

**Черные сланцы сухоложского типа и их благороднометалльный потенциал: современное состояние изученности, технологические реалии и перспективы**

©2021 В. М. Ненахов<sup>1✉</sup>, Г. С. Золотарева<sup>1</sup>, А. А. Дубков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*  
<sup>2</sup>*Всероссийский научно-исследовательский нефтяной институт,  
Шоссе Энтузиастов, дом 36, 105118, Москва, Российская Федерация*

**Аннотация**

*Введение:* Целью работы является определение путей преодоления существующих проблем внедрения новых технологий извлечения благородных металлов из руд черносланцевого типа, главными из которых являются: 1) глубокое изучение черных сланцев с точки зрения их происхождения, природы и форм присутствия углерода; 2) изучения минеральных форм благородных металлов на наноуровне; 3) природные условия самоорганизации (самосборки) наноструктур благородных металлов; 4) моделирование природных условий самосборки и 5) поиск эффективных методов вскрытия наноразмерных частиц драгметаллов и их соединений. Авторами проанализированы существующие взгляды на понятие «черные сланцы», их происхождение, обстановки осадконакопления, геодинамические условия формирования, природу и формы нахождения углеродистого вещества в них. Подробно рассмотрены причины повышенного благородно-металльного рудного потенциала черносланцевых формаций.

*Методика:* изучение наноразмерных благородных металлов производилось на рентгенофазовом дифрактометре Швейцарского производства с использованием огромной базы (до 453000 определений) данных и соответствующим программным обеспечением. Приводятся данные о существующих минеральных формах благородных металлов, в том числе наноразмерного состояния по литературным и оригинальным данным изучения руд месторождений сухоложского типа России и Казахстана. Показана роль наноструктурированного рудного вещества в подобных типах месторождений, указаны причины как недоизвлечения Au, так и полного «игнорирования» металлов платиновой группы при освоении месторождений.

*Результаты и обсуждение:* Рассматриваются природные процессы корообразования (по черным сланцам), приводящие к самосборке драгметаллов. Даны примеры, когда из ничтожных содержаний Au в материнских породах в результате корообразующих процессов образуются источники россыпного металла. Пути решения вовлечения рудного потенциала МПП в промышленное производство видятся в использовании природоподобных технологий, теоретические и практические основы которых заложены еще несколько десятилетий назад группой казахстанских ученых. В основе техно-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ненахов Виктор Миронович, e-mail: [nenakhov@geol.vsu.ru](mailto:nenakhov@geol.vsu.ru)

логий будущего должны лежать процессы суперизмельчения и перевода частиц благородных металлов в состояние самосборки. Последняя возможна только для «самородных» частиц, не скованных валентными связями.

**Заключение:** Для переработки руд с высоким содержанием углерода в технологиях будущего необходимо изыскать и пути наиболее эффективной борьбы с активным углеродом, а одним из методов его нейтрализации является гидрирование. С внедрением новых технологий будет возможно не только повышение извлекаемости Au из первичных руд, но и вовлечение в повторное извлечение накопившихся хвостов переработки действующих предприятий. В заключении делаются важнейшие выводы, касающиеся благородно-металльного потенциала черных сланцев и будущих технологии извлечения, в том числе: 1) определена как положительная, так и негативная роль углерода; 2) показано значение изучения кор выветривания по черным сланцам как природных «фабрик» самосборки; 3) на основе второго пункта намечены пути комплексного извлечения благородных металлов, в основе которых лежит кавитация.

**Ключевые слова:** черные сланцы, наноразмерные благородные металлы, кавитация, самосборка, природоподобные технологии.

*Для цитирования:* Ненахов В. М., Золотарева Г. С., Дубков А. А. Черные сланцы и их благородно-металльный потенциал: современное состояние изученности, технологические реалии и перспективы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. №1. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3337>.

### Введение

Бурное развитие науки в области технологии изучения благородных металлов за последнее два десятка лет свидетельствует о том, что мы стоим на пороге революции в этой области. Прорывные технологии возникают как правило на стыке смежных наук. В данном случае речь идет о геологии, химии и физике. В прикладной геологии конечным продуктом является постановка на баланс руды и металла, количество которых в значительной мере зависит от технологии извлечения и экономической целесообразности, определяющих граничные (бортовые) содержания полезного компонента, разделяющих понятия «балансовые» и «забалансовые» руды. Особенно это актуально для руд, в которых нет четких визуализированных границ между рудой и рудовмещающими породами, при этом контуры подсчета запасов часто опираются только на аналитические данные (для Au и Ag это обычно пробирный анализ). Прежде всего, это касается «черных сланцев», для которых снижение бортового содержания условно с 1 г/т до 0.7 г/т может увеличить запасы в разы и даже на порядок!

Венцом знаний о руде на Au для геологов-разведчиков и инженеров-технологов является минералогический состав руд, опирающийся на фазовый (рациональный) анализ, позволяющий оценить количественное соотношение свободного золота, золота в сростках с порообразующими минералами, золота в виде включений в сульфидах и золота в органическом (углеродистом) веществе. Опираясь на данные фазового анализа, разрабатывается оптимальная технология, включающая разные комбинации гравитационного, флотационного, обжигового методов извлечения с последующими цианированием, сорбцией, десорбцией, электролизом и, в конечном случае, получением сплава Доре.

Ключевой операцией является цианирование, достоинство которой определяется тем, что оно селек-

тивно переводит в раствор в катионную форму свободные Au и Ag, что позволяет легко получать указанные металлы электролизом; недостатком является инертность цианидов относительно металлов платиновой группы (МПГ) и они «кочуют» в хвостоотвалы. Перевод МПГ в растворы возможен с помощью кислотного выщелачивания, но это направление очень сложное и в практике попутного извлечения при золотодобыче из коренных руд пока не используется.

Решение проблемы комплексного извлечения всей линейки драгметаллов лежит в разработке природоподобных технологий, опирающихся на фундаментальные знания о присхождении черных сланцев, их особенностях накопления, метаморфизме и причинах их повышенной продуктивности в отношении благородных металлов, а также на знания о структурной организации и минеральных формах наноразмерных частиц в них Au, Ag и МПГ.

Среди объектов благородных металлов на долю золота приходится львиная доля. Они чаще и более «охотно» изучаются, оцениваются и эксплуатируются по сравнению с объектами ЭПГ. Причины такого дисбаланса интереса к разным благородным металлам носят как исторические, так и прагматические корни. История изучения золота, его проявлений в природе, свойств и технологий извлечения насчитывает тысячелетия, в то время как ЭПГ активно изучаются последние полторы сотни лет. Аналитические исследования, базовые при производстве поисковых и разведочных работ на золото (спектрозолотометрия, пробирный анализ) используются более широко и менее затратны по сравнению с аналитикой на ЭПГ (ICP-MS, атомно-эмиссионный, атомно-обсорбционный). Кроме того, практика освоения золоторудных объектов, сложившаяся в постсоветской России, такова, что информация о наличии в золотых рудах значительных содержаний ЭПГ не всегда радует владельцев, так как налагает на него дополнительные обременения по налогообложе-

нию, применению новых, далеко не совершенных технологий и, как следствие, к существенным финансовым затратам и длительной окупаемости.

### **Происхождение черных сланцев, природа и формы нахождения в них углеродного вещества**

В настоящее время существует широкий спектр взглядов как на само определение «черных сланцев» (ЧС) так и на их природу и классификацию. Одна из наиболее полных и свежих сводок обобщений на эту тему, изданная ВСЕГЕИ подробно освещает этот вопрос [1].

В связи с открытием в СССР и за рубежом уникальных месторождений драгметаллов (золото, серебро, МПГ) связанных с черносланцевыми формациями (ЧСФ), интерес к ним резко повысился, а их изучение стало активно развиваться. К черным сланцам относятся все водоосадочные породы с содержанием органического углерода ( $C_{орг}$ ) более 1% [2], а по уровню содержания последнего они делятся на низкоуглеродистые (1–3%), углеродистые (3–10%) и высокоуглеродистые (более 10%). Принципиально важным является состояние органического вещества. В черных сланцах оно полигенное и складывается из терригенного (преимущественно остатки растительности) и из аквагенного (сапропелевого) типов.

Черные сланцы широко распространены как в чехлах платформ, так и в покровно-складчатых поясах, начиная с раннего протерозоя и заканчивая кайнозойем, вплоть до палеоген-неогенового возраста [1]. Их глубоко метаморфизованные аналоги (графит-содержащие гнейсы) известны и во многих крупных структурах, сложенных архейскими породами (Алданский, Анабарский щиты, Камчатский срединный массив, Воронежский кристаллический массив и др.). Черные сланцы по своей палеогеодинамической принадлежности так же весьма разнообразны – они отвечают обстановкам внутриплитным, связанным как с осадочными бассейнами эпикратонных мелководных морей (Восточно-Европейская, Восточно-Сибирская, Западно-Сибирская, Скифская плиты), так и с пассивными континентальными окраинами (Сухой Лог) [3], активными окраинами с косой субдукцией (Сихотэ-Алинь) [4], проявлениями внутриконтинентального и межконтинентального рифтогенеза (Мурунтау, Бақырчик, Кумтор) [5]. Разнообразие геодинамических обстановок и широкий возрастной диапазон формирования, определяют и большое разнообразие их металлогенической, а в более широком плане минерагенической специализации. Это могут быть ураноносные, меденосные, молебден-меденосные, битуминозные или другие разнообразные сланцы. Объединяет их (помимо повышенного содержания углерода) одно – все они в различной степени Au- и платиноидо-содержащие породы. ЧС обладают повышенным минерагеническим потенциалом не только в отношении благороднометалльной группы, но и целого ряда цветных и редких металлов, в том числе рения, молибдена, ванадия, кобальта, меди, цинка и др.

На большинстве известных золоторудных месторождений, связанных с ЧС, золото, как правило, сопровождается платиноидами. По данным Л. Б. Макарьева [6] и других исследователей, в золоторудных месторождениях Бодайбинского района выявлены их повышенные концентрации. В частности, при средних содержаниях платины в рудовмещающих черносланцевых толщах 0.01–0.04 г/т наблюдаются зоны, где они достигают 0.1–0.4 г/т, а на Бульбухтинском проявлении платины и иридия среди углеродистых алевролитов и филлитовидных сланцев, насыщенных пирит-халькопиритовой вкрапленностью, выявлен оруденелый горизонт, прослеженный на расстояние до 10 км при мощности 75 м с содержанием иридия от 1.7 до 2.6, платины от 1.0 до 1.8 и золота до 1.7 г/т. Преобладают концентрации в форме микропримесей и микровключений в пиритах различных генераций и морфологических типов. На месторождении Сухой Лог по [3] прогнозные ресурсы по платине сопоставимы с таковыми золота, а сам объект является уникальным золото-платиноидным месторождением. Аналогичная оценка дается и в работе Буряка В. А. и Хмелевской Н. Л. [7]. По данным Лаверова Н. П. и др. [8] Au и, предположительно, Pt находятся в виде тонкодисперсной массы на активной поверхности  $C_{орг.}$ , а кроме самородной формы отмечены сперилит ( $PtAs_2$ ), интерметаллические соединения (Au и Ag, Pt и Cu, Pt и Fe) и теллурвисмутиды палладия и серебра.

Вместе с тем, существует точка зрения, отвергающая сопоставимость Au и МПГ в рудах суходоужского типа. Гаврилов А. М. и Кряжев С. Г. [9] опубликовали результаты 46 определений содержаний платины, палладия и родия в технологических пробах, гравиметрических, рудах и минерализованных породах Сухого Лога пробирно-атомно-абсорбционным и ICP MS методами. Их вывод категоричен: «...В исходных рудах месторождения Сухой Лог, а также в продуктах их обогащения содержания платиновых металлов находятся на уровне чувствительности современных методов анализа и не представляют промышленного интереса [9]. Как видим результаты аналитических исследований, как и точки зрения на рудный (относительно МПГ) потенциал объектов суходоужского типа далеко не однозначны, а «полярные» мнения объясняются степенью доверия исследователей к результатам аналитики, самим аналитическим методам, а также недостаточностью глубины исследований по наноразмерным формам благородных металлов. Считающиеся «надежные» методы пробирного анализа далеко уже не соответствуют современному уровню знания о формах нахождения драгметаллов в рудах черносланцевого типа, так как не учитывают «летучие» соединения этих металлов. Эту проблему рассмотрим ниже.

Об условиях миграции и концентрирования платины и палладия в осадочно-метаморфических черносланцевых толщах сведения крайне скудны. Почти во всех цитированных работах наряду с признанием существенной роли в формировании золоторудных ме-

сторождений седиментогенных накоплений благородного металла, для платиноидов предполагается глубинный источник.

Природа повышенного благородно-металльного потенциала черных сланцев до настоящего времени остается предметом дискуссий. Часть исследователей [10, 11 и др.], другая группа [12] настаивают на их первично седиментогенной природе, третья [3] предполагают их полигенное происхождение.

Аргументами в пользу первой точки зрения служит то, что комплексные месторождения Au и МПП в черных сланцах тесно связаны с рифтовыми процессами, зонами глубинных разломов и деструкции земной коры, и «одновременному поступлению из глубин земли и осаждению эндогенного углерода и благородных металлов». В качестве доказательства приводятся данные изотопного состава углерода, свидетельствующие о существенно мантийном вкладе в формировании углеродистого вещества черных сланцев.

Аргументация второй базируется на явной стратификации рудных тел на ряде месторождений вплоть до выделения «рудных пластов» с повышенными содержаниями благородных металлов (ряд объектов Бодайбинского района). Геологические данные подкрепляются геохимическими, в том числе по идентичности изотопии Pb в разных типах руд Ленского золоторудного района, позволяющими сделать вывод, что «первоначальный источник золота всех типов месторождений в Сухом Логе был дометаморфическим и синосадочным» [12].

Справедливости ради стоит сказать, что во всех объектах оба фактора (мантийный и седиментагенный) имеют место быть, но проявлены в различной степени. По мнению авторов статьи, определяющим является все-таки первично осадочный, а главным аргументом стоит считать первичную стратификацию ЧСФ.

Важнейшая роль в формировании благородно-металльного потенциала ЧС принадлежит углероду. В породах углерод образует линзовидные, глобулярные, микроплайчатые, амебообразные и другие типы микроагрегаций размером (0.05–0.1 мм) на фоне еще более тонкой относительно равномерно распыленной массы в силикатном материале.

По данным Марченко Л. Г. на материале изучения рудных объектов Бакырчинского района [11] наноразмерные твердые соединения углерода с металлами встречаются как в виде фуллеренов, так и в виде одностенных нанотрубок, сопровождающихся плотными частицами, состоящими из агрегатов палладиевого куперита (PdS<sub>2</sub>) с графитопташиумом (KC<sub>8</sub>). Кроме фуллереноподобных форм и нанотрубок, важная роль отводится шунгиту, в ассоциации с которым в разнообразных наноструктурах отмечены наноминералы ряда металлов в виде карбидов. Особую роль играет «зародышевая пленка» углерода графитового типа, которая может образовывать несовершенные многочисленные наноструктурированные формы, обладающие высоким захватывающим эффектом. Пленочная форма углерода

с повышенной поглощающей поверхностью отмечалась и для Сухого Лога [8]. Помимо отмеченных разнообразных структурированных форм углерода, в рудном процессе, по мнению Марченко Л. Г. [11] важную роль играли углеводороды, входящие в состав рудоформирующего флюида, способного приводить к взрывному эффекту с образованием углеродистых брекчий – флюидизатов.

#### Методика изучения и минеральные формы благородных металлов

В тесной связи с углеродистыми структурами ЧСФ в [3, 10] отмечаются наноразмерные платарсит PtAs<sub>2</sub>, эрлихманит OsS<sub>2</sub>, аурустибит AuSb<sub>2</sub>, карбиды интерметаллидов (Fe и Rt, Al и Rt, Cr и Rt), образующих совместные агрегаты с осарситом (Os, Ru)AsS. Для уточнения состава и форм выделения благородных металлов нами были изучены: исходный измельченный рудный материал, поступающий на ЗИФ (питатель), гравифлотоконцентрат, сульфидный концентрат и хвосты флотации одного из объектов на фланге месторождения Сухой Лог. Результаты изучения минеральных фаз перечисленных продуктов передела руды приведены в таблице 1.

**Табл. 1.** Результаты измерений содержаний минеральных фаз на рентгенофазовом дифрактометре ARL X'tra (Швейцария), аналитик (Дубков А.А.)  
**[Table 1.** Results of measurements of the contents of mineral phases on an X-ray diffractometer ARL X'tra (Switzerland), analyst (Dubkov A.A.)]

#### Питатель технологического цикла (перемолотая руда) [Feeder of the technological cycle (milled ore)]

Фаза [Phase]	Weight (%) [Содержание, %]	Error of Fit [Погрешность]
1	2	2
Кварц [Quartz]	39.7	1.17
Мусковит [Muscovite]	12.5	0.77
Пирит [Pyrite]	11	0.34
Хлорит [Chlorite]	7.6	0.44
Альбит [Albite, low]	6.4	0.54
Алмаз [Diamond]	5.8	0.7
Волластонит [Wollastonite normal]	2.4	1.28
Волластонит [Wollastonite, pseudo]	2.3	0.43
Волластонит [Wollastonite, para]	2.1	1.24
Клинопироксен [Pyroxene, lino]	1.2	0.62
Диселенид родия [Rhodium diselenide]	1.1	0.13

Продолжение Табл. 1  
[Continued Table 4]

1	2	3
Сульфат серебра [Silver sulphate]	0.8	0.1
Гроссуляр [Grossular, ferr., garnet 1]	0.8	0.35
Гроссуляр [Grossular, ferr., garnet 2]	0.8	0.51
Ортоклаз [Orthoclase 1]	0.7	0.58
Гроссуляр [Grossular]	0.7	0.48
Доломит [Dolomite]	0.6	0.31
Анкерит [Ankerite]	0.5	0.25
Биотит [Biotite]	0.5	0.48
Диселенид платины [Platinum diselenide]	0.5	0.05
Оксид серебра [Silver oxide]	0.5	0.05
Халькопирит [Chalcopyrite]	0.4	0.09
Гроссуляр [Grossular, -Y, garnet]	0.3	0.28
Галенит [Galena]	0.2	0.03
Дисульфид платины [Platinum disulphide]	0.2	0.04
Шпинель [Iron silicate spinel]	0.2	0.16
Оксид рутения [Ruthenium oxide]	0.1	0.07
Тетрооксид серебра [Silver oxide (tetra)]	0.1	0.06

Гравифлотоконцентрат ГФК  
[Graviflotoconcentrate GFK]

Фаза [Phase]	Weight (%) [Содержание, %]	Error of Fit [Погрешность]
Кварц [Quartz]	39.6	0.73
Мусковит [Muscovite]	25.3	0.74
Альбит [Albite, low]	8	0.58
Хлорит [Chlorite]	7.4	0.67
Доломит [Dolomite]	4	0.53
Волластонит [Wollastonite, pseudo]	3	0.35
Анкерит [Ankerite]	2.6	0.43
Волластонит [Wollastonite normal]	2.6	0.38
Кальцит [Calcite 2]	2.4	0.22
Алмаз [Diamond]	1.3	0.62
Каолин [Kaolin]	1.3	0.43
Ортопироксен [Pyroxene, ortho]	1	0.52
Дисульфид платины [Platinum disulphide]	0.3	0.03
Сульфат серебра [Silver sulphate]	0.2	0.09
Оксид серебра [Silver oxide]	0.2	0.04
Сфалерит [Sphalerite]	0.2	0.06

Сульфидный концентрат (пириты)  
[Sulfide concentrate (pyrites)]

Фаза [Phase]	Weight (%) [Содержание, %]	Error of Fit [Погрешность]
Пирит [Pyrite]	83.9	2.76
Ортоклаз [Orthoclase 1]	3.7	1.8
Альбит [Albite, low]	3.5	1.83
Кварц [Quartz]	3.2	0.61
Доломит [Dolomite]	2.5	1.04
Волластонит [Wollastonite, para]	1.5	1.4
Оксид серебра [Silver (I) oxide]	0.6	0.2
Диселенид платины [Platinum diselenide]	0.6	0.18
Сульфат серебра [Silver sulphate]	0.5	0.34

Хвосты флотации  
[Flotation tailings]

Фаза [Phase]	Weight (%) [Содержание, %]	Error of Fit [Погрешность]
Кварц [Quartz]	37.7	0.81
Мусковит [Muscovite]	31.2	1
Хлорит [Chlorite]	12	1.03
Альбит [Albite, low]	9.1	0.68
Волластонит [Wollastonite, normal]	4.1	0.56
Волластонит [Wollastonite, pseudo]	3.5	0.5
Каолин [Kaolin]	0.7	0.64
Кальцит [Calcite 2]	0.6	0.32
Диселенид платины [Platinum diselenide]	0.5	0.05
Сульфат серебра [Silver sulphate]	0.4	0.13
Дисульфид платины [Platinum disulphide]	0.1	0.05
Сфалерит [Sphalerite]	0.1	0.09

### Методика

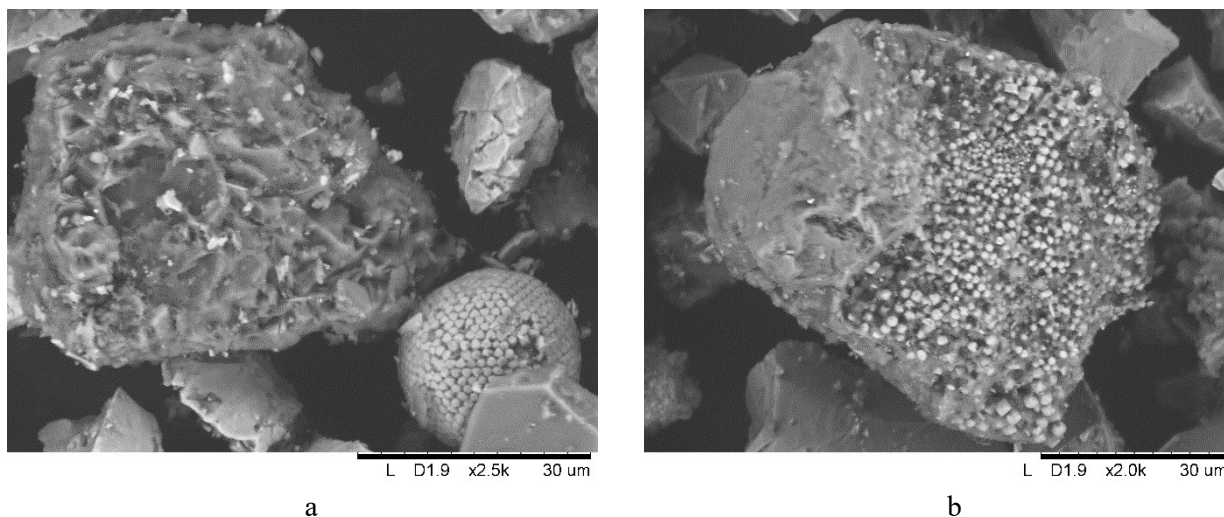
Исследования проводились в лаборатории ВНИГНИ (г. Москва) на рентгенофазовых дифрактометрах ARL X'tra (Швейцария). В одном из которых для фазового анализа используется база данных (файл карточек порошковой дифракции) ICDD PDF-2 включающая более 157 000 минеральных видов (2012 год создания), в другом – расширенная его версия ICDD PDF – 2, (2019 год), содержащая более 453 000 наборов карточек данных по различным кристаллическим веществам. Особенностью работы дифрактометра является отсутствие в его базе данных самородных элементов. В связи с чем присутствие благородных металлов в самородной форме он не фиксирует. Каждый набор содержит дифракционные, кристаллографические и библиографические сведения, наряду с информацией об инструменте, условиях эксперимента и приготовления образца, а также приводимые

в общем стандартизированном формате отдельные физические свойства вещества. PDF-2 является продуктом совместной разработки фирм: ICDD, FIZ и NIST и предназначен для анализа неорганических материалов (кристаллитов). В целях повышения достоверности определения время обработки одного образца на дифрактометрах составляло от 60 до 80 минут (в 3–4 раза выше по сравнению со стандартным методом исследования порообразующих минералов на дифрактометре). Качественный анализ данных, полученных на этом приборе, проводили с использованием программного обеспечения Oxford Crystallographica. Количественный рентгенофазовый анализ проводился с использованием программного обеспечения Siroquant Sietronics Pty Ltd.

Анализ таблиц показывает, что во всех продуктах, начиная от исходной руды и заканчивая сульфидным

концентратом и хвостами переработки, отмечаются существенные количества диселенида родия ( $RhSe_2$ ), диселенида платины ( $PtSe_2$ ), дисульфида платины ( $PtS_2$ ), оксида рутения ( $RuO$ ), оксидов и тетроксидов серебра. На поверхности и внутри некоторых зерен измельченной руды при большом разрешении видны наноразмерные минералы МПГ (рис. 1).

Таким образом, изучение форм и размерности драгметаллов в черных сланцах, а также обобщение опубликованных данных, позволяют сделать предварительные выводы: 1) кроме самородных форм, благородные металлы в существенных, даже подавляющих количествах находятся в виде соединений с S, Te, As, Se, Sb, а также карбидов, интерметаллидов, реже оксидов; 2) размерность таких минеральных форм отвечает, главным образом, наноуровню т.е. менее 1 мкм.



**Рис. 1.** Измельченная руда сухоложского типа (ЗИФ GV Gold) с минералами металлов платиновой группы (светлые): *a* – тонкая вкрапленность, *b* – наноразмерная (коллоидная сыпь).

[**Fig. 1.** Crushed ore of the sukholozhsky type (Mill GV Gold) with minerals of platinum group metals (light): *a* – fine dissemination, *b* – nanosized (colloidal rash).]

### Корообразование по ЧСФ и технологии самосборки

Для определения путей реализации природоподобных технологий представляется очень важным понять влияние процессов корообразования на россыпи. До настоящего времени это влияние рассматривалось достаточно просто и понятно – коры выветривания представляют собой легко размываемый субстрат, из которого устойчивые, плотные минералы переносятся и накапливаются с образованием россыпей по законам гравитации. Создан огромный научный задел и целое направление по изучению россыпей гравитационно обогатимых минералов [13].

Помимо развития классических представлений на формирование россыпей, настало время изучить и понять: какие процессы приводят к появлению россыпей за счет «пустых» пород. Прежде всего это относится к «черным сланцам». Данных о россыпеобразующем потенциале кор выветривания по черным сланцам за счет

наноразмерных форм Au просто нет. Зато есть явное несоответствие между реально добытым гравитационным способом металлом из россыпей и потенциалом гравитационно извлекаемого Au из руд, например, Ленского золоторудного района. За время эксплуатации Ленских россыпей добыто более 2000 т металла [3], в то время как суммарный ресурсный потенциал коренных источников на такой тип золота на порядок меньше. Следовательно, значительная часть россыпей сформирована за счет самособранного металла из тонко- и нанодисперсного состояния.

О миграционной способности Au при корообразовании по черным сланцам говорят результаты изучения коренного объекта «Мариле» в республике Гвинея. Коренные породы представлены черными алевролитами и сланцами, относимыми к бирримию, с прожилками кварцевого и карбонатно-кварцевого состава со слабой импрегнацией пиритом. Мощность коры выветривания, включая кирасу, составляет от 11–12 м до

20–21 м. По результатам СЗМ (спектрозолотометрии), заверенной пробирно-атомноабсорбционным методом, выявлены следующие закономерности его содержания. При фоновом содержании золота (визуально не определяемом) в метааллевропелитах бирримия ~ 1.25 г/т на нижней границе литомаржа (мощностью 1–2 м), содержания повышаются до 2.6–2.7 г/т, в основной части литомаржа они падают до 0.3 г/т, а в кирасе (мощностью 1–2 м) возрастают до 3.5–5.0 г/т. Такое поведение золота свидетельствует о его миграционной способности зеркального типа (как вверх, так и вниз) и связано с ярко выраженной сезонностью климата (во время дождей миграция золота происходит вниз, а в «сухой» период вверх по капиллярам) (рис. 2).



Рис. 2. Схема миграции золота в коре выветривания по сланцам бирримия (участок Мариле р.Гвинея).

[Fig. 2. Scheme of gold migration in the weathering crust along the berrimum shale (Morele section of the Guinea River).]

При этом, Au мигрирует в виде гумидных соединений, а осадителем служит железо кирасы. В протолочках из кирасы отмечаются золотые песчинки и чешуйки размером до 0.5 мм.

Широко известны и другие факты наличия золотых россыпей при отсутствии коренных источников рудного золота. Речь идет о россыпях ближнего переноса и, частично, россыпях элювиального происхождения. Последние широко распространены в тропических и субтропических областях, где местное население вручную моет золото практически повсеместно, вне зависимости от субстрата, подвергнувшегося корообразованию. Например, для Западной Африки продуктивными являются как терригенные углеродистые породы бирримской серии (ранний протерозой), так и песчаники серии дубату (инфракембрий). Но самое интересное, что элювиальные отложения, сформированные на базальтовых плато палеоген-неогенового возраста, тоже продуктивны. В россыпях на базальтовом субстрате, помимо золота, в виде частиц песчаной размерности, реже мелких самородков, встречаются интерметаллические соединения Pt и Pd, Pt и Fe, Pt и Au, Au и Pd. Наибольшая обогащенность металлами благородной группы отмечается для границы литомаржа и коренных пород, а также для кирасы.

Поскольку самосборка характерна для самородных форм и интерметаллов, то существенная часть благородных металлов может перейти в это состояние только после окисления и, как следствие, освобождения от S, Se, Te, Sb и других подвижных элементов.

В субарктике и в зоне умеренных широт процессы гипергенеза ограничены физическим и начальной стадией химического разложения. Тем не менее, этого оказывается достаточно для окисления сульфидов, и частично, органического углерода, в результате которого наноразмерное золото вскрывается, создавая условия для самосборки. Широко известны факты повышения концентрации золота и его размерности в зонах вторичного сульфидного обогащения. Процесс вскрытия стимулируется морозобойным эффектом, который для субарктических регионов имеет растянутый временной, хотя и сезонный характер. «Самособранное золото» вносит существенный вклад в баланс россыпей северо-востока РФ, Ленского района, Забайкалья, Приморья и других золотодобывающих провинций. Следует отметить, что многочисленные легенды-рассказы, популярные среди старателей о «золочении» лопат и кирок, оставленных в хвостах в межсезонье, о росте самородков в бочках и об их находках в старых эфельных отвалах находят свое вполне научное обоснование.

Процессы самосборки металлов платиновой группы для умеренных широт и субарктических районов менее очевидны. Возможно, это связано с короткой историей их изучения (золотодобыча и все, что с ней связано, насчитывает тысячи лет, в то время как платиноиды изучаются не более двухсот лет).

Таким образом, коры выветривания вне зависимости от степени их зрелости являются поставщиком драгметаллов для россыпей. В них происходит укрупнение частиц металлов благородной группы от наноразмерного до тонкого, а затем до гравитационно обогащаемого. Более глубокое изучение процессов самосборки в гипергенных условиях является ключом к разработке новейших технологий извлечения металлов благородной группы.

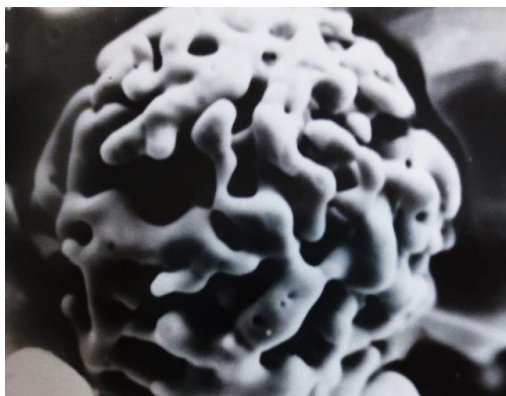
### Самосборка как технология будущего

Итак, самосборка является важнейшим направлением технологий будущего, она основана на природоподобных явлениях. Теоретические основы самосборки лежат в области нанохимии. Согласно [14] организация частиц благородных металлов в целом соответствует схеме: 1) атом, 2) кластер (до 10 нм), 3) наночастица (до 100 нм), 4) коллоид (до 1000 нм), 5) «металл» (более 1 мкм).

Все привычные физические и значительная часть химических свойств проявляются, начиная с пятого уровня организации (~1 мкм), в то время как поведение частиц наноразмерной шкалы измерения в значительной степени еще не изучено.

Одними из первых, обратившими внимание на наноразмерные формы проявления драгметаллов были казахстанские ученые [15, 16].

Самособранные шарики Au с примесью Ag были получены из тонко измельченной золото-сульфидно-кварцевой руды путем перекачивания пульпы через грязевый насос в течение 30 мин (рис. 3). Таким образом, было положено начало этому направлению [14].



М-ние Бестобе. Ø 0,022 мм.  
Au-94.64%, Ag-5.38%



М-ние Fr,frfq. Ø 0,165 мм.  
Au-96.93%, Ag-3.03%

**Рис. 3.** Шарики, полученные в результате самосборки по [17].  
[Fig. 3. Balls obtained as a result of self-assembly according to [17].]

И хотя само понятие как «наноразмерное золото» стало появляться лишь в начале 21 столетия, результаты, которые были получены по самосборке начали свое развитие с конца 70х, начала 80х годов прошлого столетия.

Процесс самосборки, успешное моделирование которого уже делает первые шаги [18], представляет собой природоподобный алгоритм преобразования нанодисперсного материала в «металлическую», вплоть до гравитационно обогатимую форму. Упомянутый алгоритм предполагает вскрытие наночастиц и последующую их агломерацию.

После вскрытия наночастиц самосборка осуществляется в вихревой системе, которая обеспечивается перемешиванием пастообразной суспензии (соотношение Т:Ж ~ 1:1) при воздействии электрического поля низкой напряженности, от регулировки которой зависит эффективность и чистота агломерированных самособранных частиц [16]. Высокие результаты по самосборке платиноидов достигнуты Ю. Д. Калашниковым. При этом из наноразмерных частиц удалось получить агломераты платиноидов размером 0.1–0.5 мм, состоящие из 80% Pt и 20% Ru. Следует отметить, что в качестве исходного материала использовались руды золото-серебряной формации рудопроявления «Милоградское» (Приморье), в которых платина стандартными методами просто не улавливалась, и лишь на электронных снимках высокого разрешения отмечалась тончайшая «сыпь» платиновых металлов.

В лабораторных условиях агломерация ускоряется созданием искусственной вихревой среды в пастообразной субстанции и стимуляцией малым электрическим потенциалом в слабо щелочной среде. Укрупнение происходит в соответствии с принципом самоорганизации, выражающейся в хорошо проявленной фрактальности кластеров и наночастиц, которая по мере укрупнения постепенно затухивается. Наночастицы проявляются как точечные, одномерные (нитевидные, игольчатые), двухмерные (пленочные, чешуйчатые) или трехмерные (шаровидные, почковидные, часто табулированные) формы [19]. Максимальная склонность

к самосборке характерна для двумерных форм [18]. Чистота самособранных агрегатов регулируется электрическим потенциалом и варьирует от практически чистого золота или платины до разнообразных интерметаллических соединений (Au-Ag, Au-Cu, Au-Pt, Pt-Rh и др.) [16].

Помимо самосборки в технологиях обогащения и извлечения драгметаллов наметилось несколько направлений прорывного характера. Это: 1) различные способы суперизмельчения, открывающие доступ реагентов, к нескрытым частицам благородных металлов, переводящих их в раствор; 2) разработка методов подавления активности органического углерода, являющегося одной из основных причин «упорности» руд; 3) использование новых сорбентов, в том числе селективного действия.

В различных типах руд на долю наноразмерных (НРЧ) от атома до коллоида частиц приходится от 60% до 80% общего баланса металла [16]. НРЧ обладают высокой реакционной способностью и способностью к самоорганизации в виде самосборки, что достигается в случае их вскрытости. Формирующиеся образования имеют рыхлое ветвистое строение и чаще всего характеризуются фрактальной структурой. Процесс образования рудного золота в природной среде, и не только в корках выветривания, по-существу является самосборкой наноразмерных частиц, выделенных из материнской породы под влиянием различных факторов (метасоматоз, гидротермы). При этом происходит вскрытие и перераспределение (переформирование) наночастиц в металлическое золото.

Из изложенного вытекает, что наиболее эффективное обогащение можно достичь на основе природоподобных технологий, которые должны включать: 1) тонкое измельчение, обеспечивающее вскрытость НРЧ и 2) перевод последних либо в состояние самосборки, либо в растворенное состояние.

#### **Кавитация как основа технологий будущего**

Измельчение до наноразмерного состояния обычными применяемыми механическими способами в



принципе не возможно, так как это требует огромных энергозатрат, а к необходимому эффекту не приводит. Например, на Лебединском ГОКе при производстве магнетитового концентрата (степень измельчения 0.07–0.05 мм) на этот процесс уходит 70% всей электроэнергии. Подобная структура энергозатрат характерна и для золото-извлекающих фабрик (ЗИФ), работающих на черносланцевом типе руд. Из всего арсенала измельчителей (вихревые мельницы, ультразвуковые и электро-диспергаторы и т.д.) наиболее перспективными являются измельчители, построенные на принципах кавитации.

Кавитационные эффекты возникают при резком сбросе давления (~300 атм) в жидкостях, когда происходит декомпрессия, и жидкость вскипает с образованием микропузырьков вакуума, которые схлопываясь создают микроударные волны, разрушая частицы на поверхности которых они образуются. Степень диспергации при этом не ограничена, в связи с чем вскрываются НРЧ, в том числе кластерной организации.

Здесь уместно упомянуть, что в практике ГРП при подсчете запасов металла используется пробирный анализ, технология производства которого предполагает нагрев шихтованной пробы до 1000°C. При этом «выгорает» практически весь углерод и сера, захватывая с собой и львиную долю наноразмерного золота! Определенное пробирным анализом золото и серебро, и посчитанные на его основе запасы являются гарантированно извлекаемыми (как правило, не менее 80%). Вместе с тем, определенное другими методами золото (например, атомно-абсорбционным) через растворенные в кислотах или с использованием пирощелочной технологии [17] после тонкого измельчения дают обычно заметно более высокие результаты! На самом деле в этом парадокса никакого нет, просто при «холодном» растворении повышение содержания металла объясняется переходом в раствор части наночастиц, скрытых в сульфидной, силикатной или углеродистой оболочках.

Существующая в золотодобыче практика цианирования после измельчения иногда дает эффект появления надбалансового золота, что так же может быть объяснено неучтенной вскрытостью наноразмерных частиц, не определенных пробирным анализом. Избирательное растворение золота и серебра цианидами обуславливают процесс их дальнейшего извлечения. Именно эти свойства цианидов определяют их более широкое применение по сравнению с кислотным выщелачиванием. Хотя последнее переводит в раствор не только золото и серебро, но и металлы платиновой группы. Кавитация в этом плане открывает новые возможности.

Разберем на конкретном примере возможности кавитационного метода измельчения. Были изучены хвосты обогащения золотоизвлекающей фабрики одного из предприятий, работающего с упорной рудой черносланцевого типа.

Материал хвостов состоит из тонкоизмельченных частиц (на класс -0.07 приходится порядка 90% всего

объема), которые состоят из измельченной породной массы черного цвета с высоким содержанием углерода (70%), около 20% приходится на частицы кварцевого состава (иногда с включениями сульфидов) и частиц сульфидного состава, главным образом, пирита (до 10% от общего объема).

Наноразмерное золото связано с сульфидами и силикатами, а также с высокоуглеродистой породной массой. В этой связи, одной из задач было установление баланса золота, содержащегося как в сульфидах, так и в высокоуглеродистом веществе. Для этих целей была применена следующая многостадийная методика. Первая стадия предполагает выявление тонкого и наноразмерного золота, не вскрытого в сульфидной части хвостов и не переведенного в раствор при цианировании. Для этого часть исходного материала была растворена в царской водке при соотношении твердого к жидкому 1:4 в течении 4 часов для получения эталона сравнения. На второй стадии был использован метод кавитации для еще более тонкого измельчения и последующего перевода золота в раствор с помощью царской водки в тех же самых соотношениях и той же самой экспозиции воздействия. На третьей стадии была использована схема кавитации, совмещенная с хлоридным выщелачиванием, при которой часть золота была переведена в раствор, а твердая часть была подвержена растворению в царской водке с целью выявления остаточных содержаний драгметалла в кеке.

В исходном материале через растворение в царской водке, определялся концентрат Au в растворе и пересчете на руду содержание остаточного золота находится на уровне 0.7 г/т. После однократной кавитации с добавлением соляной кислоты часть золота перешла в раствор (в пересчете на исходный материал 1.25 г/т), а часть осталась в кеке (с содержанием 1.14 г/т). Общий баланс металла составил 2.39 г/т, т.е. за счет кавитационного измельчения достигнуто более чем трехкратное увеличение! При повторной кавитации отмечается снижение содержаний как в кеке, так и в растворе (соответственно 1.1 и 1.1; баланс 2.2 г/т). Третья кавитация дала дальнейшее снижение уровня содержаний (соответственно 0.86 и 0.85; баланс 1.71 г/т). Таким образом, увеличение экспозиции кавитационного измельчения приводит вначале к росту, а затем к заметному снижению содержания золота.

Причина кроется в активизации измельченного углерода при кавитации, в результате чего он забирает (сорбирует) на себя металл из раствора, а в кеке углерод капсулирует (закрывает) наночастицы, перекрывая доступ к ним растворителей.

Подобное поведение растворимого золота при кавитации отмечается и для других объектов с высокоуглеродистым типом руд (например, проявление Глухое, Приморье).

К настоящему времени при действующих ГОК, работающих с упорными высокоуглеродистыми рудами, накоплены гигантские объемы хвостов обогащения (сотни миллионов тонн), которые можно рассматривать как техногенные месторождения драгметаллов.

Если золото и серебро в свете новых технологических решений можно считать извлеченным и лишь частично, то металлы платиновой группы «сохранены» в хвостах полностью и в перспективе будут извлекаться на основе суперизмельчения с использованием безцианидных технологий.

### Заключение

Остановимся на важнейших выводах, касающихся благородно-металльного рудного потенциала отложенных черносланцевого типа.

1. Углерод черносланцевых комплексов имеет полигенную природу, включающую как эндогенные, так и экзогенный (седиментогенный) факторы, причем последний является доминирующим. Повышенный рудный потенциал ЧСФ связан с сорбционными свойствами углерода, отдельные разновидности которого (фуллерены, нанотрубки, нанопленки) обладают феноменальными поглощающими свойствами.

2. Благородные металлы в процессе седиментогенеза сорбировались на энергоемких поверхностях различных форм углерода в виде ионов, а в процессе диагенеза, катагенеза и начальных стадий метагенеза перераспределялись и самоорганизовывались как в виде самородных частиц (больше характерно для Au), так и в виде минеральных фаз совместно с S, Se, Te, Sb, As и другими элементами в катионной или анионной формах в виде комплексов (характерно больше для МПП).

3. Сами ЧСФ способны генерировать россыпные объекты (Au, и, в меньшей степени, МПП) в природных условиях за счет самосборки и укрупнения частиц от кластерной до наночастичной, ионной и, наконец «металлической» размерности. К самосборке склонны частицы, освобожденные от связей с примесями.

4. Рудный потенциал ЧСФ существенно выше, чем считается, но для его полного использования требуется, во-первых, добиться вскрытия наноразмерных частиц БМ, а во-вторых избавиться от активного углерода. Вскрытие достигается методами роторной кавитации, а вот нейтрализация активного углерода – задача более сложная. Используемый метод обжига приводит к потерям Au до 30%. Она имеет три варианта решения: 1) озонирование; 2) пергидрирование и 3) гидрирование. Первые два очень сложные в настройках (атомарный кислород способен окислять и наноразмерное золото, что приводит к его потерям при извлечении), а третий, не смотря на большие капиталовложения, имеет высокие перспективы.

5. Наибольше перспективными направлениями выглядит комбинация суперизмельчения кавитационным способом с последующим гидрированием и создание условий самосборки в обезуглероженном материале с конечным гравитационным извлечением БМ.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рифовые, соленосные и черносланцевые формации России. Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Том 355. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. 624 с.
2. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.
3. Додин Д. А., Чернышов Н. М., Яцкевич Б. А. Платинометалльные месторождения России. СПб.: Наука, 2000. 753 с.
4. Ненахов В. М., Никитин А. В., Фелюфьянов Д. С., Ненахова Е. В. Структурно-вещественные особенности рудного поля "Глухое" в контексте эволюции Журавлевского террейна (Сихотэ-Алинь) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 1. С. 67–76. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1431>
5. Марченко Л. Г. Микро-наноминералогия золота и платиноидов в черных сланцах. Алматы: Интерпресс-Казахстан, 2010. 146 с.
6. Макарьев Л. Б. Платиноносность докембрийских формаций Северо-Восточного Забайкалья. Платина России. М.: АО «Геоинформмарк», 1994. С. 155–159
7. Буряк В. А., Хмелевская Н. А. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.
8. Лаверов Н. П., Дистлер В. В., Митрофанов Г. Л. Платина и другие самородные металлы в рудах месторождения Сухой Лог // *Докл. РАН*. 1997. Т. 335. № 5. С. 664–668.
9. Гаврилов А. М., Кряжев С. Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // *Геология и методика поисков и разведки месторождений*. 2008. № 8. С. 3–16.
10. Марченко Л. Г. Модель формирования месторождений благородных металлов с тонкодисперсными рудами в черных сланцах // *Геология и охрана недр*. 2007. №1. С. 33–41.
11. Марченко Л. Г. Нетрадиционные месторождения платиноидов или комплексные золото-платиноидные месторождения «черносланцевого» типа (микро-наноминералогия) // *Геология и охрана недр*. 2011. №4. С. 42–46.
12. Проценко В. Ф. Гипотезы и фактография рудогенеза в черносланцевых толщах. Отв. ред. С. Т. Бадалов, М. У. Исоков. Т.: ГП «Научно-исследовательский институт минеральных ресурсов». 2012. 264 с.
13. Шило Н. А. Учение о россыпях. Рос. акад. наук. Дальневост. отд-ние 2-е изд. Владивосток: Дальнаука, 2002. 575 с.
14. Помогайло А. А., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. Москва, «Химия». 2000. 627 с.
15. Абдуллин А. А., Матвиенко В. Н., Нарсеев В. А. Наноминералогия золота золоторудных месторождений основных промышленных типов // *Отечественная геология*. 2000. № 3. С. 20–40.
16. Матвиенко В. Н., Ненахов В. М., Калашников Ю. Д., Левин В. Л. Роль природных кластеров благородных металлов как источника рудного вещества при формировании месторождений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. №3. С. 36–49. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.3/1560>
17. Матвиенко В. Н., Калашников Ю. Д., Нарсеев В. А. Кластеры – протоформа нахождения драгметаллов в рудах и минерализованных породах // *Руды и металлы*. 2004. № 5. С. 28–36.
18. Ненахова Е. В., Сахо В. Г., Калашников Ю. Д., Ненахов В. М., Кузнецов А. Ю Самосборка нанодисперсных форм платиноидов как метод их извлечения на примере золото-серебряных руд Милоградского проявления (Приморский край) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 4. С. 102–106. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1675>
19. Ненахов В. М., Ненахова Е. В., Никитин А. В., Караичев О. В. Новое в технологии извлечения благородных металлов из упорных высокоуглеродистых руд // *Актуальные вопросы геологии*: материалы Международной научно-практической конференции. Белгород, 2019. С. 149–153.

## **Black shales of the Sukhoi Log type and their noble metal potential: current state of study, technological realities and prospects**

©2021 V. M. Nenakhov<sup>1✉</sup>, G.S. Zolotareva<sup>1</sup>, A. A. Dubkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation

<sup>2</sup>All-Russian Research Geological Oil Institute,  
36 Shosse Entuziastov, Moscow 105118, Russian Federation

### **Abstract**

*Introduction:* The aim of this article was to determine methods to overcome the existing problems of implementing new technologies for the extraction of noble metals from black shale ores. The main ones are: 1) a profound study of black shales in terms of their origin, nature, and forms of carbon presence; 2) studying the mineral forms of noble metals at the nanoscale; 3) natural conditions for the self-organisation (self-assembly) of noble metal nanostructures; 4) modelling of the natural conditions of self-assembly, and 5) the search for effective methods of developing nano-sized particles of precious metals and their compounds. The authors analysed the existing perspectives based on the concept of “black shales”, their origin, sedimentation conditions, geodynamic conditions of formation, and nature and forms of carbonaceous matter present in them. The reasons for the increased noble metal ore potential of black shale formations were considered in detail.

*Methodology:* the study of nanoscale noble metals was carried out on a Swiss-made X-ray diffractometer using a huge database (up to 453,000 definitions) and appropriate software. The article provides data on the existing mineral forms of noble metals, including the nanoscale state according to the literature and original data, obtained during the study of ores of the Sukhoi Log-type deposits in Russia and Kazakhstan. The role of nanostructured ore matter in such types of deposits was shown. Reasons were indicated for both the under-extraction of Au and the complete “disregard” of platinum group metals during the development of deposits.

*Results and discussion:* The natural processes of crust formation (for black shales), leading to the self-assembly of noble metals, were considered. Examples are given when alluvial metal sources are formed from negligible Au contents in parent rocks as a result of crust-forming processes. We believe that the issue of the involvement of the ore potential of platinum group metals in industrial production may be resolved by the use of nature-like technologies. Their theoretical and practical foundations were laid several decades ago by a group of scientists from Kazakhstan. The technologies of the future should be based on the processes of super-grinding and the transfer of particles of noble metals into a state of self-assembly. Self-assembly is possible only for “native” particles with no valence bonds.

*Conclusions:* To process ores with a high carbon content, we need to find the most effective ways to eliminate active carbon for the technologies of the future, and one of the methods of its neutralization is hydrogenation. With the introduction of new technologies, it will be possible not only to increase the recovery of Au from primary ores, but also to involve in the re-extraction the processing tailings accumulated by existing enterprises. In conclusion, the most important observations were provided regarding the noble metal potential of black shale and future extraction technologies, including: 1) the positive and negative roles of carbon were determined; 2) the importance of studying black shale weathering crusts as natural self-assembly “factories” was shown; 3) on the basis of clause 2, methods for the complex extraction of noble metals were outlined, which are based on cavitation.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Viktor M. Nenakhov, e-mail: [nenakhov@geol.vsu.ru](mailto:nenakhov@geol.vsu.ru)

**Keywords:** black shales, nanosized noble metals, cavitation, self-assembly, nature-like technologies.

*For citation:* Nenakhov V. M., Zolotareva G.S., Dubkov A. A. Black shales of the Sukhoi Log type and their noble metal potential: current state of study, technological realities and prospects. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3337>

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

#### REFERENCES

1. Rifovye, solenosnye i chernoslansevye formatsii Rossii [Reef, saline and black shale formations of Russia]. Proceedings of VSEGEI. New episode. Vol. 355. St. Petersburg, Publishing house VSEGEI, 2015, 624 p. (in Russ.)
2. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of black shale]. Leningrad, Nauka publ., 1988, 272 p. (in Russ.)
3. Dodin D. A., Chernyshov N. M., Yatskevich B. A. *Platinometal'nye mestorozhdeniya Rossii* [Platinum-metal deposits of Russia]. St. Petersburg, Nauka publ., 2000, 753p. (in Russ.)
4. Nenakhov V. M., Nikitin A. V., Felofyanov D. S., Nenakhova E. V. Structural and material features of the «Glukhoe» ore field in the context of the evolution of the Zhuravlevsky terrane (Sikhote-Alin). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 1, pp. 67–76. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1431>
5. Marchenko L. G. *Mikro-nanomineralogiya zolota i platinoidov v chernykh slantsakh* [Micro-nanomineralogy of gold and platinum in black shales]. Almaty, Interpress-Kazakhstan publ., 2010, 146 p. (in Russ.)
6. Makariev L. B. *Platinonosnost' dokembriiskikh formatsii Severo-Vostochnogo Zabaikal'ya. Platina Rossii* [Platinum-bearing Precambrian carbonaceous formations of Northeastern Transbaikalia. Platinum of Russia]. Moscow, Geoinformmark publ., 1994, pp. 155–159. (in Russ.)
7. Buryak V. A., Khmelevskaya N. A. *Sukhoi Log – odno iz krupneishikh zolotorudnykh mestorozhdenii mira (genesis, zakonomernosti razmeshcheniya orudneniya, kriterii prognozirovaniya)*. [Sukhoi Log is one of the largest gold deposits in the world (genesis, patterns of mineralization distribution, forecasting criteria).] Vladivostok, Dalnauka publ., 1997, 156 p. (in Russ.)
8. Laverov N. P., Distler V. V., Mitrofanov G. L. Platina i drugie samorodnye metally v rudakh mestorozhdeniya Sukhoi Log [Platinum and other native metals in ores of the Sukhoi Log deposit]. *Dokl. RAN. – Dokl. RAS*. 1997, vol. 335, no. 5, pp. 664–668. (in Russ.)
9. Gavrilov A. M., Kryazhev S. G. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud mestorozhdeniya Sukhoi Log [Mineralogical and geochemical features of ores from the Sukhoi Log deposit]. *Geologiya i*

*metodika poiskov i razvedki mestorozhdenii – Geology and methods of prospecting and exploration of deposits*, 2008, no. 8, pp. 3–16. (in Russ.)

10. Marchenko L. G. Model' formirovaniya mestorozhdenii blagorodnykh metallov s tonkodispersnymi rudami v chernykh slantsakh [Model of the formation of deposits of noble metals with fine ores in black shales]. *Geologiya i okhrana nedr – Geology and conservation of mineral resources*. 2007, no. 1, pp. 33–41. (in Russ.)
11. Marchenko L. G. Netraditsionnye mestorozhdeniya platinoidov ili kompleksnye zoloto-platinoidnye mestorozhdeniya «chernoslantsevogo» tipa (mikro-nanomineralogiya) [Unconventional deposits of platinum or complex gold-platinum deposits of the "black shale" type (micro-nanomineralogy)]. *Geologiya i okhrana nedr – Geology and conservation of mineral resources*, 2011, no. 4, pp. 42–46. (in Russ.)
12. Protsenko V. F. *Gipotezy i faktografiya rudogeneza v chernoslansevyykh tolshchakh* [Hypotheses and factography of ore genesis in black shale strata]. otv. ed. S. T. Badalov, M. U. Isokov; State Committee of the Republic of Uzbekistan for Geology and Mineral Resources, State Enterprise «Scientific Research Institute of Mineral Resources» publ., 2012, 264 p. (in Russ.)
13. Shilo N. A. *Uchenie o rosspyakh* [The doctrine of placers]. Vladivostok, Dalnauka publ., 2002, 575 p. (in Russ.)
15. Pomogailo A. A., Rosenberg A. S., Uflyand I. E. *Nanochastitsy metallov v polimerakh* [Nanoparticles of metals in polymers]. Moscow, Chemistry publ., 2000, 627 p. (in Russ.)
15. Abdulin A. A., Matvienko V. N., Narseev V. A. Nanomineralogiya zolota zolotorudnykh mestorozhdenii osnovnykh promyshlennykh tipov [Nanomineralogy of gold from gold deposits of the main industrial types]. *Otechestvennaya Geologiya*. 2000, no. 3, pp. 20–40. (in Russ.)
16. Matvienko V. N., Nenakhov V. M., Kalashnikov Yu. D., Levin V. L. The role of natural clusters of noble metals as a source of ore matter in the formation of deposits. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 3, pp. 36–49. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.3/1560>
17. Matvienko V. N., Kalashnikov Yu. D., Narseev V. A. Klastery – protoforma nakhozheniya dragmetallov v rudakh i mineralizovannykh porodakh [Clusters are a protoform of finding precious metals in ores and mineralized rocks]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2004, no. 5, pp. 28–36. (in Russ.)
18. Nenakhova E.V., Sakhno V. G., Kalashnikov Yu. D., Nenakhov V. M., Kuznetsov A. Yu. Self-assembly of nanodispersed forms of platinum as a method for their extraction on the example of gold-silver ores of the Milogradov occurrence (Primorsky Territory). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 4, pp. 102–106. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1675>
19. Nenakhov V. M., Nenakhova E. V., Nikitin A. V., Karaichev O. V. ovoe v tekhnologii izvlecheniya blagorodnykh metallov iz upornykh vysokouglerodistykh rud [New in the technology of extraction of noble metals from refractory high-carbon ores]. *Aktual'nye voprosy geologii, materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of geology: materials of the International scientific-practical conference]. Belgorod, 2019, pp. 149–153. (in Russ.)

*Ненахов Виктор Миронович* – д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой общей геологии и геодинамики, ВГУ, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: [nenakhov@geol.vsu.ru](mailto:nenakhov@geol.vsu.ru);  
*Золотарева Галина Сергеевна* – к. г.-м. н., доцент кафедры общей геологии и геодинамики, ВГУ, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: [akcessoriy@mail.ru](mailto:akcessoriy@mail.ru);  
*Дубков Александр Алексеевич* – геолог, Всероссийский научно-исследовательский нефтяной институт, Москва, Российская Федерация; E-mail: [dubston@mail.ru](mailto:dubston@mail.ru)  
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Victor M. Nenakhov* – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Head of the Department of General Geology and Geodynamics, Voronezh, Russian Federation; E-mail: [nenakhov@geol.vsu.ru](mailto:nenakhov@geol.vsu.ru);  
*Galina S. Zolotareva* – PhD in Geol.-Min., Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: [akcessoriy@mail.ru](mailto:akcessoriy@mail.ru);  
*Aleksandr A. Dubkov* – geologist, All-Russian Research Geological Oil Institute, Moscow, Russian Federation; E-mail: [dubston@mail.ru](mailto:dubston@mail.ru)  
All authors have read and approved the final manuscript.