].

*Фактический материал и методы исследования.* Исследуемый материал представлен образцами кварц-берилловых прожилков, а также вмещающих пород, из которых были изготовлены проанализированные шлифы, шлиф-кассеты, аншлифы и пластины, а также отобраны минералы для изотопных исследований.

Для определения минералого-петрографического состава прожилков использовались методы оптической микроскопии на поляризационном микроскопе OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определён Е. В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С. В. Канакиным в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Дубрецова СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA-Energy 350. Изотопный состав кислорода проанализирован В. Ф. Посоховым в ЦКП «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Дубрецова СО РАН (г. Улан-Удэ).

Для определения физико-химических условий формирования кварц-бериллиевого оруденения были изучены наиболее пригодные для исследования первичные флюидные включения (ФВ) из зёрен кварца и берилла ме-

тодами термометрии и криометрии. Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °С. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет  $\pm 0,1$  в отрицательной и  $\pm 5$  °С в положительной областях температур.

*Результаты и обсуждение. Минеральный состав кварц-берилловых прожилков.* Кварц-берилловые прожилки распространены в эндо- и экзоконтактах Первомайского штока и пересекают кварц-молибденитовые прожилки [10], что свидетельствует об их более позднем образовании.

Породы, вмещающие оруденение, представляют собой гранит-порфиры, имеющие относительно выдержанный состав (рис. 2). Основная масса гранит-порфиров – мелкозернистая, состоит из мелких зёрен (до 1 мм) калиевого полевого шпата, кварца, плагиоклаза, а также биотита и мусковита. Порфиновые вкрапленники достаточно равномерно распределены в основной массе, их размер варьирует от 2 до 5 мм. Вкрапленники представлены кварцем, калиевым полевым шпатом и реже плагиоклазом (см. рис. 2, а). Кроме того, отмечается редкая вкрапленность (см. рис. 2, б) (1–2 %) молибденита, пирита, флюорита (около 2 %) и апатита (< 1 %). В целом структура пород гипидиоморфнозернистая, реже отмечается пойкилитовая структура. Молибденовая минерализация Первомайского месторождения в основном сосредоточена в кварц-молибденитовых прожилках (рис. 3, с, d, e), обрамлённых зонами вкрапленной молибденитовой минерализации в гранит-порфирах.

Кварц-берилловые прожилки, как правило, сложены кварцем, шестоватыми, удлинённо-призматическими кристаллами бледно-зелёного (см. рис. 3, h), голубоватого берилла, зёрнами полевого шпата, реже встречается светлая слюда (мусковит). В некоторых участках прожилков отмечается мелкочешуйчатая вкрапленность молибденита. Помимо этого, в от-

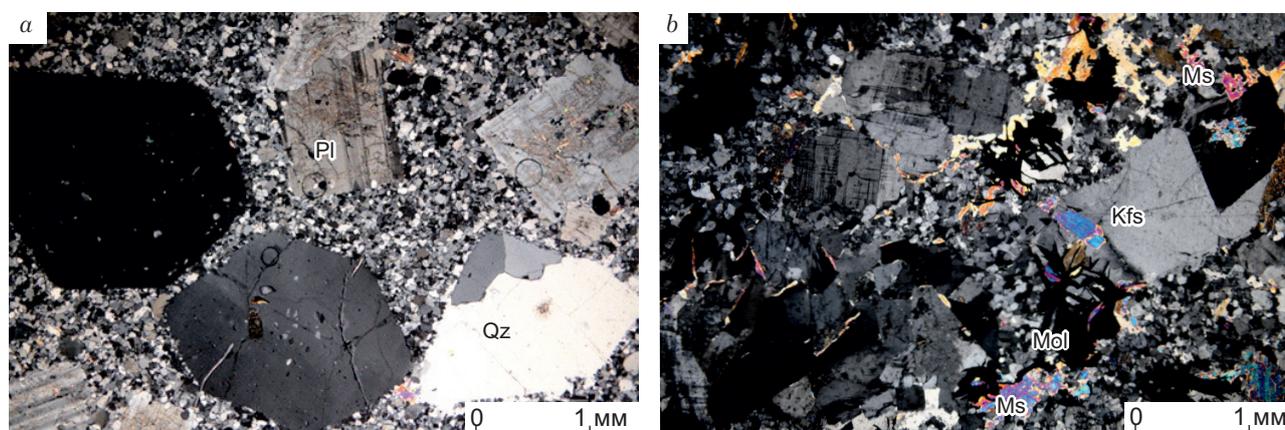


Рис. 2. Вмещающие гранит-порфиры:

*a* – гранит-порфир с вкрапленниками кварца, КПШ и плагиоклаза; *b* – гранит-порфир с вкрапленностью молибденита; Pl – плагиоклаз; Ms – мусковит; Kfs – КПШ; Mol – молибденит; Qz – кварц; Brl – берилл

Fig. 2. Host granite-porphyrines:

*a* – granite-porphyry with phenocrysts of quartz, K-feldspar, and plagioclase; *b* – granite-porphyry with disseminated molybdenite; Pl – plagioclase; Ms – muscovite; Kfs – K-feldspar; Mol – molybdenite; Qz – quartz; Brl – beryl

дельных образцах кварц-берилловых прожилков обнаружены редкие зёрна флюорита.

Кварц-берилловые прожилки имеют достаточно чёткие и резкие границы с вмещающими их породами, довольно часто кристаллы берилла растут от стенок прожилков. Это свидетельствует о том, что такие прожилки формировались путём выполнения трещин. Мощность прожилков варьирует от ~ 1 до 10 см (см. рис. 3, *f, g*).

Главный жильный минерал – кварц ( $\text{SiO}_2$ ), который составляет примерно 45 %, он образует неправильные изометрические зёрна с волнистым погасанием (рис. 4, *b*), размер которых достигает примерно 2 мм. Кварц является «сквозным» минералом, формирующимся на всех стадиях образования прожилков от ранней к поздней.

Берилл ( $\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ ) так же, как и кварц, является главным минералом. В прожилках распространён неравномерно, на его долю приходится до 20 об. %. Образует наиболее идиоморфные удлиненно-призматические, шестоватые кристаллы (см. рис. 4, *a*). Размер зёрен берилла в шлифах достигает  $5 \times 7$  мм, в образцах до 5 см, окраска бледно-зелёная (см. рис. 3, *h*).

Нами впервые на Первомайском месторождении был идентифицирован фенакит ( $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$ ) (рис. 5, *a*), он образует единичные зёрна удлиненно-призматического облика размером до 2 мм по длинной оси, находится в тесной ассоциации с молибденитом и бериллом.

Также в качестве жильных минералов присутствует калиевый полевой шпат. Он образует изометрические зёрна размером до 3 мм, часто в тесном сростании с кварцем, а также наблюдается в виде мелких единичных включений в зёрнах мусковита.

Мусковит (до 10 %) ( $\text{KA}_{12}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ) образует пластинчатые, чешуйчатые зёрна зеленовато-белого цвета размером до 3 мм, чаще всего приурочен к зальбандовым частям прожилков. Нередко в прожилках отмечаются участки, где наблюдаются индукционные грани совместного роста мусковита и агрегатов молибденита. Мусковит характеризуется повышенным содержанием фтора 1,82–3,57 %.

Флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) распространён неравномерно (до 5 %), образует агрегаты неправильной формы небольших размеров в интерстициях между зёрнами берилла, мусковита и кварца.



**Рис. 3. Фотографии Первомайского карьера и входящих в его состав гранитов и рудных прожилков:**

*a* – Первомайский карьер; *b* – граниты Первомайского месторождения; *c, d, e* – молибденитовые прожилки во вмещающих гранитах; *f, g* – кварц-берилловые прожилки; *h* – кварц-берилловый прожилок с зеленоватыми кристаллами берилла

**Fig. 3. Photos of the Pervomaiskoe open pit and its constituent granites and ore veinlets:**

*a* – Pervomaiskoe open pit; *b* – granites of the Pervomaiskoe deposit; *c, d, e* – molybdenite veinlets in the host granites; *f, g* – quartz-beryl veinlets; *h* – quartz-beryl veinlet with greenish beryl crystals

Барит ( $\text{BaSO}_4$ ) отмечается в интерстициях между зёрнами калиевого полевого шпата и берилла (см. рис. 5, *d*) в виде единичных удлинённых таблитчатых зёрен размером до 0,2 мм.

Главные сульфидные минералы представлены молибденитом, пиритом. Молибденит ( $\text{MoS}_2$ ) слагает от 5 до 10 % кварц-берилловых прожилков, образует листоватые, чешуйчатые агрегаты размером до 4 мм (см. рис. 4, *c*). В прожилках наблюдается как совместно с бериллом, так и в зальбандах в сростании с мусковитом.

Пирит ( $\text{FeS}_2$ ) – следующий по распространённости рудный минерал, составляет около

3–5 %. Наблюдается в виде хорошо огранённых кубических зёрен размером 0,1 × 0,2 мм (см. рис. 4, *d*), которые встречаются среди кварц-берилловых агрегатов, а также на контакте молибденита с бериллом (см. рис. 5, *c*).

Помимо этого, среди рудных минералов отмечаются следующие менее распространённые в данном типе прожилков: халькопирит, касситерит, рутил, колумбит, вульфенит, айкинит, а также ксенотим и монацит.

Халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ) встречается достаточно редко (< 1 %), в виде неправильных единичных зёрен жёлтого цвета размером 0,1 × 0,15 мм.

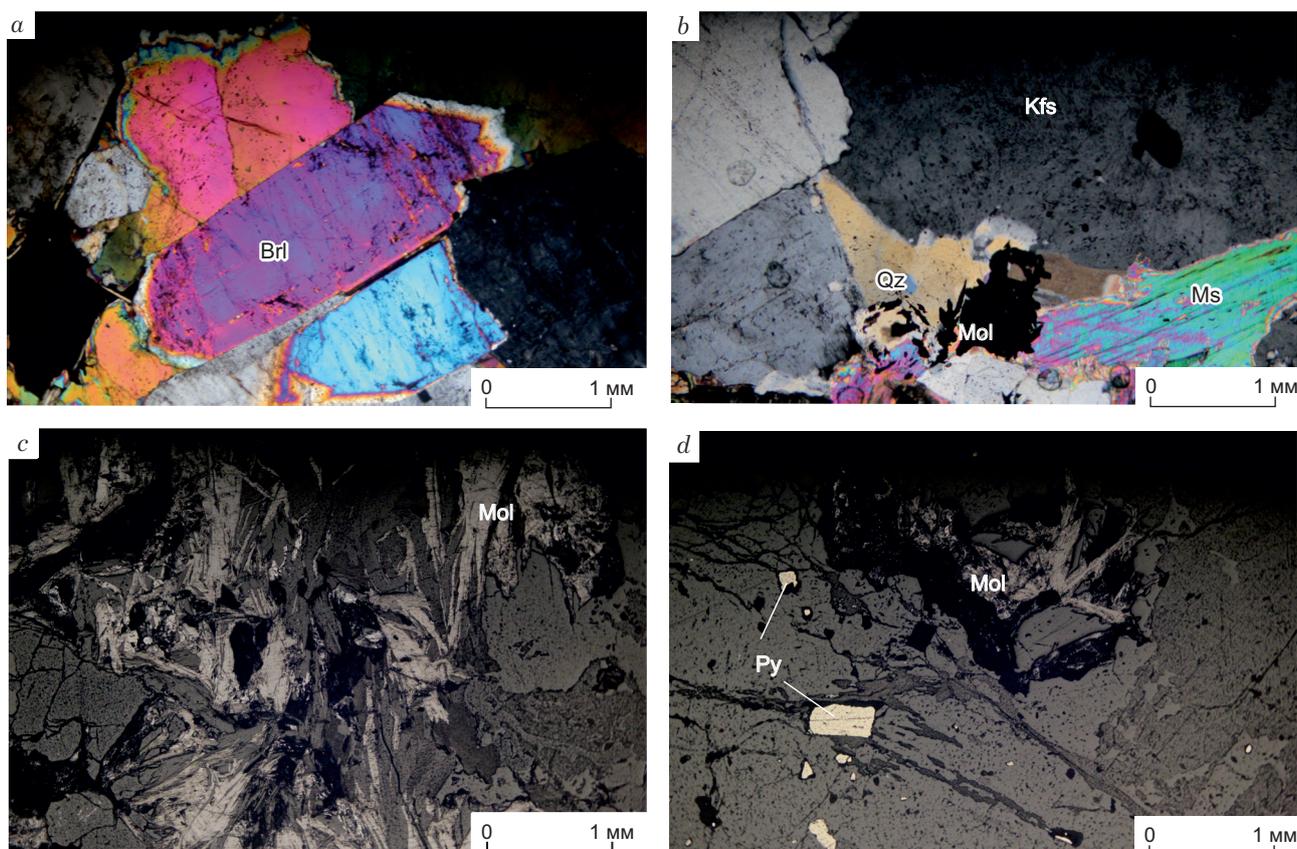


Рис. 4. Фотографии шлифов (верхний ряд) и аншлифов (нижний ряд) кварц-берилловых прожилков:

*a* – удлинённо-призматические кристаллы берилла; *b* – листоватые агрегаты молибденита в интерстициях кварца и мусковита; *c* – листоватый агрегат молибденита; *d* – кубические зёрна пирита и агрегаты молибденита среди нерудной массы; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 4. Photos of thin sections (upper row) and polished sections (lower row) of quartz-beryl veinlets:

*a* – elongated prismatic crystals of beryl; *b* – foliated molybdenite aggregates in quartz and muscovite interstices; *c* – foliated molybdenite aggregate; *d* – cubic pyrite grains and molybdenite aggregates among gouge mass

Касситерит ( $\text{SnO}_2$ ) в аншлифах серый, анизотропный, образует изометрические, сдвойникованные кристаллы, размер которых не превышает 0,3 мм.

Рутил ( $\text{TiO}_2$ ) наблюдается в виде редких зёрен, в шлифах имеет характерный красновато-бурый цвет и очень высокий рельеф. Он, как правило, образует вытянутые призматические кристаллы, размером не превышающие 0,3 мм. В качестве примеси имеет в своём составе, %: Fe – 0,46, Nb – 1,44, V – 1,1. Зёрна рутила разбиты сетью микротрещин, по которым в виде тонких прожилков развивается вольфрамит ( $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$ ) и колумбит ( $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$ ,

слагающий выделения неправильной формы (см. рис. 5, *b*).

Айкинит ( $\text{PbCuBiS}_3$ ) отмечается в виде единичных (< 1 %) округлых включений в берилле размером менее 100 мкм.

Ксенотим ( $\text{YPO}_4$ ) образует короткопризматические кристаллы размером около 0,1 мм в межзерновых участках кварца и флюорита (см. рис. 5, *e*). В качестве примеси в ксенотиме присутствуют лантаноиды, %: Er – 2,37, Yb – 5,34, Dy – 4,01, Gd – 1,58.

Монацит ( $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})[\text{PO}_4]$ ) наблюдается в виде мелких единичных зёрен с неровными очертаниями, образуется по трещинкам

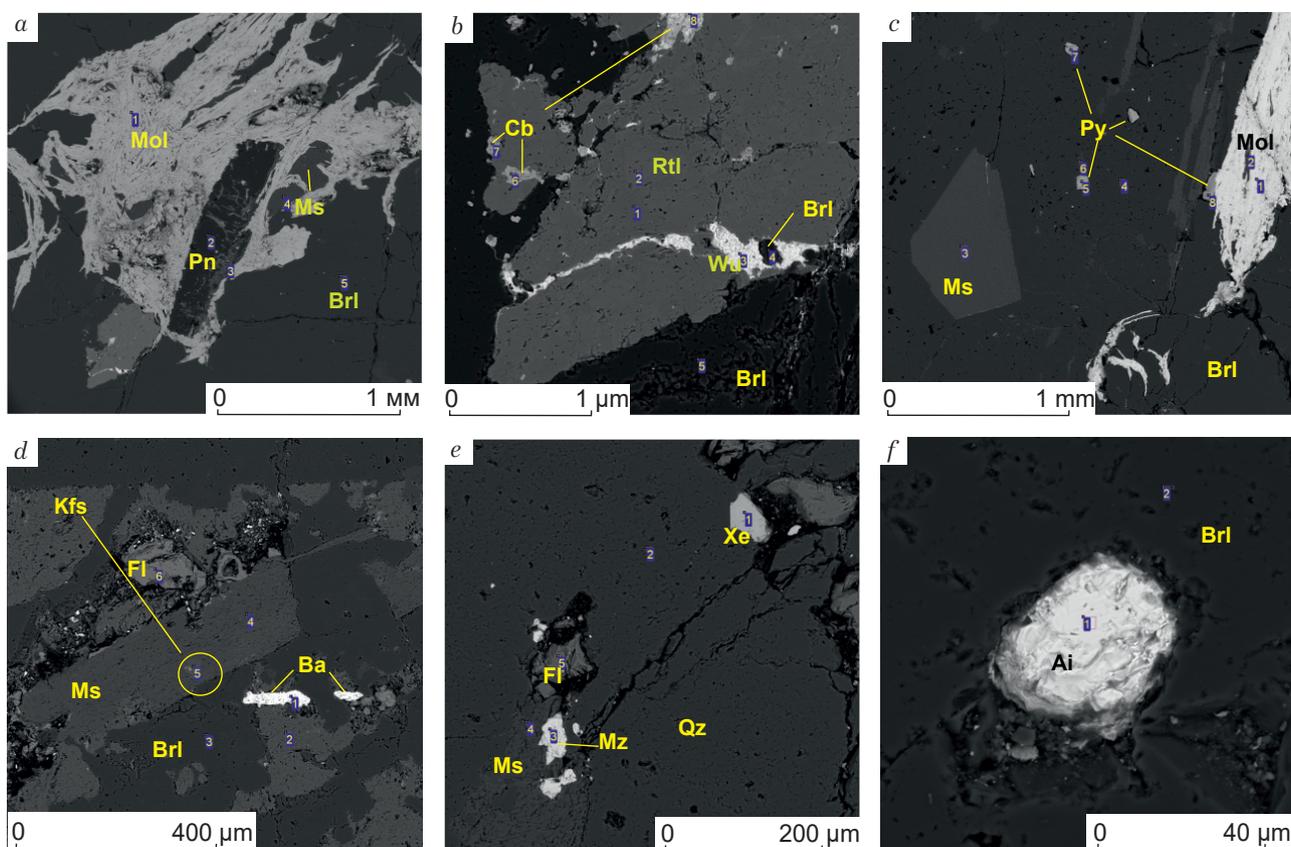


Рис. 5. Фотографии минералов из кварц-берилловых прожилков в обратно-рассеянных электронах:

Pn – фенакит; Ai – айкинит; Mz – монацит; Xe – ксенотим; Fl – флюорит; Py – пирит; Ba – барит; Wu – вульфенит; Cb – колумбит; Rtl – рутил; остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 5. Photos of minerals from quartz-beryl veinlets in back-scattered electrons:

Pn – phenakite; Ai – aikinite; Mz – monazite; Xe – xenotime; Fl – fluorite; Py – pyrite; Ba – barite; Wu – wulfenite; Cb – columbite; Rtl – rutile; for other conventional designations see fig. 2

в кварце, в тесной ассоциации с флюоритом и мусковитом (см. рис. 5, e).

*Изотопные исследования.* Для определения источников рудообразующих растворов были проведены изотопные исследования кислорода в кварце, берилле и мусковите. Результаты изотопного анализа минералов кварц-берилловых прожилков показаны в табл. 1. Для сравнения приведены литературные данные по изотопному составу кислорода в кварц-молибденитовых прожилках [23].

Установлено, что кварц из кварц-берилловых и кварц-молибденитовых прожилков имеет близкий изотопный состав кислорода. Зна-

чения  $\delta^{18}\text{O}$  в кварце варьируют от 5,7 до 7,1 ‰. Самый низкий показатель  $\delta^{18}\text{O}$  имеет мусковит (4,3 ‰); в берилле немного ниже, чем в кварце (5,3–6,2 ‰). Результаты предшественников согласуются с нашими данными (см. табл. 1). Разница в значениях изотопного состава кислорода между минеральными фазами соответствует изотопному фракционированию в системе кварц – берилл – мусковит [16, 24].

Расчёт температуры изотопного равновесия в паре кварц–мусковит был проведён по уравнению, опубликованному в работе [24]. Получено значение  $-461\text{ }^\circ\text{C}$ , которое интерпре-



Табл. 1. Результаты изотопных анализов

Table. 1. Results of isotopic analyzes

Прожилки	Минерал	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ V-SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ флюида
Кварц-берилловые	Кварц	6,0	3,0
	Берилл	5,4	5,9
	Кварц	6,7	3,7
	Берилл	5,5	6,0
	Мусковит	4,3	3,7
	Кварц	7,1	4,1
	Берилл	6,2	6,7
	Кварц	6,5	
	Берилл	5,3	
Кварц-молибденитовые [23]	Кварц	5,7	
	Кварц	6,6	

тируется как предполагаемая температура изотопного равновесия.

Расчёт изотопного состава равновесного флюида для данной температуры проведён по уравнениям [24]. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  флюида для разных образцов варьируют в интервале 3,0–4,1 ‰. Такой изотопный состав, скорее всего, свидетельствует о смешении магматического флюида с метеорными водами.

*Термобарогеохимические исследования.* Для определения условий минералообразования были изучены наиболее пригодные первичные флюидные включения в кварце и берилле. Все изученные первичные включения двухфазовые (жидкость > газ), в более крупных флюидных включениях отчётливо просматривается кайма жидкой углекислоты.

В зёрнах берилла исследованы достаточно крупные первичные двухфазные (газ < жидкость) ФВ гомогенного захвата, размер которых варьирует от первых микрон до ~ 80 мкм. Все изученные ФВ не содержат в своём составе твёрдой фазы, в большинстве случаев характеризуются удлинённой вытянутой формой по зонам роста минерала-хозяина (рис. 6, с, d).

Результаты термометрических и криометрических исследований флюидных включе-

ний показаны в табл. 2. Там же для сравнения приведены данные, полученные в ходе изучения кварц-молибденитовых прожилков.

Температура гомогенизации флюидных включений в берилле варьирует от 265 до 191 °С. Температуры эвтектики меняются в диапазоне от -55 до -38 °С, это свидетельствует о том, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами кальция, натрия, магния и калия [3, 14]. Разброс значений температур эвтектики может быть связан с тем, что даже в одном образце часть зёрен может быть более ранней, часть – более поздней. Соответственно за какой-то период времени раствор эволюционирует. Температуры плавления гидрата  $\text{CO}_2$  от 7,3 до 8,1, такие значения соответствуют солёности 5,23–2,5 мас. % экв. NaCl [19].

В зёрнах кварца, как правило, наблюдается большое количество вторичных флюидных включений. Однако для исследований были отобраны пригодные первичные флюидные включения, которые располагаются в зонах роста минерала-хозяина (т. е. захвачены в ходе его роста), окружены веществом минерала-хозяина и находятся на удалении от трещин. Размер таких включений варьирует от ~ 16 до 48 мкм (см. рис. 6, а, b). Для флюидных включений из кварца были определены температуры гомогенизации в пределах от 281 до 250 °С. Температуры эвтектики имеют значения от -38 до -36 °С, это говорит о том, что главные солевые системы могут быть представлены хлоридами магния, натрия, калия и железа. В интервале температур от ~ 7,2 до 8,8 происходит плавление гидрата  $\text{CO}_2$ , что соответствует солёности ~ 5,4–2,4 мас. % экв. NaCl [19]. Температура плавления углекислоты из флюидных включений в кварце соответствует -56,6. Гомогенизация углекислоты происходила в газовую фазу при температуре 30–31 °С.

Необходимо отметить, что признаки кипения флюидов не установлены. Следовательно, измеренные температуры гомогенизации флюидных включений могут быть намного ниже температур минералообразования вследствие влияния давления. На это указывают и высокие температуры, полученные при использовании изотопно-кислородного геотермометра.

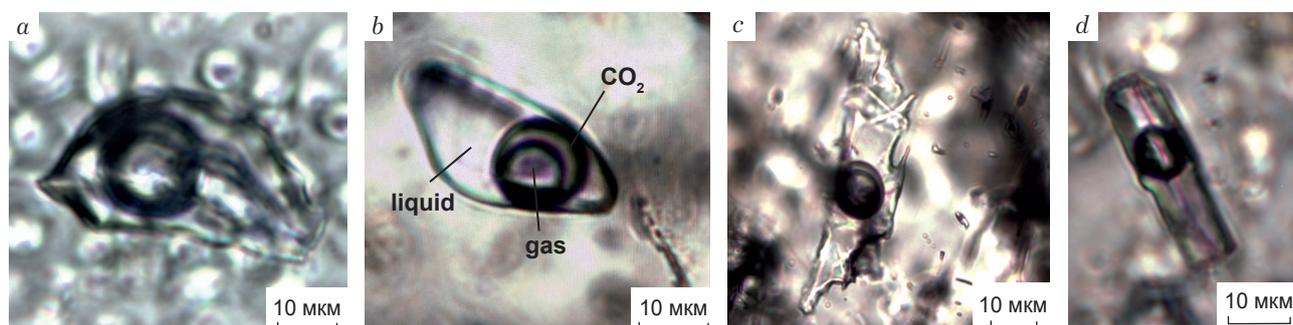


Рис. 6. Фотографии первичных флюидных включений:

*a, b* – в кварце; *c, d* – в берилле

Fig. 6. Photos of primary fluid inclusions:

*a, b* – in quartz; *c, d* – in beryl

Табл. 2. Сводная таблица результатов микротермометрических исследований

Table 2. Summary table of the results of microthermometric studies

Минерал-хозяин	$T_{\text{гом.}}$	$T_{\text{пл. льда}}$	$T_{\text{эвт.}}$	Солёность экв. NaCl, мас. %	Тип солевой системы
Кварц (богатые кварцево-молибденовые прожилки)	+314...216	-8,9...-3,9	-49,8...-55 ...-37...-38	6,3–12,7	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Кварц (бедные кварцево-молибденовые прожилки)	+312...186	-6...-4	-49,5...-53,5, -36,1...-39	6,5–9,2	CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -MgCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Берилл (кварц-берилловые прожилки)	191...265	7,3...8,1*	-55...-51...-38	*5,23–2,5	CaCl <sub>2</sub> -NaCl-H <sub>2</sub> O CaCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O CaCl-H <sub>2</sub> O MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O
Кварц (кварц-берилловые прожилки)	250...281	7,2 ...8,8*	-38... -36	*5,4–2,4	MgCl <sub>2</sub> -KCl-H <sub>2</sub> O MgCl-NaCl-H <sub>2</sub> O NaCl-FeCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O FeCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O

Примечание.  $T_{\text{гом.}}$  – температура гомогенизации,  $T_{\text{пл. льда}}$  – температура плавления льда, \* – плавления газогидрата;  $T_{\text{эвт.}}$  – температура эвтектики.



*Заключение.* Кварц-бериллиевое оруденение выделяется как самостоятельная, более поздняя по отношению к кварц-молибденитовому оруденению, стадия минералообразования. Главными жильными минералами являются кварц и берилл. Также среди жильных отмечаются калиевый полевой шпат, флюорит и мусковит. Впервые на Первомайском месторождении идентифицирован фенакит. Рудные минералы представлены молибденитом, пиритом и редкими зёрнами касситерита, халькопирита, рутила, айкинита, вульфенита, колумбита, монацита и ксенотима. На основе анализа минерального состава кварц-берилловых прожилков можно сделать вывод о том, что в составе рудообразующих растворов присутствовали такие элементы, как Si, Na, K, Al, Ca, Fe, F, S, Be, Mo, Sn, Pb, Cu, Ti, Mn, Bi, Nb, RЗЭ, P, Ba и др.

Результаты исследования флюидных включений показали, что температуры гомогенизации ФВ в берилле варьируют в интервале от 191 до 265 °С. Рудообразующие растворы характеризуются относительно низкой солёностью 5,4–2,5 экв. NaCl, главные солевые компоненты представлены хлоридами кальция с примесью хлоридов натрия, калия, магния и железа. Наличие в растворах примеси магния, возможно, может способствовать разложению берилла до фенакита [8]. В составе газовой фазы флюидных включений методом криометрии идентифицирована углекислота. Температура гомогенизации флюидных включений из кварца оказалась выше температуры гомогенизации флюидных включений из берилла и варьирует от 250 до 281 °С. Температуры эвтектики соответствуют -38 до -36 °С, это говорит о том, что главные солевые системы представлены хлоридами магния, калия, натрия и железа.

По сравнению с ранним кварц-молибденитовым оруденением стадия формирования кварц-берилловых прожилков характеризуется снижением температуры и солёности рудообразующих растворов.

Результаты изотопных исследований позволяют предполагать, что формирование бериллиевого оруденения протекало в условиях смешения магматогенных растворов и метеорных вод.

И таким образом, рудообразующие растворы, участвующие в формировании кварц-берилловой минерализации, характеризовались относительно низкой солёностью, присутствием в газовой фазе углекислоты с примесью других газов, а также хлоридным составом (хлориды кальция, натрия, калия, магния и железа). Присутствие фторсодержащих минералов свидетельствует о наличии соединений фтора в растворах. Минимальные температуры минералообразования (температуры гомогенизации) варьируют в диапазоне 191–281 °С.

Вопрос о формах переноса бериллия в гидротермальных растворах изучался многими исследователями [9, 15, 20–22]. Более детально данный вопрос рассмотрен в работах С. А. Вуда [25]. Был сделан вывод, что при температурах, близких к 300 °С, хлоридные, гидроксидные и карбонатные комплексы не могут транспортировать большие количества бериллия. По экспериментальным данным [25], максимальный перенос бериллия осуществляется в смешанных фтор-карбонатных комплексах.

*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ГИН СО РАН № АААА-А21-121011390003-9).*

## Список литературы

1. Батурина Е. Е., Рупп Г. С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии). – М.: Наука, 1984. – 152 с.
2. Баянов В. Д. Позднемезозойская шшонит-латитовая серия Джидинского рудного района (Юго-Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 1994. – Т. 339, № 3. – С. 374–377.
3. Борисенко А. С. Изучение солевого состава газозо-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. – 1977. – Т. 18, № 8. – С. 16–27.

4. Боровиков А. А., Говвердовский В. А., Борисенко А. С., Брянский Н. В., Шабалин С. И. Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W(Ве) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 4. – С. 647–662.
5. Гордиенко И. В., Гороховский Д. В., Смирнова О. К., Ланцева В. С., Бадмацыренова Р. А., Орсов Д. А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. – 2018. – Т. 60, № 1. – С. 3–37.
6. Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // Науки о Земле и недропользование. – 2020. – Т. 43, №3. – С. 290–306. – URL: <https://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>.
7. Дамдинова Л. Б., Сажина Т. И., Дамдинов Б. Б. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения // Науки о Земле и недропользование. – 2022. – № 45 (1). – С. 34–49. – URL: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49> (дата обращения: 07.02.2023).
8. Кляхин В. А., Лебедев А. С., Рагозина Т. П., Родионов А. Я. Физико-химические условия процессов минералообразования по теоритическим и экспериментальным данным. – Новосибирск, 1976. – С. 82–107.
9. Стельмачонок К. З., Ишков Ю. М. Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого месторождения // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 802–814.
10. Стельмачонок К. З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденитовом штокверковом рудном теле Джидинского месторождения (Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 341, № 3. – С. 399–402.
11. Ходанович П. Ю., Смирнова О. К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. – Новосибирск : Наука, 1991. – 208 с.
12. Хубанов В. Б., Цыганков А. А. Периодичность эндогенных событий Монголо-Забайкальского сектора ЦАСП по данным U-Pb датирования цирконов из современных речных осадков // Геодинамика и минерагения Северной и Центральной Азии: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 45-летию Геологического института СО РАН (27.08.2018–31.08.2018, Улан-Удэ) / отв. ред. Е. В. Кислов. – Улан-Удэ : Бурятский государственный университет, 2018. – С. 380–382.
13. Чернышев И. В., Гольцман Ю. В., Баурова Э. Д., Иванова Г. Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Мо месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 360, № 4. – С. 537–540.
14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications / eds. B. De Vivo, M. L. Frezzotti. – Blacksburg : Verginia Tech, 1994. – P. 117–130.
15. Burt D. M. Multisystems analysis of beryllium mineral stabilities: the system CaO-BeO-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>O // American Mineralogist. – 1978. – V. 63. – P. 664–676.
16. Chacko T., Hu X., Mayeda T. K., Clayton R. N., Goldsmith J. R. Oxygen isotope fractionation in muscovite, phlogopite and rutile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1996. – V. 60, № 14. – P. 2595–2608.
17. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Tungsten Ores of the Dzhida W-Mo Ore Field (Southwestern Transbaikalia, Russia): Mineral Composition and Physical-Chemical Conditions of Formation // *Minerals*. – 2021. – V. 11. – P. 725. – <https://doi.org/10.3390/min11070725> (дата обращения: 07.02.2023).
18. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – P. 572. – URL: <https://doi.org/10.3390/min9100572> (дата обращения: 07.02.2023).
19. Darling R. S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55. – P. 3869–3871.
20. Franz G., Morteani G. The system BeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: hydrothermal investigation of the stability of



beryl and euclase in the range from 1 to 6 kb and 400 to 800 °C // *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen)*. – 1981. – V. 140. – P. 273–299.

21. Gilbert R. A., Garrett A. B. The equilibria of the metastable crystalline form of beryllium hydroxide,  $\text{Be}(\text{OH})_2$  in hydrochloric acid, perchloric acid and sodium hydroxide solutions at 25 °C // *Journal of the American Chemical Society*. – 1956. – V. 78. – P. 5501–5505.
22. Hemingway B. S., Barton M. D., Robie R. A., Haselton H. T. Heat capacities and thermodynamic functions for beryl,  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ , phenakite,  $\text{Be}_2\text{SiO}_4$ , euclase,  $\text{BeAlSiO}_6$ , bertrandite,  $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ , and chrysoberyl,  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$  // *American Mineralogist*. – 1986. – V. 71. – P. 557–568.

23. Ripp G. S., Smirnova O. K., Izbrodin I. A., Lastochkin E. I., Rampilov M. O., Posokhov V. F. An Isotope Study of the Dzhida Mo-W Ore Field (Western Transbaikalia, Russia). – *Minerals*. – 2018. – № 8. – P. 546.
24. Vho A., Lanari P., Rubatto D. An internally-consistent database for oxygen isotope fractionation between minerals // *Journal of petrology*. – 2019. – V. 60, № 11. – P. 2101–2130.
25. Wood S. A. Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solutions to 300 °C at saturated vapor pressure: Application to bertrandite/phenakite deposits // *Ore geology reviews*. – 1992. – V. 7. – P. 249–278.

## References

1. Baturina E. E., Ripp G. S. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогении и геохимии) [Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (the main features of metallogeny and geochemistry)], Moscow, Nauka Publ., 1984, 152 p.
2. Bayanov V. D. Позднемезозойская шoshонит-латитовая серия Дзхидинского рудного района (Юго-Западное Забайкалье) [Late Mesozoic shoshonite-lattite series of the Dzhidinsky ore district (South-Western Transbaikalia)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1994, V. 339, No 3, pp. 374–377. (In Russ.).
3. Borisenko A. S. Изучение солевого состава газозидких включений в минералах методом криометрии [Studying the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1977, V. 18, No 8, pp. 16–27. (In Russ.).
4. Borovikov A. A., Goverdovskii V. A., Borisenko A. S., Bryanskii N. V., Shabalin S. I. Состав и металлонность рудообразующих флюидов Мо-В(Ве) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) [Composition and metallicity of ore-forming fluids Mo-W(Ve) of the Kalgutinskoye deposit (Gorny Altai)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2016, V. 57, No 4, pp. 647–662. (In Russ.).
5. Gordienko I. V., Gorokhovskii D. V., Smirnova O. K., Lantseva V. S., Badmatsyrenova R. A., Orsoev D. A. Dzhidinskii rudnyi raion: geologicheskoe stroenie, strukturno-metallogenicheskoe raionirovanie, geneticheskie tipy rudnykh mestorozhdenii, geodinamicheskie usloviya ikh obrazovaniya, prognozy i perspektivy osvoeniya [Dzhidinsky ore district: geological structure, structural and metallogenic zoning, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecasts and prospects of development], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 2018, V. 60, No 1, pp. 3–37. (In Russ.).
6. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Дзхидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) [Mineral composition and conditions of ore formation of the Inkursky tungsten deposit (Dzhidinskoye ore field, South-Western Transbaikalia)], *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie [Earth Sciences and subsoil use]*, 2020, V. 43, No 3, pp. 290–306, available at: <https://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306> (Accessed: 07.02.2023).
7. Damdinova L. B., Sazhina T. I., Damdinov B. B. Минералогия и условия формирования руд Холтосонского вольфрамового месторождения [Mineralogy and conditions of ore formation of the Holtoson tungsten deposit], *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie [Earth Sciences and subsoil use]*, 2022, No 45 (1), pp. 34–49, available at: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-34-49> (Accessed: 07.02.2023).

8. Klyakhin V. A., Lebedev A. S., Ragozina T. P., Rodionov A. Ya. Fiziko-khimicheskie usloviya protsessov mineraloobrazovaniya po teoricheskim i eksperimental'nym dannym [Physico-chemical conditions of mineral formation processes according to theoretical and experimental data], Novosibirsk, 1976, pp. 82–107.
9. Stel'machonok K. Z., Ishkov Yu. M. Metallonosnost' rudoobrazuyushchikh rastvorov Ermakovskogo berillievogo mestorozhdeniya [Metallicity of ore-forming solutions of the Ermakovsky beryllium deposit], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2001, V. 42, No 5, pp. 802–814. (In Russ.).
10. Stel'machonok K. Z. O blizodnovremennom formirovaniy odnosistemnykh prozhilkov v molibdenitovom shtokverkovom rudnom tele Dzhidinskogo mestorozhdeniya (Zabaikal'e) [On the near-simultaneous formation of single-system veins in the molybdenum stockwork ore body of the Dzhidinsky deposit (Transbaikalia)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1995, V. 341, No 3, pp. 399–402. (In Russ.).
11. Khodanovich P. Yu., Smirnova O. K. Vol'framonosnye berezity i lokal'nyi prognoz orudneniya [Tungsten-bearing berezites and local forecast of mineralization], Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 208 p.
12. Khubanov V. B., Tsygankov A. A. Periodichnost' endogennykh sobytii Mongolo-Zabaikal'skogo sektora TsASP po dannym U-Pb datirovaniya tsirkonov iz sovremennykh rechnykh osadkov [Periodicity of endogenous events of the Mongol-Transbaikalian sector of the CAFB according to U-Pb dating of zircons from modern river sediments], *Geodinamika i minerageniya Severnoi i Tsentral'noi Azii: materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Geologicheskogo instituta SO RAN (27.08.2018–31.08.2018, Ulan-Ude)* [Geodynamics and mineralogy of North and Central Asia: materials of the V All-Russian Scientific and practical conference dedicated to the 45th anniversary of the Geological Institute SB RAS (27.08.2018–31.08.2018, Ulan-Ude)], ed. E. V. Kislov, Ulan-Ude, Buryatskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2018, pp. 380–382.
13. Chernyshev I. V., Gol'tsman Yu. V., Bairova E. D., Ivanova G. F. Rb-Sr-geokhronometriya protsessov posledovatel'nogo formirovaniya granitov, greizenizatsii i gidrotermal'noi mineralizatsii: Dzhidinskoe W-Mo mestorozhdenie, Zapadnoe Zabaikal'e [Rb-Sr-geochronometry of the processes of sequential formation of granites, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhidinskoe W-Mo deposit, Western Transbaikalia], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1998, V. 360, No 4, pp. 537–540. (In Russ.).
14. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions, Fluid inclusions in minerals: methods and applications, eds. B. De Vivo, M. L. Frezzotti, Blacksburg, Virginia Tech Publ., 1994, pp. 117–130.
15. Burt D. M. Multisystems analysis of beryllium mineral stabilities: the system CaO-BeO-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-H<sub>2</sub>O, *American Mineralogist*, 1978, V. 63, pp. 664–676.
16. Chacko T., Hu X., Mayeda T. K., Clayton R. N., Goldsmith J. R. Oxygen isotope fractionation in muscovite, phlogopite and rutile, *Gechimica et Cosmochimica Acta*, 1996, V. 60, No 14, pp. 2595–2608.
17. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Tungsten Ores of the Dzhida W-Mo Ore Field (Southwestern Transbaikalia, Russia): Mineral Composition and Physical-Chemical Conditions of Formation, *Minerals*, 2021, V. 11, pp. 725, available at: <https://doi.org/10.3390/min11070725> (Accessed: 07.02.2023).
18. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Huang X.-W., Bryansky N. V., Khubanov V. B., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia), *Minerals*, 2019, V. 9, pp. 572, available at: <https://doi.org/10.3390/min9100572> (Accessed: 07.02.2023).
19. Darling R. S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, V. 55, pp. 3869–3871.
20. Franz G., Morteani G. The system BeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O: hydrothermal investigation of the stability of beryl and euclase in the range from 1 to 6 kb and 400 to 800 °C, *Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen) [News Yearbook of Mineralogy (Treatisement)]*, 1981, V. 140, pp. 273–299. (In Germ.)
21. Gilbert R. A., Garrett A. B. The equilibria of the metastable crystalline form of beryllium hydroxide,



- Be(OH)<sub>2</sub> in hydrochloric acid, perchloric acid and sodium hydroxide solutions at 25 °C, *Journal of the American Chemical Society*, 1956, V. 78, pp. 5501–5505.
22. Hemingway B. S., Barton M. D., Robie R. A., Haselton H. T. Heat capacities and thermodynamic functions for beryl, Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>, phenakite, Be<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, euclase, BeAlSiO<sub>6</sub>, bertrandite, Be<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(OH)<sub>2</sub>, and chrysoberyl, BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *American Mineralogist*, 1986, V. 71, pp. 557–568.
23. Ripp G. S., Smirnova O. K., Izbrodin I. A., Lastochkin E. I., Rampilov M. O., Posokhov V. F. An Isotope Study of the Dzhida Mo-W Ore Field (Western Transbaikalia, Russia), *Minerals*, 2018, No 8, p. 546.
24. Vho A., Lanari P., Rubatto D. An internally-consistent database for oxygen isotope fractionation between minerals, *Journal of petrology*, 2019, V. 60, No 11, pp. 2101–2130.
25. Wood S. A. Theoretical prediction of speciation and solubility of beryllium in hydrothermal solutions to 300 °C at saturated vapor pressure: Application to bertrandite/phenakite deposits, *Ore geology reviews*, 1992, V. 7, pp. 249–278.

---

**Сажина Татьяна Ивановна** (Skuratova.tatyana@list.ru)

аспирант, инженер

**Дамдинова Людмила Борисовна**

кандидат геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник

**Дамдинов Булат Батуевич**

доктор геол.-минерал. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией

ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411 (571.61/.62)

## О золотоносности сурьмяного и ртутного оруденения Приамурья

Степанов В. А.

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

**Аннотация.** Приведены сведения о геолого-структурном положении, составе метасоматитов, руд и золотоносности сурьмяных и ртутных месторождений и проявлений Приамурской золотоносной провинции. Установлено, что в рудах многих из них содержится самородное золото, концентрация которого достигает промышленных величин. Некоторые из золотоносных сурьмяных и ртутных месторождений служат источниками формирования россыпей золота. По составу руд, окolorудных метасоматитов и пробе самородного золота аналогами этих месторождений и проявлений являются известные золоторудные месторождения Якутии – Сарылах золотосурьмяной формации и Кючюс золотортутной. Рекомендуется проведение ревизии ряда ртутных и сурьмяных месторождений и проявлений Приамурской провинции на золото. В результате ожидается выявление месторождений золотосурьмяной и золотортутной формаций. Кроме того, проявления сурьмы и ртути могут быть признаками наличия в коренном залегании месторождений золотосульфидной формации, аналогом которых является крупное месторождение Майское (Чукотка).

**Ключевые слова:** провинция, рудная формация, месторождения, сурьма, ртуть, золото.

Для цитирования: Степанов В. А. О золотоносности сурьмяного и ртутного оруденения Приамурья. Руды и металлы. 2023. № 1. С. 40–51. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10004.

---

## On the gold content in the antimony and mercury mineralization in Priamurye

Stepanov V. A.

Research Geotechnological Center, FEB RAS (NIGTs FEB RAS),  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

**Annotation.** The data on the geological and structural position, composition of metasomatites, ores, and gold content of antimony and mercury deposits and occurrences of the Priamursky gold-bearing area are presented. It was established that the ores of many of them contain native gold, whose concentration reaches commercial values. Some of the gold-bearing antimony and mercury deposits serve as sources of the formation of gold placers. By the composition of ores, near-ore metasomatites and samples of native gold, the analogues of these deposits and occurrences are the famous gold deposits of Yakutia – Sarylakh of the gold-antimony formation and Kyuchus of the gold-mercury formation. It is recommended to audit a number of mercury and antimony deposits and occurrences in the Priamursky province for gold. As a result, it is expected to identify deposits of gold-antimony and gold-and-mercury formation. In addition, occurrences of antimony and mercury may be indicative of the presence of gold-sulfide formation deposits in the bedrock, similar to a large deposit Mayskoye (Chukotka).

**Keywords:** province, ore formation, deposits, antimony, mercury, gold.

For citation: Stepanov V. A. On the gold content in the antimony and mercury mineralization in Priamurye. Ores and metals, 2023, № 1, pp. 40–51. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10004.



В связи со значительным истощением россыпей Приамурье остро нуждается в открытии новых золоторудных месторождений. Для достижения этой цели предлагается провести ревизию на золото известных в Приамурской провинции месторождений и проявлений сурьмы и ртути. При этом могут быть выявлены промышленные золоторудные месторождения золотосурьмяной или золотортутной формаций. Аналогами могут служить известные крупные месторождения Сарылах (Якутия) золотосурьмяной формации, а также Ключос (Якутия), Ноксвилл (США) – золотортутной. Существуют и комплексные золото-сурьмяно-ртутные месторождения. Например, на Аятском месторождении Урала, открытом в 1910–1912 гг., вначале добывалась ртуть [11], затем сурьма, а в настоящее время месторождение оценивается как золоторудное (К. П. Савельева, 2000 г.). Кроме того, проявления сурьмяной и ртутной минерализации могут быть признаками наличия крупных золотосульфидных месторождений вкрапленных руд, таких как Майское (Чукотка), Олимпиадинское (Енисейский кряж) и др. [3].

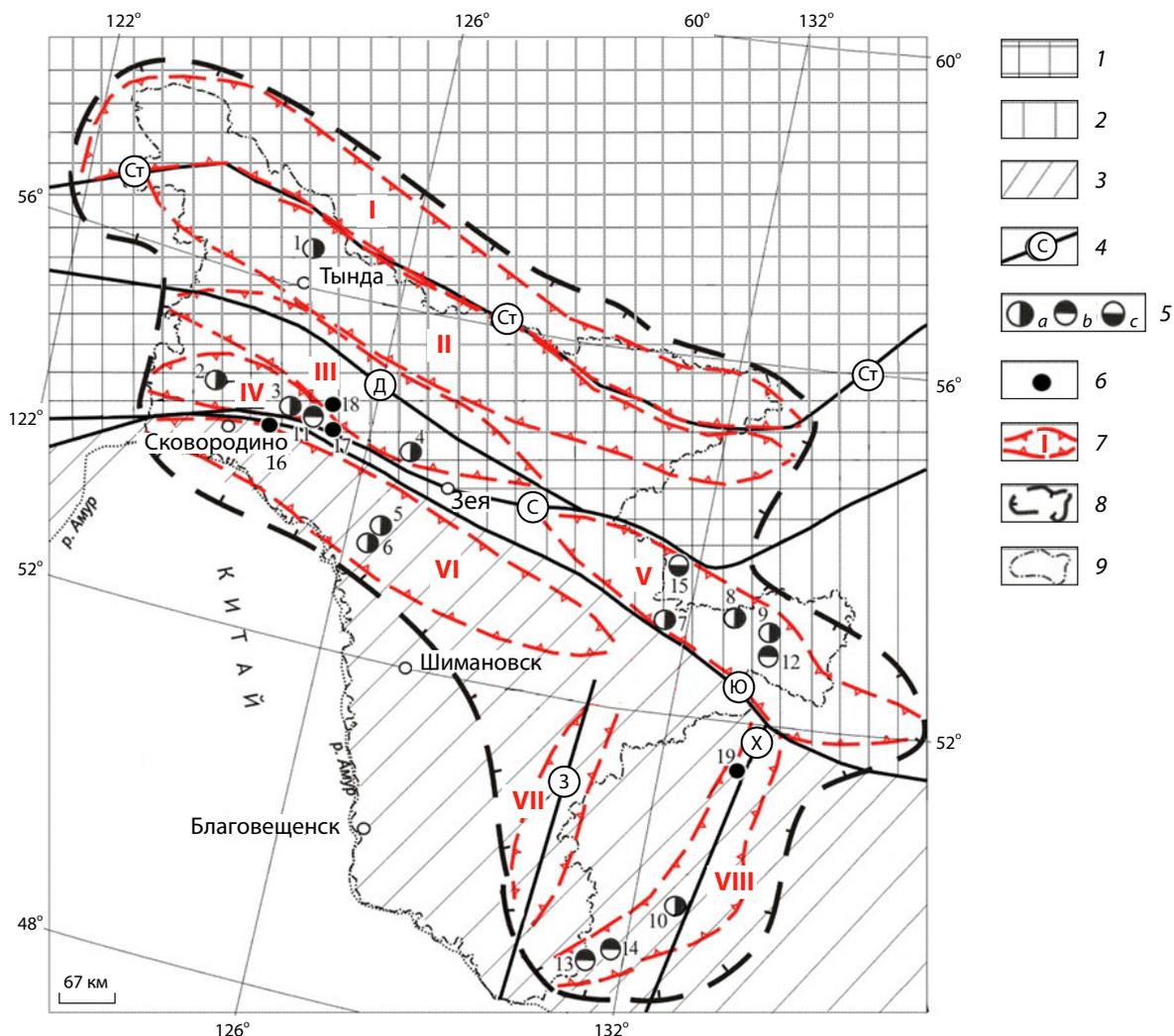
**Золоторудные, сурьмяные и ртутные месторождения Приамурья.** Приамурская золотоносная провинция занимает площадь порядка 400 тыс. км<sup>2</sup> в Амурской области России. В её пределах известно около 40 золоторудных, три сурьмяных, одно сурьмяно-флюоритовое и одно ртутное месторождение, сотни проявлений указанных металлов, а также более 1500 россыпей золота (рис. 1). Формирование золота, а также сурьмяного и ртутного оруденения произошло в позднемезозойское время в результате коллизии Алдано-Станового, Амурского и Монголо-Охотского геоблоков обрамления Сибирского и Китайского кратонов [9, 15]. Коллизия сопровождалась позднемезозойской интрузивной и вулканической деятельностью с формированием рудных месторождений указанных металлов. В более позднее, преимущественно четвертичное, время за счёт разрушения золотой минерализации были образованы россыпи золота. В провинции выделены Южно-Якутская, Се-

веро-Становая, Желтулакская, Янканская, Джагды-Селемджинская, Северо-Буреинская, Туранская и Восточно-Буреинская металлогенические зоны, а в их пределах – десятки рудно-россыпных узлов (РРУ). Золоторудные месторождения отнесены к золотокварцевой (Золотая Гора, Токур, Албын и др.), золотосульфидно-кварцевой (Бамское, Кировское, Пионер и др.), золотосеребряной (Покровское и др.), золотополиметаллической (Березитовое) и золотосульфидной (Маломыр) формациям.

Сурьмяное и ртутное оруденение в Приамурской провинции известны с середины прошлого века, но сведений о золотоносности сурьмяных и ртутных месторождений и проявлений немного. Всего на территории Приамурской провинции находится три сурьмяных, одно сурьмяно-флюоритовое и одно ртутное месторождение, а также десятки проявлений сурьмы и ртути.

**Сурьмяное оруденение.** К сурьмяным относятся Малоурканское, Ленинское и Солокачинское, а также сурьмяно-флюоритовое Богучанское месторождения и ряд проявлений сурьмы.

**Малоурканское сурьмяное месторождение** расположено в пределах Соловьевского рудно-россыпного узла (РРУ) Янканской металлогенической зоны, на левобережье р. Малый Уркан. Оно приурочено к зоне Северо-Тукурингрского регионального разлома, разделяющего Алдано-Становой и Монголо-Охотский геоблоки. Месторождение открыто в 1910 г. старателями, в 1937–1938 гг. на нём производились поисково-разведочные работы и частичная отработка [10]. Вмещающими породами для оруденения являются граниты верхнеурканского комплекса со скиалитами и ксенолитами гнейсов и кристаллосланцев нижнего архея. Рудные тела кварц-антимонитового и кварц-барит-антимонитового составов локализованы в зонах дробления северо-восточного простирания, оперяющих разлом широтного простирания. Они сопровождаются дайками лампрофиров позднемезозойского возраста. Известны семь рудных тел северо-восточного простирания (от 20–25 до 45–55°),



**Рис. 1. Золотые, сурьмяные и ртутные месторождения Приамурской золотоносной провинции:**

геоблоки: 1 – Алдано-Становой, 2 – Монголо-Охотский, 3 – Амурский; 4 – региональные разломы (Ст – Становой, С – Северо-Тукурингрский, Ю – Южно-Тукурингрский, Д – Джелтулакский, З – Западно-Туранский, Х – Хинганский); 5 – рудные месторождения: а – золота (1 – Бамское, 2 – Березитовое, 3 – Кировское, 4 – Золотая Гора, 5 – Пионер, 6 – Покровское, 7 – Маломыр, 8 – Токур, 9 – Албын, Харгинское, 10 – Нони), б – сурьмы (11 – Малоурканское, 12 – Ленинское, 13 – Богучанское, 14 – Солокачинское), с – ртути (15 – Ланское); 6 – золотортутные проявления (16 – Старый Янкан, 17 – Глебовское, 18 – Двойное, 19 – Йорик); 7 – границы металлогенических зон (I – Южно-Якутская, II – Северо-Становая, III – Джелтулакская, IV – Янканская, V – Джагды-Селемджинская, VI – Северо-Буреинская, VII – Туранская, VIII – Восточно-Буреинская); 8 – контур Приамурской провинции; 9 – граница Амурской области

**Fig. 1. Gold, antimony and mercury deposits of the Priamursky gold-bearing area:**

geoblocks: 1 – Aldan-Stanovoi, 2 – Mongol-Okhotsk, 3 – Amur; 4 – regional faults (Ст – Stanovoi, С – North-Tukurinskii, Ю – South-Tukurinskii, Д – Jeltulak, З – West-Turan, Х – Khingan); 5 – ore deposits: a – gold (1 – Bamskoye, 2 – Berezitovoye, 3 – Kirovskoye, 4 – Zolotaya Gora, 5 – Pioneer, 6 – Pokrovskoye, 7 – Malomyr, 8 – Tokur, 9 – Albyn, Kharginzkoye, 10 – Noni), b – antimony (11 – Malaorkanskoye, 12 – Leninskoye, 13 – Boguchanskoye, 14 – Solokachi), c – mercury (15 – Lanskoye); 6 – gold-mercury occurrences (16 – Stary Yankan, 17 – Glebovskoye, 18 – Dvoynoye, 19 – Yorik); 7 – boundaries of metallogenic zones (I – South-Yakutian, II – North-Stanovaya, III – Dzeltulakskaya, IV – Yankanskaya, V – Dzhagdy-Selemdzhinskaya, VI – North-Bureinskaya, VII – Turanskaya, VIII – East-Bureinskaya); 8 – the boundary of Priamursky gold-bearing area; 9 – boundary of Amur Region



круто наклонённых (70–85°) на юго-восток и протяжённостью до 1000 м. Они характеризуются переменной мощностью (0,05–0,6 м), что придаёт им линзовидный облик.

Из нерудных минералов преобладают белый и розовый кварц нескольких генераций, халцедоновидный кварц и халцедон, а также барит. Рудные минералы – антимонит, киноварь, галенит, арсенопирит, пирит, золото; в зоне окисления встречаются сурьмяные охры и англезит. В большинстве случаев антимонит тонко рассеян в халцедоновидном кварце, окрашивая его в синий цвет. Реже встречаются кристаллы антимонита размером до 2–3 см, иногда радиально-лучистые агрегаты до 10 см. Нередко этот минерал, отлагавшийся совместно с халцедоном, цементирует в виде скоплений агрегатов с извилистыми прожилками обломки пород и кварца. Местами он обособляется в гнёздах, иногда его игольчатые кристаллы заполняют пустоты в кварце. В жиле № 2 антимонит с незначительной примесью кварца образует рудные гнёзда весом до 150 кг. Содержание сурьмы в отдельных рудных телах колеблется в широких пределах от 0,38 до 21,03 %. Среднее содержание сурьмы на месторождении 2 %. Содержание золота в рудах достигает промышленных величин – 0,8–1,5 г/т. Околожилные изменения сводятся к интенсивному осветлению, каолинизации и окварцеванию вмещающих пород с образованием серицита, каолина, хлорита и охр красновато-бурого цвета. Мощность окколорудных изменений достигает нескольких метров (до 15 м). Из месторождения извлечено 91 тыс. т сурьмяного концентрата. Оставшиеся запасы сурьмы кат. С<sub>2</sub> составляют 4212 т. В 1941 г. месторождение было законсервировано. При доразведке в 1961 г. скважиной глубиной 350 м были вскрыты ещё 10 кварц-антимонитовых жил мощностью 0,05–0,3 м с содержанием сурьмы 3–4 % и золота до 1,4 г/т [6].

В долине р. Малый Уркан непосредственно вблизи месторождения имеется россыпь, из которой добыто более 20 т золота. Золото мелкое, высокопробное (929–943 ‰), иногда в сростках с сульфидами [8]. Отметим, что золото высокой пробы характерно для крупных месторождений золотосурьмяной формации,

например для месторождения Сарылах (Якутия).

*Ленинское сурьмяное месторождение* находится в пределах Харгинского РРУ Джагды-Селемджинской металлогенической зоны, в среднем течении р. Талам и её притоков, ручьёв Ингалим и Весёлый. Оно выявлено в 1930 г., а в 1931–1932, 1938–1942 и 1952 гг. опосковано, разведано и частично отработано. Месторождение приурочено к Монголо-Охотскому геоблоку и представлено серией минерализованных зон дробления с кварц-антимонитовыми жилами, зонами брекчирования и линзами кварц-сульфидного состава среди кварц-серицитовых сланцев златоустовской свиты среднего карбона, прорванных дайками «пёстрого» состава мелового возраста. Всего установлено 48 рудных тел мощностью от 0,015 до 4 м (чаще 0,1–1 м) и протяжённостью до 500–800 м. С глубиной оруденение затухает и прослеживается не более чем на 100 м. Тела представлены минерализованными зонами дробления и окварцевания с вкрапленностью антимонита (часто образующего гнёзда и линзы), пирита, арсенопирита, сфалерита, галенита, золота, шеелита и киновари. Из нерудных минералов отмечаются кварц нескольких генераций (сахаровидный, белый шестоватый, гребенчатый, халцедоновидный) и карбонаты. Среднее содержание сурьмы в рудах 6,9 %. Попутные элементы представлены (%) мышьяком (0,08), свинцом (0,004), молибденом (0,0004), цинком (0,004), вольфрамом (0,001), медью (0,002). Химическим анализом установлены золото (до 6,25 г/т), серебро (до 15 г/т) [8]. Запасы сурьмы оцениваются в 8 тыс. т (кат. С<sub>1</sub> + С<sub>2</sub>). В процессе отработки добыто 511 т антимонитового концентрата [1]. В находящейся вблизи месторождения россыпи руч. Ингалим расположена россыпь, из которой добыто около 0,45 т золота. Золото мелкое и средних размеров, проба высокая (897 ‰) [8].

Солокачинское сурьмяное и Богучанское сурьмяно-флюоритовое месторождения расположены на юго-восточном фланге Амурского геоблока в пределах Восточно-Буреинской металлогенической зоны Приамурской провинции.



*Месторождение Солокачинское* находится в 60 км северо-восточнее ж/д станции Облучье. Оно открыто в 1906 г. охотником К. С. Мезенцевым. Образцы богатой руды, посланные им в Благовещенскую химическую лабораторию, показали содержание сурьмы 64 %. В 1936–41 гг. на месторождении и в его окрестностях «Бурейстроем», трестом «Амурзолото» и ДВГУ были проведены поисковые и разведочные работы. В 1950–54 гг. была проведена детальная разведка месторождения (С. Ф. Усенко, А. Ф. Американцев, 1954 г.). Месторождение приурочено к зоне разлома северо-западного простирания, секущего граниты кивийского комплекса палеозойского возраста. В зоне разлома оконтурены 11 оруденелых зон дробления, из которых девять являются промышленными. Длина их колеблется от 10 до 500 м при глубине залегания от 54 до 226 м, средняя мощность – 0,34–1,59 м. Рудные тела сложены окварцованными брекчированными гранитами с густой сетью кварцевых и сульфидно-кварцевых жил и прожилков с гнездами и вкрапленностью антимонита. Совместно с ним в небольшом количестве встречаются пирит, халькопирит, арсенопирит и касситерит. В зоне окисления встречаются вторичные минералы сурьмы: сервантит, валентинит, кермизит. Текстуры руд массивные, брекчиевые, прожилковые, вкрапленные и тонкодисперсные. Максимальная глубина оруденения 220 м. Содержание сурьмы в рудах от 1 до 30 %, в среднем 3,68 %. Основные запасы сурьмы приурочены к контакту гранитов и архейских гнейсов. На контактах с рудными телами вмещающие породы окварцованы, карбонатизированы, пиритизированы, серицитизированы и каолинизированы. Запасы сурьмы на Солокачинском месторождении составляют по кат.  $C_1$  – 7953 т сурьмы, 216 тыс. т руды со средним содержанием 3,84 %, по кат.  $C_2$  – 3656 т сурьмы, 82 тыс. т руды со средним содержанием 4,76 %. Попутным элементом является вольфрам с содержанием 0,1–1,0 %. Сведения о содержании золота отсутствуют [7, 12].

*Месторождение Богучанское* находится в 6 км к северу от с. Сагибово. Оно впервые описано в 1894 г. горным инженером Л. Ф. Баце-

вичем. В 1940–41 гг. на месторождении проведены поисковые работы, а в 1941–1943 гг. и в 1958 г. выполнена его разведка (М. И. Титов, 1943 г.). Месторождение представлено серией жил флюорита и антимонит-кварцевых прожилков, составляющих одно рудное тело протяженностью 450 м. Оно приурочено к меридиональному крутонаклонному разлому в риолитах, туфоконгломератах и туфах богучанской и кундурской свит верхнего мела. Мощность рудного тела 1,5–13 м при максимальной мощности жил чистого флюорита 1 м. Флюорит ассоциирует с халцедоновидным кварцем и опалом. Во вмещающих породах отмечается пиритизация и окремнение. В рудах присутствуют антимонит и киноварь. Сурьмяное оруденение представлено антимонитом, вкрапленным в кварцевые прожилки. Руды убогие с содержанием сурьмы 1–3 %, но в отдельных штуфах до 26 %. Флюорит крупнокристаллический, сравнительно чистый, с преобладающей зелёной окраской. Содержание флюорита в руде 87,03 %. Средний выход кондиционного флюорита 20 % при извлечении его 33 %. Остальной флюорит может извлекаться при помощи флотации. Содержание сурьмы в руде 0,03–0,07 %. Помимо сурьмы в пробах отмечены (%): бериллий 0,001–0,003, галлий до 0,001, свинец до 0,03, цинк до 0,03, таллий до 0,003, олово до 0,03 %, уран до 0,01 %. Запасы флюорита месторождения по кат. А + В + С составляют 840 т, забалансовые – 1670 т (А. И. Шаповаленко, 2003 г.).

*Ртутное оруденение.* Ртутное оруденение сосредоточено главным образом в восточной части провинции в узкой полосе Монголо-Охотского геоблока, ограниченной зонами Северо-Тукурингского и Южно-Тукурингского разломов [14]. Здесь известно около двух десятков проявлений и месторождение ртути Ланское. По классификации В. П. Федорчука [16] они относятся к двум основным типам ртутного оруденения – кварц-диккитовому и листовенитовому.

*Месторождение Ланское* расположено на востоке Амурской области, в бассейне р. Шавли. Оно представлено минерализованными зонами дробления среди терригенных толщ



пермского возраста, в приядерной части линейной антиклинальной складки. Рудные тела контролируются зонами дробления, оперяющимися региональный Ланский разлом. Руды представлены тектоническими брекчиями, частично замещёнными диккит-гидрослюдисто-кварцевым агрегатом. Жильные минералы – низкотемпературный кварц, железистые карбонаты, гидрослюды, кальцит, диккит. Среди рудных минералов преобладает киноварь, иногда встречается самородная ртуть, реже метациннабарит, реальгар, аурипигмент, антимонит и пирит, а также золото и шеелит. На месторождении разведаны пять рудных тел. Самое крупное – Ветвистое. Его длина 300 м, мощность 0,8–6,2 м (средняя 2,5 м). Тело по падению прослежено на 160 м, среднее содержание ртути 0,46 %, примесь золота достигает 1,5 г/т (М. Т. Турбин, 1981 г.). Месторождение кварц-диккитового типа. По данным атомно-абсорбционного анализа, киноварь месторождения содержит примесь золота в количестве от 1,27 до 13 г/т, а самородная ртуть – до 335 г/т [14]. Запасы ртути по кат. С<sub>2</sub> составляют 512 т, прогнозные ресурсы рудного поля – 3 тыс. т (кат. Р<sub>1</sub>) и 7 тыс. т (кат. Р<sub>2</sub>). Западнее и южнее Ланского месторождения установлены ртутные проявления Грохотун, Огджено, Туманное, Жёлтое, Юбилейное, Красное. Они представлены зонами дробления в терригенных породах пермского и триасового возрастов. Гидротермальные изменения представлены карбонатизацией, окварцеванием и диккитизацией. Мощность зон от 1 до 10 м, протяжённость от десятков до первых сотен метров. Содержание ртути колеблется от 0,2 до 1–3 %. Из рудных минералов кроме киновари часто отмечаются антимонит, реальгар и аурипигмент. Оруденение кварц-диккитового типа. Прогнозные ресурсы ртути Ланского рудного узла по кат. Р<sub>3</sub> оцениваются в 15 тыс. т. [13].

За пределами Ланского ртутно-рудного узла наибольший интерес представляют комплексные золотортутные проявления Старый Янкан, Глебовское, Двойное, расположенные в пределах Соловьёвского РРУ Янканской ме-

таллогенической зоны, а также проявление Иорик Ерикского РРУ Восточно-Буреинской металлогенической зоны. Наиболее изученным является проявление Иорик.

*Золотортутное проявление Иорик* находится на юго-востоке Амурской области, в верховьях р. Большой Иорик [7]. В долине реки располагается небольшая россыпь золота, берущая начало с проявления Иорик. Золото крупное, встречаются самородки весом до 5 г. По существу, золотортутное проявление представляет собой рудную зону № 4 Афанасьевского месторождения ртути (З. Л. Кохановская, 1953 г.; Е. А. Пономарёва и др., 1958 г.). Рудное поле сложено терригенными породами талынджанской свиты позднеюрского-раннемелового возраста (песчаники, алевролиты и аргиллиты), прорванными многочисленными пологозалегающими силлами диорит-порфиров, а также микродиоритов раннемелового возраста (рис. 2). Широко развиты пологие разрывные нарушения меридионального простирания, наклонённые на запад под углами 25–38°. Чаще всего они располагаются вдоль контакта силлов с терригенными породами. Зоны нарушений представлены брекчированными и раздробленными породами мощностью до 10 м. Вблизи них песчаники, алевролиты и аргиллиты осветлены, окварцованы и сульфидизированы. Диорит-порфириты подвергнуты каолинизации и нередко превращены в белую глинистую массу с участками сильно окварцованных и пиритизированных пород.

Золотортутное оруденение приурочено к брекчированным и раздробленным породам, подвергнутым окварцеванию, каолинизации и пиритизации. Выделяются два типа рудоносных зон: существенно ртутные слабозолотоносные (зоны № 1–3) и существенно золотоносная (рудная зона № 4). Первые три располагаются среди осадочных пород. Простирание близко к меридиональному, наклон западный (25–30°).

Рудная зона № 1 приурочена к лежачему боку силла диоритовых порфиров. Она прослежена по простиранию на 110 м при мощности от 9 до 27 м. Рудоносные брекчии

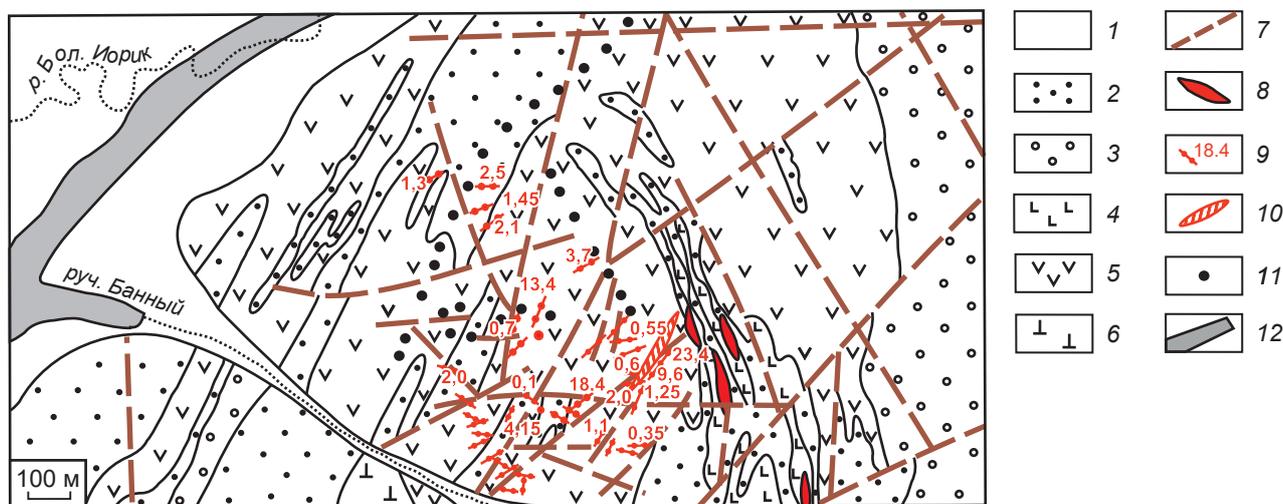


Рис. 2. Схематическая геологическая карта рудопоявления Иорик (по Е. А. Пономарёвой и др., 1958 г.):

1 – аллювиальные отложения; талынджанская свита позднеюрско-раннемелового возраста: 2 – верхний горизонт (аргиллиты, алевролиты), 3 – средний горизонт (песчаники); 4 – амфиболовые порфириты; 5 – диорит-порфириты; 6 – микродиориты; 7 – разрывные нарушения; 8 – ртутоносные рудные тела; 9 – зоны дробления и кварцевые прожилки с содержанием золота, г/т; 10 – золотоносная зона № 4; 11 – шлиховые пробы из делювия с золотом; 12 – золотоносные россыпи

Fig. 2. Schematic geological map of the Yorik ore occurrence (by E.A. Ponomareva et al., 1958):

1 – alluvial deposits; Talyndzhan Formation of Late Jurassic-Early Cretaceous age: 2 – upper horizon (mudstones, siltstones), 3 – middle horizon (sandstones); 4 – amphibole porphyrites; 5 – diorite-porphyrites; 6 – microdiorites; 7 – faulting; 8 – mercury-bearing ore bodies; 9 – crushing zones and quartz veins with gold content, g/t; 10 – gold-bearing zone No. 4; 11 – schlich samples from deluvium with gold; 12 – gold-bearing placers

представлены обломками окварцованных и пиритизированных пород, сцементированных окварцованным и лимонитизированным материалом. В цементе брекчий наблюдается киноварь в виде вкрапленников, прожилок и гнёзд, а также вкрапленность пирита, молибденита и золота. Золото встречается в виде мелких зёрен. Содержание ртути по данным бороздowego опробования достигает 0,1 %.

Рудная зона № 2 расположена на 50–60 м западнее первой. Длина её 200 м при ширине от 3 до 12 м. Ртутное оруденение приурочено к тектоническому нарушению в лежащем контакте силла диорит-порфиритов. Руды представлены трещиноватыми и подроблёнными роговиками, в которых трещины заполнены киноварью. Содержание ртути в зоне достигает в отдельных пробах 0,43 %. Золото в виде единичных знаков встречено в породах висячего бока зоны.

Рудная зона № 3 – южное продолжение зоны № 1. Она протягивается на 320 м при мощности от 5 до 30 м и представлена серией сближенных пологих нарушений среди диорит-порфиритов и терригенных пород. Рудноносными являются брекчии раздробленных и окварцованных пород. Вблизи них осадочные породы осветлены, сульфидизированы и окварцованы, а диорит-порфириты каолинизированы и превращены в розовато-белую глину. Максимальное содержание ртути достигает 1,5 %. Рудный интервал мощностью 2 м со средним содержанием ртути 0,27 % прослежен скважинами на глубину 60 м. Киноварная минерализация сопровождается пиритом, арсенопиритом, иногда молибденитом и золотом. Золото встречается в виде мелких знаков. Содержание его в одной из бороздových проб составляет по данным пробирного анализа 2,4 г/т.



Рудная зона № 4 (проявление Иорик) содержит золотортутное оруденение. Зона ориентирована в северо-восточном направлении, почти перпендикулярно по отношению к описанным выше рудоносным, и сочленяется с ними в районе северного фланга рудной зоны № 2. Она круто, под углами 75–80°, наклонена на юго-восток. Длина зоны около 100 м при мощности от 2 до 10 м. Вмещающими породами служат диорит-порфириды. Рудоносными являются брекчии, представленные обломками пиритизированных роговиков, сцементированных окварцованным и лимонитизированным материалом. Вблизи них диорит-порфириды осветлены, окварцованы и пиритизированы. В цементе брекчий отмечаются гнезда пирита и зёрна киновари, нередко отмечаются знаки золота. Содержание ртути в зоне невысокое (0,01–0,04 %), а золота меняется от следов до 2,6 г/т. В канаве № 2 выделяется интервал мощностью 3,6 м при среднем содержании золота 1,7 г/т.

Золото в единичных и редких знаках часто обнаруживается в делювии канав, расположенных непосредственно к западу от рудоносных зон. Здесь же отмечаются многочисленные кварцевые прожилки и жилы с содержанием золота до 23,4 г/т. Некоторые из них расположены непосредственно вблизи рудной зоны № 4. В скважине № 1, пройденной между рудными зонами № 2 и 4, отмечаются окварцованные и брекчированные вторичные кварциты. На глубине 160 м в кварцитах по данным пробирного анализа установлено золото в количестве 3,4 г/т на мощность 3 м (Ю. И. Камышев и др., 1962 г.).

Общий структурный план золотортутного рудопроявления представляется в следующем виде. Рудная зона № 4, приуроченная к интрузии диорит-порфиритов, представляет собой крутонаклонную рудоподводящую структуру с золотортутным оруденением. Пологозалегающие под экранирующим влиянием силлов диорит-порфиритов рудные зоны № 1–3 представляют собой верхнюю часть рудной колонны с существенно ртутным оруденением.

*Проявление Старый Янкан* располагается в западной части Амурской области среди сланцев раннего протерозоя и серпентинитов

палеозоя. Рудные тела сложены зонами лиственитизации с кварц-карбонатным материалом и вкрапленностью киновари. Мощность зон от 1–2 до 10 м, протяжённость до 170 м. В протолочных пробах отмечаются знаки золота. Содержание ртути достигает 0,1 %, золота от 0,4 до 1 г/т (В. Е. Проскурников и др., 1961 г.).

В долине р. Большой Янкан имеется россыпь, из которой добыто 6,5 т золота. Золото от мелкого до крупного, имеются самородки весом до 64 г. Проба его высокая (870–950 ‰).

*Проявление Глебовское* расположено в бассейне руч. Глебовского, правого притока р. Большой Уркан. Оно представлено зоной лиственитизации в серпентинитах. Зона прослежена по простиранию на 170 м при мощности 2,5–7,5 м. Простирание её субширотное – северо-западное (290°). Содержание ртути в бороздовых пробах 0,03–0,06 % (химический анализ). Спектральным анализом в бороздовых пробах определены (%): сурьма (0,01–0,07), хром (0,007–2), никель (0,007–0,3). Киноварь образует мелкую вкрапленность в породе или цепочки зёрен по зальбандам маломощных кварц-карбонатных или баритовых прожилков. Минералогическим анализом в штучных пробах из отвалов канав установлены киноварь, пирит, пирротин, антимонит, барит, малахит. По данным пробирного анализа штучных проб содержание золота достигает 2,5 г/т.

В долине руч. Глебовского имеется россыпь, из которой добыто 2,7 т золота. Золото мелкое (0,15–1,5 мм), высокопробное (900–975 ‰). В качестве минералов-примесей в россыпи отмечается киноварь.

*Проявление ртути Двойное* кварц-диккитового типа расположено в борту руч. Мохового, правого притока верховьев р. Большой Уркан. Оно представлено зоной брекчирования по песчаникам позднеюрского–раннемелового возраста. Мощность зоны 1–2 м при длине около 220 м. Киноварь в виде жил и прожилков приурочена к интенсивно диккитизированным породам. Одна из жил мономинеральной киновари имеет мощность 0,5 м. Содержание ртути в бороздовых пробах достигает 0,1–1 %, иногда до 20 %. Примесь золота в отдельных пробах достигает 4 г/т.

Киноварь содержит примесь золота от 0,3 до 3,48 г/т [14].

По руч. Моховому имеется небольшая россыпь, из которой добыто 50 кг золота. Золото мелкое, высокопробное (905–960 ‰).

**Эталонные месторождения.** Эталонным для ртутных месторождений и проявлений диккитового типа Приамурья (месторождение Ланское, проявления Двойное, Иорик и др.) служит золотортутное месторождение Кючюс (Якутия), а для листовитового типа – месторождение Ноксвилл (США). Для сурьмяных месторождений в качестве эталона рассмотрено золотосурьмяное месторождение Сарылах (Якутия).

Крупное золоторудное месторождение Кючюс золотортутной формации расположено на правом берегу р. Яна Якутии [5]. Вмещающими служат песчано-алевролитовые толщи позднего триаса верхоянского комплекса. Интрузивные породы в районе месторождения отсутствуют. Рудовмещающей структурой является линейно вытянутая система разломов, круто наклонённая на северо-запад (50–75°). Рудные тела представлены зонами брекчий, вкрапленной и прожилковой минерализации. Руды состоят из аргиллизированных, брекчированных и перемятых алевролитов, аргиллитов и песчаников с прожилково-вкрапленной кварцевой и сульфидной минерализацией. Из рудных минералов преобладают пирит, игольчатый арсенопирит, антимонит, киноварь и золото. Реже отмечаются реальгар, самородная ртуть, блёклая руда, бертьерит, халькопирит, сфалерит, галенит, бурнонит и пирротин. Основную ценность руд представляет золото, а ртуть находится в концентрациях, пригодных для попутной добычи. Золото свободное и связанное в арсенопирите и пирите. Самородное золото высокой пробы (790–987 ‰), примесь в нём ртути колеблется в пределах от 0,77 до 12,5 %, серебра от 0,10 до 12,27 %.

Золотортутное месторождение Ноксвилл находится в Калифорнии, в 70 км севернее г. Сакраменто. Вмещающими породами служат серпентинизированные ультрабазиты третичного возраста [17]. Рудные тела распола-

гаются в зонах дробления и метасоматитах кремнисто-карбонатного состава (лиственитах), приуроченных к разлому северо-западного простирания. Оруденение вкрапленного типа. Основной рудный минерал – метациннабарит, широко развиты также киноварь, золото, электрум, золотосодержащий пирит, прустит, пираргирит, марказит, антимонит и самородная ртуть. В верхних частях месторождения развита зона окисления, в которой присутствуют киноварь и самородное золото. Попутно с золотом из руд извлекают серебро и ртуть с соотношением Au : Ag : Hg = 1 : 2 : 2.

Золотосурьмяное месторождение Сарылах находится на северо-востоке Якутии, в 30 км к юго-западу от пос. Усть-Нера. Вмещающими служат песчаники, алевролиты и аргиллиты поздне триасового возраста, которые смяты в крупную антиклинальную структуру. Месторождение приурочено к минерализованной зоне дробления северо-западного простирания, которая прослеживается по простиранию и падению на сотни метров. Рудное тело представлено кварц-антимонитовой жиллой с раздувами и пережимами, мощность её изменяется от 0,05–0,1 до 3–3,3 м. Висячем боку жилы преобладают массивные мелкокристаллические сурьмяные руды. В лежачем боку развит молочно-белый или полупрозрачный кварц с редкой вкрапленностью и отдельными прожилками и гнёздами антимонита. Меньшим распространением пользуются самородное золото, пирит, арсенопирит, галенит и шеелит. Золото мелкое и тонкое, проба его исключительно высокая (960–990 ‰), примесь ртути составляет 0,1–0,46 % [4]. В приповерхностных участках жилы антимонит частично окислен и замещён сенармонтитом и валентинитом. Из руд месторождения добываются сурьма и золото.

**Обсуждение результатов.** Приведённый обзор месторождений и проявлений сурьмы и ртути Приамурской провинции показал, что на некоторых из них содержания золота достигают промышленных величин. Так, на Ланском ртутном месторождении примесь золота в отдельных пробах достигает 1,5 г/т, на золотортутном проявлении Иорик – 2,6 г/т, а в от-



дельных кварцевых прожилках – 23,4 г/т. Проявления ртути Двойное, Старый Янкан и Глебовское Соловьевского узла также золотоносны на уровне до 2,5–4,0 г/т. Высокие содержания примеси золота отмечают также в киновари проявления Двойное, а также киновари и самородной ртути Ланского месторождения. Самородное золото отмечается в рудах месторождения Ланское, проявлений Иорик и Старый Янкан. За счёт многих из золотоносных сурьмяных и ртутных месторождений и проявлений образованы россыпи золота, что указывает на существенное содержание золота в их рудах. Золото в россыпях, берущих начало из района ртутных и сурьмяных проявлений, обычно мелкое, высокопробное, что характерно для ряда золотортутных и золотосурьмяных месторождений [14]. В качестве минералов-примесей в россыпях золота нередко отмечается киноварь.

Судя по имеющимся данным, проявления ртути Ланского, Соловьевского и Ерикского рудных узлов слабо опоискованы на золото. В их пределах возможно выявление золоторудных месторождений кючюсского типа золотортутной формации. Аналогом их служит крупное золотортутное месторождение Кючюс, расположенное в Якутии среди песчано-алевролитовых толщ верхоянского комплекса. Оно сходно по геологической позиции, составу руд окolorудных метасоматитов с ртутными проявлениями кварц-диккитового типа Приамурья.

Аналогом ртутных проявлений листовитового типа Глебовское и Старый Янкан Соловьевского РРУ может быть месторождение Ноксвилл (США). Как и указанные проявления, оно расположено в массиве ультрабазитов и приурочено к зоне листовитизации с золотортутной минерализацией.

Сурьмяные месторождения провинции были опоискованы и разведаны в первой половине XX века. Золотоносность их изучена слабо, поэтому сурьмяные месторождения и проявления нуждаются в ревизионных работах на благородные металлы. Одним из эталонов для поисков может быть золоторудное месторождение Сарылах, схожее по геолого-структурной позиции, вмещающим породам, ме-

тасоматитам и минеральному составу антимонит-кварцевых рудных тел с сурьмяными месторождениями Приамурья.

При ревизии ртутных и сурьмяных проявлений особое внимание следует обратить на зоны сульфидной вкрапленности. Они могут представлять интерес при выявлении золотосульфидных месторождений. Примером таких месторождений может служить крупное золоторудное месторождение Майское, в пределах которого имеются антимонит-кварцевые жилы. Сурьмяные и ртутные проявления могут быть признаками наличия золотосульфидных минерализованных зон.

Крупное по запасам золота Майское золоторудное месторождение золотосульфидной формации находится в Чаунском районе Чукотского автономного округа в 150 км к юго-востоку от районного центра г. Певек. Вмещающие породы представлены песчано-алевросланцевыми отложениями кевеевской свиты среднего триаса, интрузивные породы – комплексом даек гранодиорит-порфиров, лампрофиров и риолит-порфиров ранне-поздне-мелового возраста [2]. Рудные тела Майского месторождения представлены сульфидизированными линейными зонами дробления и смятия субмеридионального простирания. Основными рудными минералами являются золотоносный игольчатый арсенопирит и мышьяковистый пирит. Значительная часть золота тонкодисперсной размерности входит в состав этих сульфидов. Другая генерация золота с повышенными содержаниями серебра, ртути и селена выявлена в кварц-антимонитовых жилах.

**Заключение.** Приведённые в статье материалы по геолого-структурной позиции и составу руд сурьмяных и ртутных месторождений Приамурской провинции указывают на сходство их с известными крупными месторождениями золотосурьмяной и золотортутной формаций. Наличие в рудах ряда месторождений и проявлений сурьмы и ртути самородного золота и повышенных концентраций благородных металлов позволяют рекомендовать ревизию сурьмяных и ртутных месторождений и проявлений Приамурской золо-



тоносной провинции на золото. Кроме того, проявления сурьмы и ртути нередко являются признаками наличия минерализованных зон золотосульфидных месторождений. Поэ-

тому при ревизионных работах могут быть выявлены новые золоторудные месторождения не только золотосурьмяной и золотортутной, но и золотосульфидной формации.

## Список литературы

1. Агафоненко С. Г., Усов И. О. [и др.]. Государственная геологическая карта РФ. Лист N-53-XXVI. Объяснительная записка. – М. : ВСЕГЕИ, 2015. – 98 с.
2. Артемьев Д. С. Особенности геологического строения и вертикальной зональности рудных тел Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка) // Региональная геология и металлогения. – 2015. – Т. 64. – С. 94–100.
3. Волков А. В. Золото-сульфидные месторождения вкрапленных руд Северо-Востока России: особенности геолого-генетической и поисковой модели // Золото и технологии. – 2021. – № 4 (54). – С. 48–59.
4. Галкин М. А. Минеральные ассоциации на ртутных месторождениях Северо-Востока Якутии // Доклады Академии наук СССР. – 1966. – Т. 169, № 2. – С. 438–440.
5. Коньшиев В. О., Жидков С. Н., Степанов В. А. Золотортутное месторождение Кючюс // Колыма. – 1993. – № 3. – С. 11–15.
6. Кошеленко В. В., Мавринская С. А. [и др.]. Государственная геологическая карта РФ. Лист N-51-XXVII. Объяснительная записка. – М. : ВСЕГЕИ, 2019. – 150 с.
7. Мельников А. В., Степанов В. А. Рудно-россыпные узлы южной части Приамурской золотоносной провинции. – Благовещенск : АмГУ, 2013. – 222 с.
8. Мельников А. В., Степанов В. А. Рудно-россыпные узлы Приамурской золотоносной провинции. Часть 2. Центральная часть провинции. – Благовещенск : АмГУ, 2014. – 300 с.
9. Мельников А. В., Степанов В. А. История рудного золота Приамурья. – Благовещенск : АмГУ, 2021. – 160 с.
10. Минерально-сырьевая база Амурской области на рубеже веков. – Благовещенск : КИП по Амурской области, 2000. – 168 с.
11. Мурашев Д. Ф. Аятское месторождение золота и киновари // Записки Горного института. – 1915. – Т. 5, вып. 4–5. – С. 361–381.
12. Петрук Н. Н., Волкова Ю. Р. [и др.]. Государственная геологическая карта РФ. Лист M-52. Объяснительная записка. – М. : ВСЕГЕИ, 2012. – 496 с.
13. Сержников А. Н., Волкова Ю. Р., Яшинов А. Л. [и др.]. Государственная геологическая карта РФ. Лист N-52. Объяснительная записка. – М. : ВСЕГЕИ, 2007. – 326 с.
14. Степанов В. А. Геология золота, серебра и ртути. Часть 2. Золото и ртуть Приамурской провинции. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – 161 с.
15. Степанов В. А. Этапы формирования и генезис золоторудных месторождений Приамурья // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 403, № 1. – С. 83–87.
16. Федорчук В. П. Геология ртути. – М. : Недра, 1983. – 240 с.
17. Vredenburg L. M. Tertiary gold bearing mercury deposit of the Coast Ranges // California Geology. – 1982. – V. 35, № 2. – P. 23–27.

## References

1. Agafonenko S. G., Usov I. O. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. List N-53-XXVI. Ob'yasnitel'naya zapiska [State Geological map of the Russian Federation. Sheet N-53-XXVI. Explanatory note], Moscow, VSEGEI Publ., 2015, 98 p.
2. Artem'ev D. S. Osobennosti geologicheskogo stroeniya i vertikal'noi zonal'nosti rudnykh tel Maisko go zolotorudnogo mestorozhdeniya (Tsentral'naya Chukotka) [Features of the geological structure and vertical zonality of ore bodies of the May gold deposit (Central Chukotka)], *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2015, V. 64, pp. 94–100. (In Russ.).
3. Volkov A. V. Zoloto-sul'fidnye mestorozhdeniya vkraplennykh rud Severo-Vostoka Rossii: osobennosti geologo-geneticheskoi i poiskovoi modeli [Gold-sul-



- fide deposits of interspersed ores of the North-East of Russia: features of the geological-genetic and search model], *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technologies], 2021, No 4 (54), pp. 48–59. (In Russ.).
4. Galkin M. A. Mineral'nye assotsiatsii na rtutnykh mestorozhdeniyakh Severo-Vostoka Yakutii [Mineral associations in mercury deposits of the North-East of Yakutia], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1966, V. 169, No 2, pp. 438–440. (In Russ.).
  5. Konyshchev V. O., Zhidkov S. N., Stepanov V. A. Zoloto-rtutnoe mestorozhdenie Kyuchyus [Gold-mercury deposit Kyuchus], *Kolyma* [Kolyma], 1993, No 3, pp. 11–15. (In Russ.).
  6. Koshelenko V. V., Mavrinskaya S. A. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. List N-51-XXVII. Ob'yasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Sheet N-51-XXVII. Explanatory note], Moscow, VSEGEI Publ., 2019, 150 p.
  7. Mel'nikov A. V., Stepanov V. A. Rudno-rossypnye uzly yuzhnoi chasti Priamurskoi zolotonosnoi provintsii [Ore-placer nodes of the southern part of the Amur gold-bearing province], Blagoveshchensk, AmGU Publ., 2013, 222 p.
  8. Mel'nikov A. V., Stepanov V. A. Rudno-rossypnye uzly Priamurskoi zolotonosnoi provintsii. Chast' 2. Tsentral'naya chast' provintsii [Ore-placer nodes of the Amur gold-bearing province. Part 2. The central part of the province], Blagoveshchensk, AmGU Publ., 2014, 300 p.
  9. Mel'nikov A. V., Stepanov V. A. Istoriya rudnogo zolota Priamur'ya [History of ore gold of the Amur region], Blagoveshchensk, AmGU Publ., 2021, 160 p.
  10. Mineral'no-syr'evaya baza Amurskoi oblasti na rubezhe vekov [Mineral resource base of the Amur region at the turn of the century], Blagoveshchensk, KPR po Amurskoi oblasti Publ., 2000, 168 p.
  11. Murashev D. F. Ayatskoe mestorozhdenie zolota i kinovari [Ayatskoye gold deposit and cinnabar], *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 1915, V. 5, No 4–5, pp. 361–381. (In Russ.).
  12. Petruk N. N., Volkova Yu. R. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. List M-52. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Sheet M-52. Explanatory note], Moscow, VSEGEI Publ., 2012, 496 p.
  13. Serezhnikov A. N., Volkova Yu. R., Yashnov A. L. [et al.]. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. List N-52. Ob'yasnitel'naya zapiska [State Geological map of the Russian Federation. Sheet N-52. Explanatory note], Moscow, VSEGEI Publ., 2007, 326 p.
  14. Stepanov V. A. Geologiya zolota, serebra i rtuti. Chast' 2. Zoloto i rtut' Priamurskoi provintsii [Geology of gold, silver and mercury. Part 2. Gold and mercury of the Amur province], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000, 161 p.
  15. Stepanov V. A. Etapy formirovaniya i genezis zolotorudnykh mestorozhdenii Priamur'ya [Stages of formation and genesis of gold deposits of the Amur region], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2005, V. 403, No 1, pp. 83–87. (In Russ.).
  16. Fedorchuk V. P. Geologiya rtuti [Geology of mercury], Moscow, Nedra Publ., 1983, 240 p.
  17. Vredenburg L. M. Tertiary gold bearing mercury deposit of the Coast Ranges, *California Geology*, 1982, V. 35, No 2, pp. 23–27.

**Степанов Виталий Алексеевич** (vitstepanov@yandex.ru)

доктор геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник НИГТЦ ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия



## Безотходная переработка отвальных никелевых шлаков

Веселовский А. А., Лагуткин С. В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», филиал в г. Новоуральск, Россия

**Аннотация.** В работе рассмотрен один из возможных вариантов безотходной переработки отвальных масс никелевых шлаков, накопившихся за все годы работы предприятий, включающий применение гидро- и пирометаллургической переработки, в результате которой получают три продукта – железный купорос, ферросилиций с небольшой примесью алюминия и шлак от выплавки ферросилиция, обладающий твёрдостью 7–7,5 по Моосу, который может быть использован в качестве абразивного порошка для пескоструйной обработки или в качестве сырья для производства высокоглинозёмистого цемента. Полученный железный купорос в последующем может быть очищен от примесей меди, никеля, магния и алюминия и доведён по составу до требований существующего ГОСТа, а полученный ферросилиций, имеющий в своём составе содержание кремния, аналогичное содержанию его в марочном ферросилиции ФС 75 с примесью алюминия, может быть использован для раскисления и легирования кремнием всех существующих марок сталей и чугунов. При этом нормативным документом для такого ферросилиция могут являться ТУ, составленные при участии предприятия-потребителя. В рамках ТУ может быть определён и шлак, получаемый при выплавке ферросилиция для предприятий, выпускающих абразивный порошок.

**Ключевые слова:** ферросилиций, отвальный шлак, абразивный порошок, железный купорос.

Для цитирования: Веселовский А. А., Лагуткин С. В. Безотходная переработка отвальных никелевых шлаков. Руды и металлы. 2023. № 1. С. 52–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10005.

---

## Waste-free processing of waste nickel slags

Veselovsky A. A., Lagutkin S. V.

NRNU MEPhI, branch in Novouralsk, Russia

**Abstract.** The paper considers one of possible options for the waste-free processing of dumped masses of nickel slags, accumulated over the years of operation of some enterprises. This process includes the use of hydro- and pyrometallurgical processing, which results in three products: iron sulfate, ferrosilicon with a small admixture of aluminum, and slag from the ferrosilicon smelting. The slag has a hardness of 7–7.5 Mohs and can be used as an abrasive powder for sandblasting, or as a raw material for production of high alumina cement. The resulting iron sulfate can subsequently be purified from the copper, nickel, magnesium, and aluminum impurities and brought to the existing GOST compositional requirements. The resulting ferrosilicon, whose silicon content is similar to that of the marked ferrosilicon FS 75 with an aluminum admixture, can be used for deoxidation and silicon alloying of all existing grades of steels and cast irons. In this case, specifications drawn up with participation of a consumer enterprise can be a regulatory document for such ferrosilicon. The slag obtained during the ferrosilicon smelting can also be defined within the framework of these specifications for the abrasive powder producing enterprises.

**Key words:** ferrosilicon, waste slag, abrasive powder, iron sulphate.

For citation: Veselovsky A. A., Lagutkin S. V. Waste-free processing of waste nickel slags. Ores and metals, 2023, № 1, pp. 52–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10005.



Табл. 1. Состав отвальных никелевых шлаков

Table. 1. Composition of the nickel waste slags

Местоположение	Элементный состав, мас. %								
	Ni	Co	Cu	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
г. Реж (Свердловская обл.)	0,10–0,19	0,02–0,04	0,01–0,32	38–42	-	16–19	6–12	10–16	2–7
г. Орск (Оренбургская обл.)	0,15–0,48	0,02–0,21	0,08–0,20	33–48	18–49	-	3–8	8–17	6–12
г. Верхний Уфалей (Челябинская обл.)	0,10–0,17	-	0,05–0,20	30–45	-	15–30	3–11	4–17	6–12

*Введение.* Цветная металлургия относится к числу отраслей с наибольшим выходом отходов на единицу продукции, что связано с многокомпонентным составом используемого сырья [1, 5]. Помимо этого, в цветной металлургии явно выражена тенденция вовлечения в переработку всё более бедного природного сырья, что также ведёт к увеличению объёмов образующихся отходов [1, 2, 5, 10].

Шлаковые отвалы никелевых комбинатов по характеру и составу складированных отходов представляют собой сложные техногенные системы. Сюда вывозятся и складироваются шлаки различных этапов технологической цепочки, имеющие различный химический состав, виды химических соединений и структуру. К основным типам никелевых шлаков относятся шлаки шахтной и электрической плавки, характеризующиеся высоким содержанием кремнезёма и низким содержанием железа, и конверторный шлак, отличающийся высоким содержанием железа и серы. Отвальные шлаки подвергаются магнитной сепарации в целях извлечения металлических включений, содержащих никель, и магнитной породы, которую можно использовать в металлургии для выплавки определённой номенклатуры сплавов [2, 3, 7]. Можно условно предположить, что химический состав отвальных шлаков – это соотношение разных долей конверторного шлака, шлаков шахтной и электрической плавки, и в структуре пробы следует ожидать наличие как оксидных, так и сульфидных соединений железа, никеля, кобальта и других элементов.

Оставшаяся от такой обработки немагнитная или слабомагнитная шлаковая порода в значимых объёмах не используется и составляет основную массу «лежалых» отходов. Лишь незначительная часть этих шлаков используется для изготовления щебня, заполнителя бетонов, железнодорожных насыпей и т. д., при этом оставшиеся в шлаке цветные металлы и железо теряются безвозвратно [4]. Поэтому целью настоящих исследований является разработка безотходной технологии переработки отвальных никелевых шлаков с получением продуктов, максимально востребованных на рынке и обладающих высокой стоимостью.

*Материалы, оборудование и методика проведения экспериментов.* Для проведения экспериментов использовался лежалый отвальный шлак Орского, Режского и Верхне-Уфалейского складирования. Усреднённый состав шлаков приведён в табл. 1 [3].

Шлак дробился в шаровой мельнице до фракции менее 0,16 мм. Реализация процессов переработки исходного шлака происходила по схеме, представленной на рис. 1.

Для кислотного выщелачивания использовалась разбавленная серная кислота с концентрацией 20–30 %, реакция сопровождалась выделением тепла и сероводорода. Выщелачивание проводилось при соотношении кислоты к шлаку в отношении 1 : 3, время выщелачивания составило 60 мин, реакция проходила с выделением тепла без предварительного подогрева. В результате реакций выделялся свободный кремнезём и сульфат кальция, ко-

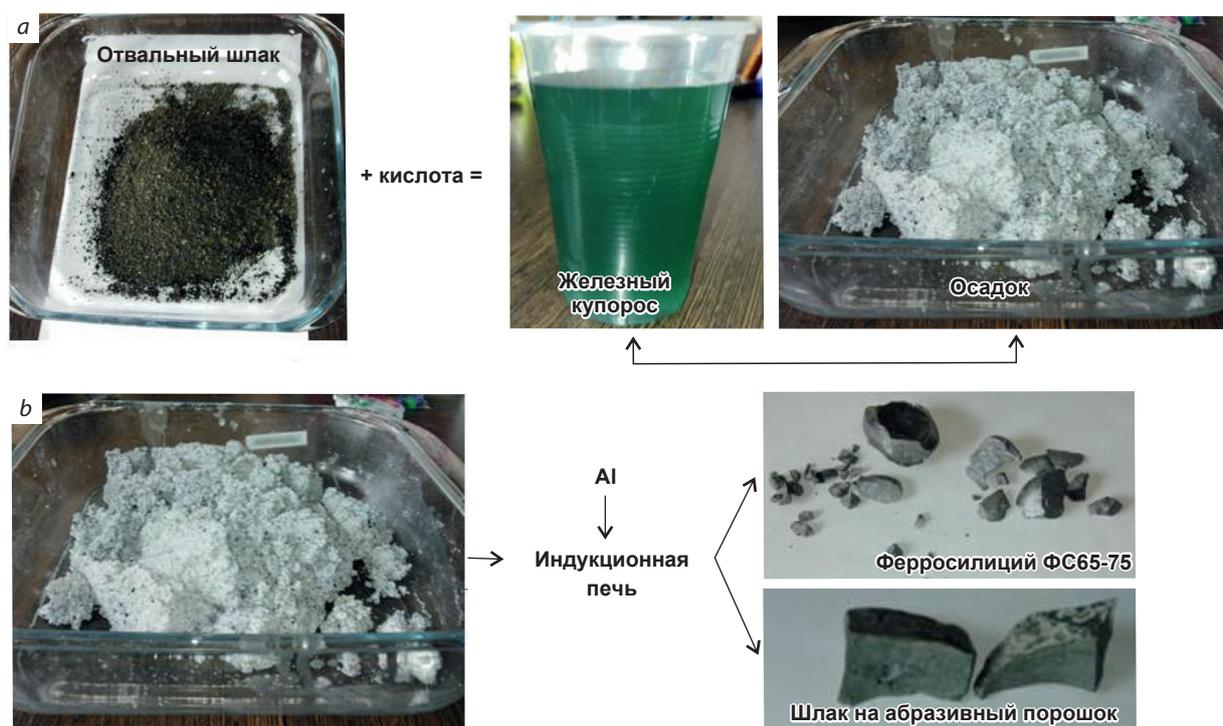


Рис. 1. Схема процесса переработки отвальных шлаков:

*a* – кислотное выщелачивание; *b* – пирометаллургическая обработка

Fig. 1. Scheme of processing of the waste slags:

*a* – acid leaching; *b* – pyrometallurgical processing

торые придавали непрореагировавшему осадку белый цвет.

Удаление сульфатов железа из прореагировавшей массы проводилось промывкой её водой в количестве в 1,5–2 раза большем, чем объём затраченной кислоты.

В результате получался раствор железного купороса с концентрацией 80 % по сульфату железа (табл. 2) и белый шлак (остаток от выщелачивания) химический состав которого приведён в табл. 3, 4 и 5.

Как видно из табл. 2, медь, входящая в состав шлака, растворяется в серной кислоте и почти полностью переходит в купорос. В последующем растворённую в купоросе медь можно отделить от основной массы известными способами [8, 9]. Полученный железный купорос технической чистоты может быть доработан до соответствующих марок по ГОСТу или ТУ. Пересчёт элементного состава (см. табл. 2) на сульфатные составляющие дал сле-

дующие результаты, %: сульфат железа (II) – 75–90, сульфат меди 1–3, сульфат алюминия 5–9, сульфат никеля 1–4, остальное – сульфат магния. При этом кобальт, скорее всего, также перешёл в купорос, но из-за малого его содержания в исходном шлаке выявлен не был.

Полученный железный купорос не соответствует требованиям существующих ГОСТов, но может быть использован в качестве исходного сырья для производящих его предприятий, с которыми может быть составлено соответствующее ТУ на поставку.

Вторым этапом переработки (см. рис. 1, *b*) являлось алюмотермическое восстановление белого осадка в индукционной печи. Для этого использовалась лабораторная индукционная печь ёмкостью 10 кг со вставным графитным тиглем, причём последний обеспечивал нагрев и расплавление всей шихты. Вторичный алюминий вводился в печь в количестве 15–20 % в кусковом виде. Температура составляла 1600 °С.

**Табл. 2. Элементный состав железного купороса****Table 2. Elemental composition of the iron sulfate**

Происхождение шлака	Элементный состав, мас. %							
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Fe	Cu
Орск	54	0,1	5,0	4,0	1,8	20,4	13,0	2,0
Верхний Уфалей	52	-	5,2	4,2	0,4	22,6	15,6	0,6
Реж	55	-	4,9	4,3	-	21,1	14,0	2,7

**Табл. 3. Элементный анализ белого осадка Режского шлака (см. рис. 2, а)****Table 3. Elemental analysis of the Rezh sediment (see Fig. 2, a)**

№ спектра	Элементный состав, мас. %									
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Fe
6	56,79	1,38	1,40	2,28	20,04	8,91	5,94	0,03	0,23	3,01
7	58,70	1,12	2,18	2,05	19,33	9,16	2,59	0,00	0,13	4,74
8	57,04	1,05	0,65	1,79	11,44	14,02	11,52	0,02	0,27	2,21
9	42,94	3,00	1,19	8,52	12,76	6,36	10,06	0,00	0,00	15,17
10	60,63	1,24	1,95	1,83	26,70	4,72	0,63	0,09	0,10	2,10

**Табл. 4. Элементный анализ белого осадка Орского шлака (см. рис. 2, b)****Table 4. Elemental analysis of the white sediment from the Orsk slag (see Fig. 2, b)**

№ спектра	Элементный состав, мас. %						
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	57	1,2	0,8	29,7	6,8	1,6	2,9
2	47	0,5	0,2	39,5	4,2	1,8	6,9
3	57	0,8	0,6	34,7	4,7	0,9	1,4
4	59	0,7	0,4	33,8	4,3	0,8	1,3

**Табл. 5. Элементный анализ белого осадка шлаков Верхнего Уфалея (см. рис. 2, c)****Table 5. Elemental analysis of the white sediment from the Verkhniy Ufalei slags (see Fig. 2, c)**

№ спектра	Элементный состав, мас. %						
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
5	59	0,8	0,7	35,5	0,8	1,9	1,2
6	59	4,6	2,9	26,1	0,3	4,8	2,2
8	48	3,3	3,2	22,7	0,5	9,7	12,5
9	49	3,5	2,8	26,0	1,3	8,2	8,9
10	51	0,2	0,1	22,0	2,2	1,6	0,1

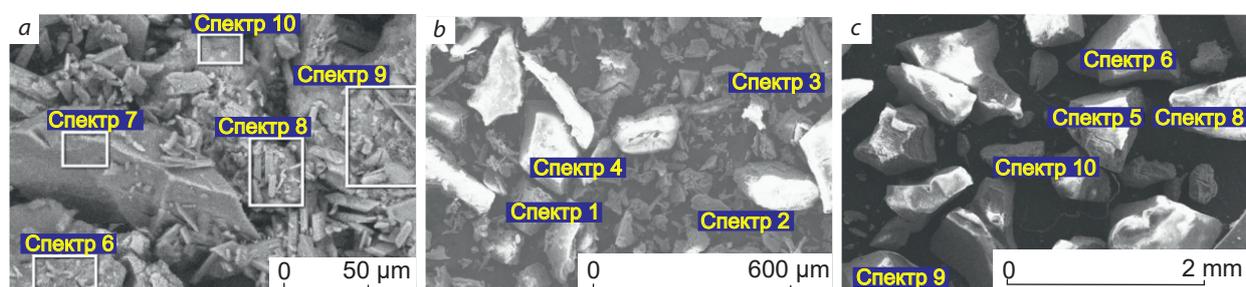


Рис. 2. Результаты анализа белого осадка участков:

*a* – Режского; *b* – Орского; *c* – Верхне-Уфалейского

Fig. 2. Results of analysis of the white sediment from the sites:

*a* – Rezh, *b* – Orsk, *c* – Verkhniy Ufailei

Через 15–20 мин после введения скачивался шлак и сливался готовый ферросилиций.

Элементный и фазовый составы готовых твёрдых продуктов проводился с использованием растрового электронного микроскопа Jeol JSM- 7001 и установки Дрон-4.

Для изучения полученного состава железного купороса проводили его осаждение раствором  $\text{NH}_4\text{OH}$ , фильтровали и выпаривали, а затем сухой остаток подвергали микрорентгеноспектральному анализу.

*Результаты проведённых исследований.* После обработки раствора железного купороса раствором  $\text{NH}_4\text{OH}$  появлялся осадок синесерого цвета, который после фильтрации и выпаривания приобретал коричневый цвет, что свидетельствовало о переходе железа из гидроксида (II) в гидроксид (III). Анализ состава железного купороса был выполнен с использованием растрового электронного микроскопа, способного проводить элементный анализ порошков. Определять сульфатные и гидроксидные группы растровой электронной микроскопией невозможно.

Полученный железный купорос не соответствует требованиям существующих ГОСТов, но может быть использован в качестве исходного сырья для производящих его предприятий, с которыми может быть составлено соответствующее ТУ на поставку.

Анализ белого осадка проводили на растровом электронном микроскопе. Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 3–5.

Фазовый анализ белых осадков идентичен по видам основных фаз, которые отличаются друг от друга в количественном соотношении, а в шлаке Орского складирования присутствует 0,2 % алюмосиликата натрия. Результаты фазового анализа представлены в табл. 6. Видно, что основное количество фаз (см. табл. 6) – оксид кремния и сульфат кальция.

Следующим этапом исследований являлось алюмотермическое восстановление полученных осадков кусковым алюминием. Шихта состояла из 15–18 % кускового алюминия и белого осадка (остальное). Осадок прокаливался в течении 1 часа при температуре 500 °С для удаления связанной влаги. Плавку проводили в индукционной тигельной печи ИСТ 0,01 со вставным графитным тиглем. Время плавки составляло 15–20 мин.

В результате были получены продукты, структура которых и элементный состав представлены на рис. 3 и в табл. 7–9.

Анализ состава полученного ферросилиция (см. табл. 7, 8, 9, спектры 4, 9 и 1 соответственно) позволил заключить, что из всех типов шлаков был получен состав, близкий к составу ФС 75 по ГОСТ 1415-93. Однако полное соответствие требованиям ГОСТ 1415-93 отсутствует. Но, учитывая основной состав, полученный высококремниевый сплав может быть вполне применён для раскисления взамен ФС 75 широкой номенклатуры выплавляемых сталей и чугунов, для чего нормативным документом будут являться ТУ, где определит-

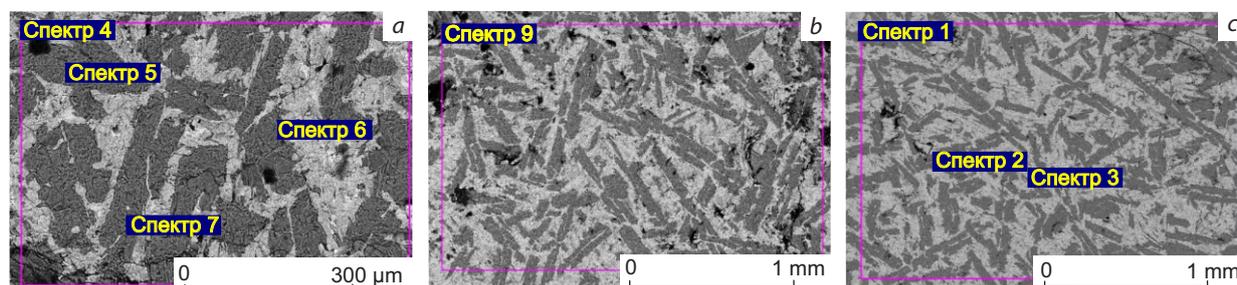


Рис. 3. Структура полученного ферросилиция с указанием мест взятия анализа шлака:

*a* – Режский; *b* – Орский; *c* – Верхне-Уфалейский

Fig. 3. Structure of the obtained ferrosilicon with specification of the slag sampling points

*a* – Rezh, *b* – Orsk, *c* – Verkhniy Ufalei

Табл. 6. Результаты анализа фаз

Table 6. Results of the phase analysis

Фаза	Название	Количество, мас. %	Стандартное отклонение, %
$Fe_3O_4$	Магнетит	0–6	± 2
$SiO_2$	Кюэсит	41–47	± 2
$SiO_2$	Тридимит	10–11	± 2
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Гипс	2–4	± 1
$CaSO_4$	Сульфат кальция	30–34	± 1

Табл. 7. Состав ферросилиция Режского шлака (см. рис. 3, *a*)

Table 7. Composition of ferrosilicon from the Rezh slag (see Fig. 3, *a*)

№ спектра	Элементный состав, мас. %							
	Si	Fe	Al	Cu	Cr	Mn	Ni	Co
4	75,0	13,6	6,7	0,04	0,7	0,05	1,0	-
5	100							
6	55,3	37,0	5,1	0,07	0,8	1,2	-	-
7	59,7	30,3	6,2	0,04	-	-	0,9	0,7

Табл. 8. Состав ферросилиция Орского шлака (см. рис. 3, *b*)

Table 8. Composition of ferrosilicon from the Orsk slag (see Fig. 3, *b*)

№ спектра	Элементный состав, % масс					
	Al	Si	Fe	Cr	Ni	Cu
9	11,8	68,4	16,7	0,9	0,7	0,3



Табл. 9. Состав ферросилиция Верхне-Уфалейского шлака (см. рис. 3, с)

Table 9. Composition of ferrosilicon from the Verkhniy-Ufalei slag (see Fig. 3, c)

№ спектра	Элементный состав, мас. %								
	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0,4	9,5	69,6	0,15	0,4	1,2	0,7	18,1	-
2	-	-	99,9	0,1	-	-	-	-	-
3	-	40,5	30,8	0,2	-	-	1,7	25,9	0,8

ся допустимый диапазон состава полученного сплава.

Анализ шлаков, полученных от выплавки ферросилиция позволил определить его усреднённый состав, %: MgO 0,6–4,9; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 66,2–77,8; SiO<sub>2</sub> 1–11,4; CaO 18,8–25,5. Содержание железа в шлаке не превышает 1 %, а остаточное содержание никеля – 0,08 %. Измерение твёрдости полученных шлаков дало результаты в 7,0–7,5 единиц по Моосу. В полученных шлаках полностью отсутствуют железо, никель и медь, и они представляют собой пустую

породу, которую можно использовать как материал для пескоструйной обработки и в производстве высокоглинозёмистого цемента в качестве добавки.

**Вывод.** Разработанная технология универсальна для всех техногенных образований предприятий, производящих никелевую продукцию, и позволяет получить в итоге близкие по составу друг к другу продукты – железный купорос, ферросилиций и абразивный порошок с твёрдостью 7,0–7,5 единиц по Моосу.

## Список литературы

1. Ванюков А. В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья. – Челябинск : Металлургия, 1988. – 432 с.
2. Вайсгурд С. Е. Физико-химические свойства и особенности строения сульфидных расплавов. – М. : Металлургия, 1996. – 304 с.
3. Веселовский А. А. Переработка отвалных никелевых шлаков с доизвлечением металлов : учебное пособие. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 152 с.
4. Гудим Ю. А. Эффективные способы утилизации отходов металлургического производства Урала // Экология и промышленность России. – 2008. – № 12. – С. 4–6.
5. Задиранов А. Н. Исследование, разработка и внедрение технологий переработки никелевых и медных техногенных отходов с получением годной металлопродукции : специальность 05.16.07 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов» : автореф. дис. на соискание учён. степ. д-ра техн. наук / Александр Никитович Задиранов. – М., 2004. – 46 с.
6. Патент № 2194781 РФ, МПК8 С22В23/02, С22В1900. Способ переработки сырья, содержащего цветные металлы и железо / Быстров В. П., Салихов З. Г. [и др.] ; заявители МИСИС, научно-экологическое предприятие «Эокси» : заявл. 28.11.2000, опубл. 20.12.2002.
7. Патент № 2245933 РФ, МПК7 С22В23/00. Способ переработки окисленной никель-кобальтовой руды / Синегрибов В. А., Кольцов В. Ю. [и др.] ; заявитель ООО «Геовест» № 2003123702/02 : заявл. 28.07.2003 : опубл. 10.02.2005.
8. Патент № 2346996 РФ, МПК7 С22В23/00. Усовершенствованное выщелачивание основных металлов / Коли Джон Хантер ; заявитель Evropon nikel PLS ; № 2007102212/02; заявл. 22.06.2005, опубл. 20.02.2009.
9. Патент № 2352651 РФ, МПК7С22В5/02. Способ хлороаммонийного выделения оксидов меди и никеля из сырья с последующим их разделением / Дьяченко А. Н., Крайденко Р. И. ; заявитель ГОУ ВПО «ГПУ» ; заявл. 09.10.2017, опубл. 20.04.2009.



10. Федичкин С. А. Исследование процесса обеднения конверторного шлака никелевого производства восстановительно-сульфидирующими комплексами, содержащими алюминий : специаль-

ность 05.16.02 «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов» : автореф. дис. на соискание учён. степ. канд. техн. наук / Сергей Анатольевич Федичкин. – Екатеринбург, 2005. – 26 с.

## References

- Vanyukov A. V. Kompleksnaya pererabotka mednogo i nikelovogo syr'ya [Complex processing of copper and nickel raw materials], Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1988, 432 s.
- Vaisgurd S. E. Fiziko-khimicheskie svoystva i osobennosti stroeniya sulfidnykh rasplavov [Physicochemical properties and structural features of sulfide melts], Moscow, Metallurgiya Publ., 1996, 304 p.
- Veselovskii A. A. Pererabotka otval'nykh nikelovykh shlakov s doizvlecheniem metallov [Processing of dump nickel slags with extraction of metals], Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020, 152 p.
- Gudim Yu. A. Effektivnye sposoby utilizatsii otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva Urala [Effective methods of waste disposal of metallurgical production of the Urals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2008, No 12, pp. 4–6. (In Russ.).
- Zadiranov A. N. Issledovanie, razrabotka i vnedrenie tekhnologii pererabotki nikelovykh i mednykh tekhnogennykh otkhodov s polucheniem godnoi metalloproduksii [Research, development and implementation of technologies for processing nickel and copper technogenic waste to obtain usable metal products. Extended abstract of Doctor's thesis], Moscow, 2004, 46 p.
- Patent No 2194781 of the Russian Federation, MPK8 S22V23/02, S22V1900. Sposob pererabotki syr'ya, sodержashchego tsvetnye metally i zhelezo [A method for processing raw materials containing non-ferrous metals and iron], Bystrov V. P., Salikhov Z. G. [et al.], applicants of MISIS, scientific and ecological enterprise "Eoxi", application 28.11.2000, publ. 20.12.2002.
- Patent No 2245933 of the Russian Federation, MPK7 S22V23/00. Sposob pererabotki okislennoi nikel'-kobal'tovoi rudy [Method of processing oxidized nickel-cobalt ore], Sinegribov V. A., Kol'tsov V. Yu. [et al.], applicant LLC "Geovest" No 2003123702/02, application 28.07.2003, publ. 10.02.2005.
- Patent No 2346996 of the Russian Federation, MPK7 S22V23/00. Usovershenstvovannoe vyshchelachivanie osnovnykh metallov' [Advanced leaching of base metals], Koli Dzhon Khanter, applicant Evropion nikel PLS, No 2007102212/02, application 22.06.2005, publ. 20.02.2009.
- Patent No 2352651 of the Russian Federation, MPK7S22V5/02. Sposob khloroammonijnogo vydeleniya oksidov medi i nikelya iz syr'ya s posleduyushchim ikh razdeleniem [Method of chloroammonium separation of copper and nickel oxides from raw materials with their subsequent separation], D'yachenko A. N., Kraidenko R. I., applicant of the State Educational Institution "TPU", application 09.10.2017, publ. 20.04.2009.
- Fedichkin S. A. Issledovanie protsessa obedneniya konvertornogo shlaka nikelovogo proizvodstva vosstanovitel'no-sulfidiryushchimi kompleksami, sodержashchimi alyuminiy [Investigation of the process of depletion of converter slag of nickel production by reducing-sulfidating complexes containing aluminum. Extended abstract of candidate's thesis], Ekaterinburg Publ., 2005, 26 p.

**Веселовский Александр Александрович** (a\_a-ves@mail.ru)

кандидат техн. наук, доцент

**Лагуткин Станислав Владимирович**

кандидат техн. наук, зав. кафедры

НИЯУ МИФИ, г. Новоуральск, Россия

Редакция: О. А. Грибовская, В. С. Жаркова

Вёрстка: О. А. Грибовская, С. В. Жуков, В. Ю. Козлова

Оригинал-макет: А. С. Рязанцева, В. Ю. Козлова

Фото на обложке (малахит): <https://www.sbras.info/system/files/image/photogl/7036/2016-04-01>

Фото на стр. 4 (Аракульский Шихан): <https://discovery-chel.ru/tours/arkhiv-turov/aktivnye-tury/arakulskii-shikhan/>

Подписано в печать 28.03.23 г. Формат 290 × 205. Бумага листовая. Печать цифровая

Отпечатано в ФГБУ «ЦНИГРИ»: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1

Адрес редакции:

117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1, ФГБУ «ЦНИГРИ»

Телефон: 8 (495) 315-28-47

E-mail: [rudandmet@tsnigri.ru](mailto:rudandmet@tsnigri.ru), [rudandmet@yandex.ru](mailto:rudandmet@yandex.ru)

Сайт: <http://www.rm.tsnigri.ru>

© «Руды и металлы», 2023