

УДК 622.271.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ЗОН  
В ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТА**

**В. С. Алексеев, П. П. Сас, Р. С. Серый**

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: adm@igd.khv.ru,  
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Недооценка резерва сырьевой базы россыпной золотодобычи — техногенных отвальных комплексов — создает негативные социально-экономические последствия для регионов традиционной россыпной золотодобычи. Однако эффективное их освоение возможно только при условии применения новых и рациональных технологий подготовки и глубокой переработки горной массы для последующего извлечения комплекса ценных минералов. Для создания такой технологии проведены широкомасштабные теоретические и экспериментальные исследования по изучению характера и степени влияния факторов, составляющих основу технологии, на процессы миграции и концентрацию частиц золота в техногенном массиве горных пород.

*Техногенные россыпи, криогенные процессы, суффозия, фильтрационные потоки, миграция частиц золота, формирование продуктивного пласта*

DOI: 10.15372/FTPRPI20170620

Эксплуатация россыпных месторождений цветных, благородных и редких металлов для Дальневосточного региона Российской Федерации имеет чрезвычайно важное значение, и несмотря на тревожные прогнозы относительно исчерпаемости запасов, их освоение будет продолжаться в течение многих лет. Россыпные месторождения включают в себя все основные черты геосистемы, отражающей единство и взаимосвязь следующих компонентов: недр, природных процессов, техники и технологий, социально-экономических структур, системной организации, производственной деятельности и др. [1].

По оценкам специалистов [2–9], потенциал ресурсов техногенных россыпей достаточно велик. В золотодобывающих районах скопились значительные объемы золотосодержащих отвальных комплексов — миллиарды кубических метров галечных, эфельных отвалов, торфов и т. п.

Необходимость более внимательного и конструктивного отношения к проблеме увеличения добычи золота из россыпей связана также с экологическим состоянием районов россыпной золотодобычи. Отходы эксплуатации первичных геогенных месторождений представляют собой серьезную угрозу природной среде, учитывая, что только по Дальневосточному Федеральному округу объемы их горной массы составляют более 2 млрд м<sup>3</sup>.

Техногенные россыпные месторождения являются весьма существенным резервом минерально-сырьевой базы благородных металлов, но их освоение осложняется тем, что ценные компоненты в массиве находятся в хаотическом, рассеянном состоянии, и их добыча связана со сплошной переработкой всего объема техногенных образований, что зачастую оказывается нерентабельным в связи со значительными материальными и финансовыми затратами. Поэтому проблема создания эффективного способа освоения техногенных россыпей актуальна и имеет большое финансовое и социальное значение.

На основании изучения техногенных россыпных образований установлено явление внутритвалового обогащения россыпи, при котором под воздействием преимущественно природных факторов происходит миграция и концентрация частиц благородных металлов в нижние горизонты массива. К этим факторам отнесены следующие процессы: гидродинамические, включающие фильтрационные и суффозионные; криогенные и микросейсмические.

Наиболее близки по генетической и технологической сути аналоги этих процессов — природные процессы россыпеобразования, в частности геологическая дифференциация минерального вещества. Термин “дифференциация” используется для характеристики многих геологических процессов, при которых из исходного минерального сырья образуются вторичные продукты, генетически связанные с ним, но имеющие иной состав или иные признаки [10].

В отличие от процессов формирования продуктивного пласта техногенной россыпи, геологическая дифференциация минерального вещества несоизмеримо более длительна по времени, однако знание ее особенностей необходимо для оценки и учета всех факторов, способствующих миграции ценных компонентов аллювиальной горной массы в приплотиковую область отвальных комплексов. Дифференциация минеральной горной массы техногенных отвальных комплексов россыпных месторождений отражает процессы селективного формирования продуктивного пласта, т. е. закономерное разделение и смещение в минеральной горной массе техногенных отвальных комплексов отдельных монофракций ценного компонента и вмещающих пород относительно друг друга в зависимости от их морфологических, гранулометрических, гидравлических, физических характеристик под воздействием природных и антропогенных процессов.

В [11] выделены механическая и химическая дифференциации вещества. В природных условиях при перемешивании пород частицы разделяются в первую очередь по крупности с образованием пачек конгломератов, песков, глин и др., после чего происходят процессы разделения равнозернистого материала по удельному весу и форме минеральных частиц, что обуславливает образование россыпей полезных ископаемых.

Формирование продуктивного пласта техногенной россыпи наиболее близко соотносится с процессами, характеризуемыми понятием “механическая дифференциация” — это совокупность геологических процессов, приводящих к разделению твердых частиц по удельному весу и форме. А. Е. Ферсман ввел термин “механогенез”, близкий понятию механической дифференциации [12]. Проблема дифференциации осадочного материала рассматривалась также многими другими исследователями [13–15].

На основе детального изучения распределения золота в условиях россыпных месторождений Якутии и Магаданской области, проведения экспериментальных работ по моделированию процессов россыпеобразования показано, что перемещение частиц металла происходит в результате проецирования отдельных монофракций [10]. Исследования процессов миграции частиц золота в аллювиальной техногенной среде позволяют утверждать, что этот вывод в определенной степени справедлив и для процессов, происходящих в отвалах техногенных россыпей. При этом установлено некоторое смещение монофракций металла в направлении уклона россыпи в зависимости от скорости и расхода фильтрационного потока.

В то же время процессы миграции ценных компонентов в аллювиальной техногенной среде, несмотря на сходство, имеют существенные отличия от процессов первичного россыпеобразования. Они обусловлены в основном временным и энергетическим факторами при воздействии на частицы благородных металлов гидродинамических, фильтрационно-суффозионных, криогенных и микросейсмических процессов.

Как уже отмечалось, одна из особенностей техногенных россыпей — стохастический характер распределения золота и других ценных компонентов в массиве, что обуславливает при их освоении необходимость разработки и обогащения всего объема горной массы, поэтому в услови-

ях, когда содержание ценных компонентов мало, вовлечение техногенных россыпей в отработку оказывается нерентабельным. По этой причине формирование техногенных россыпей нового типа с селективным расположением продуктивного пласта песков в нижних горизонтах является важной научной и практической проблемой. Приплотиковый обогащенный пласт, как правило, характеризуется однородной структурой, относительно небольшим объемом продуктивной горной массы, что позволяет более экономично и технологично осуществлять освоение техногенных россыпей.

Сама технология заключается в следующем: в верхней и нижней частях подготавливаемого блока техногенных песков проходят соответственно водозаводную и аккумулирующую каналы, после чего в блоке создается фильтрационный поток, который обеспечивает перемещение частиц золота в вертикальном направлении. При длительном воздействии такого потока в нижней части блока формируется обогащенный слой песков. Это позволяет отделить пески с низким содержанием золота и значительно сократить объем промывки.

С целью изучения процессов, составляющих основу технологии, в 2008–2009 гг. проведены лабораторные исследования влияния криогенных процессов на эффективность миграции частиц золота [16, 17]. В каждом из пяти сосудов высотой и диаметром 10 см в поверхностном слое размещались частицы золота определенной крупности (рис. 1, линия 1), после чего он промораживался 12 ч при температуре минус 18°C, а затем размораживался в течение суток при комнатной температуре. После проведения 21 цикла “промерозки – протаивания” (П–П) порода слоями толщиной 2 см извлекалась из сосудов, обогащалась в тяжелой жидкости, после чего частицы золота выбирались вручную под биноклем. Установлено, что золото фракции –0.25 мм мигрировало на всю глубину горной массы (рис. 1), причем дна сосуда достигло 7.1 % этой фракции.

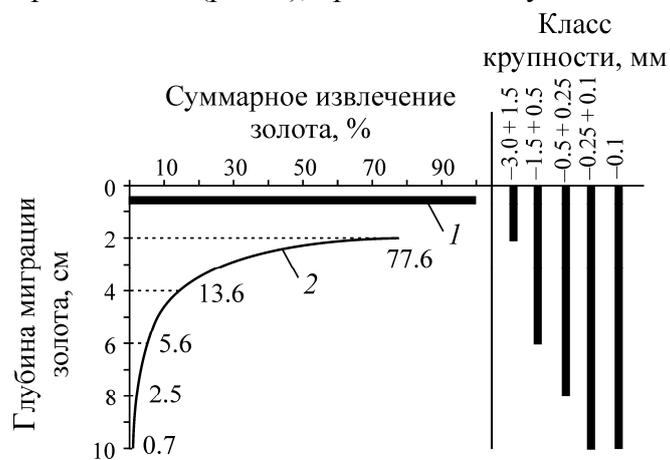


Рис. 1. Характер распределения золота: 1 — в каждой пробе до эксперимента; 2 — в вертикальном интервале после 21 цикла “промерзания – протаивания”

Отличительной особенностью следующего эксперимента является то, что за основной влияющий фактор принято количество  $N$  циклов П–П. На рис. 2 показано распределение золота при различном количестве циклов П–П, из которого следует, что чем больше циклов П–П, тем золото глубже распределяется по мощности горной массы.

Наиболее эффективно мигрировало золото фракции –0.25 мм. Количество золота этой фракции, оставшегося в месте заложения после проведения эксперимента, составляет 78.5, 73.8, 50.0 и 43.8% при  $N$ , равном 3, 5, 10 и 15 соответственно; дна сосуда достигло от 6.3 до 11 % этой фракции. Крупные частицы золота (–1.5+0.5 мм) мигрировали хуже остальных. При  $N = 3$  и  $N = 5$  миграции этой фракции не наблюдалось, при  $N = 10$  и  $N = 15$  золото распределено

лось между двумя верхними интервалами, причем содержание во втором интервале составило 40.5 и 37.7% соответственно. Согласно представленным данным, криогенные процессы как самостоятельный фактор оказывают незначительное воздействие на миграцию частиц золота, а основной влияющий фактор — наличие фильтрационного потока.

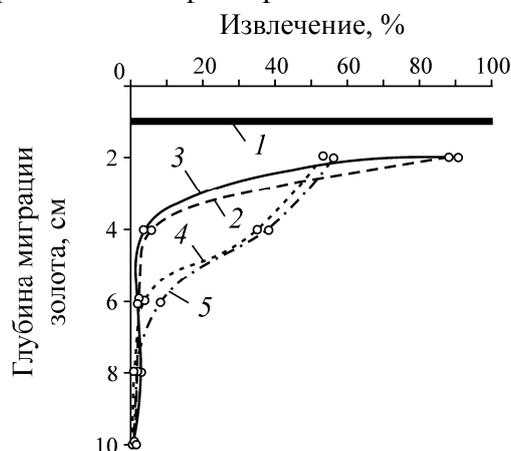


Рис. 2. Суммарное извлечение золота из проб при различном количестве циклов “промерзания – протаивания”: 1 — размещение золотин до эксперимента; 2–5 — количество золота после 3, 5, 10 и 15 циклов соответственно

В дальнейших исследованиях изучалось влияние комплекса процессов на миграцию золота. В первом эксперименте миграция золота осуществлялась под воздействием только безнапорных потоков воды, во втором — под воздействием безнапорных потоков воды и циклов П–П. Эксперименты проводились параллельно на созданной установке, включающей 6 емкостей размером 25×12×10 см, к каждой из которых подведен трубопровод с возможностью регулирования расхода воды, который составил 10 л/ч. В первых пяти емкостях золото определенной крупности помещалось в поверхностном слое; в шестой емкости, предназначенной для выполнения эксперимента с циклами П–П, в поверхностном слое размещалось золото всех классов крупности. В каждой емкости миграция происходила под воздействием фильтрационного потока в течение 25 сут. Одна из емкостей дважды промораживалась при температуре минус 18°С, а после оттаивания при комнатной температуре продолжалось воздействие потоком воды. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

При комплексном воздействии внешних факторов на горную массу распределение золота по мощности образца породы протекало наиболее эффективно: миграция золота в нижележащие слои возросла с 20 до 64.3%. Дна сосуда достигла фракция –0.1 мм, причем при комплексном воздействии на 19% больше. Анализ содержания по длине породы в емкости показал, что перемещение частиц золота в горизонтальной плоскости происходит только за счет энергии потока воды.

В 2010 г. исследования миграции золота проводились в природных условиях. В шурф укладывались эфельные фракции отработки россыпи руч. Болотистый, из которого непрерывно подавалась вода. В зимний период горная масса промораживалась, а после оттаивания проводилась ее послойная выемка. Общая продолжительность эксперимента составила 300 дней.

На рис. 4 четко прослеживается изменение содержания золота по глубине относительно исходного: в верхнем слое оно уменьшилось на 62%, в нижнем увеличилось на 68.9%. Увеличение содержания произошло преимущественно за счет миграции фракции –0.25 мм. Перемещение частиц золота в горизонтальном направлении незначительное, за исключением места подачи воды.

В 2012 г. начаты промышленные испытания на экспериментальном полигоне, предоставленном артелью старателей “Рос-ДВ” (Хабаровский край). В средней части россыпи руч. Болотистый, отработанной в 2006–2007 гг., в непосредственной близости от илоотстойника, служащего источником технологической воды, подготовлен экспериментальный блок техногенных песков размером 8×15 м, мощностью до 1 м. Материалом служили эфельные хвосты отработки, на 99 % представленные породами кварцевой группы, содержащие мелкое и тонкое золото. На следующем этапе эксперимента (зимний период) блок промораживался, после оттаивания в нем формировался фильтрационный поток в течение всего промывочного сезона.

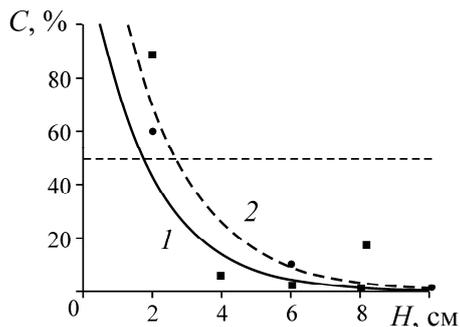


Рис. 3. Зависимость содержания золота в зонах концентрации по глубине горной массы: 1 — при воздействии безнапорного потока воды; 2 — при двух дополнительных циклах П–П

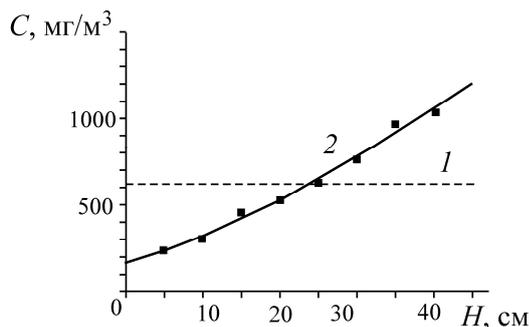


Рис. 4. Изменение содержания золота по глубине: 1 — исходное содержание золота в горной массе; 2 — содержание золота после эксперимента

Перед следующей проморожкой отобраны пробы, результат обогащения которых показан на рис. 5а. Среднее содержание золота в четырех верхних пробах снизилось относительно среднего в шурфе 1 на 21.6%, в шурфе 2 — на 22.9%, в шурфе 3 миграция менее заметна ввиду явно выраженной непроработанной зоны.

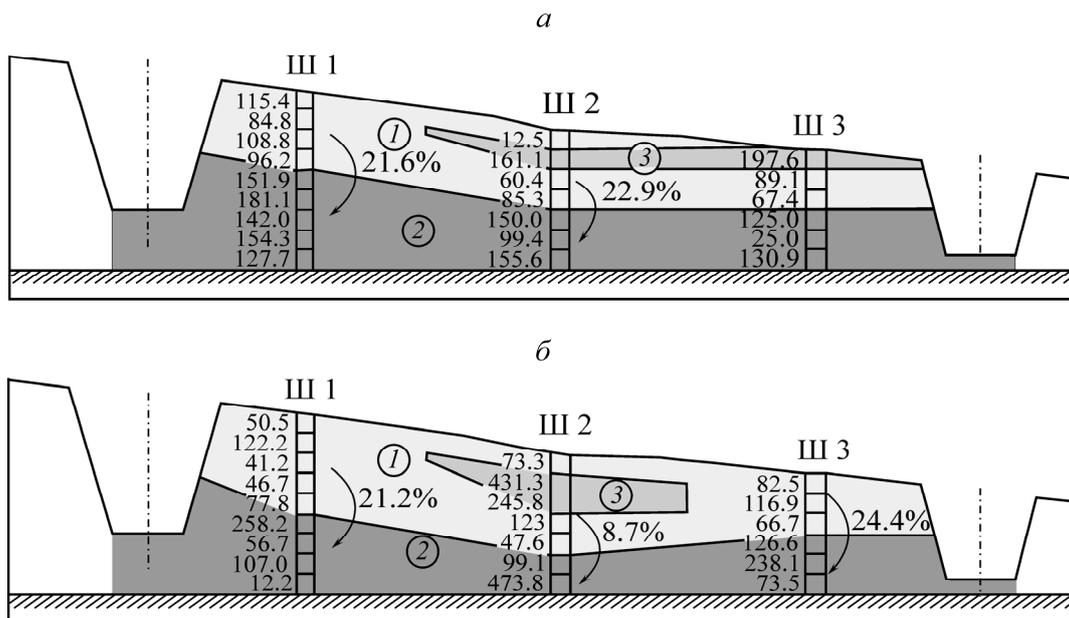


Рис. 5. Поперечный разрез блока песков в 2013 г. (а) и в 2014 г. (б): 1 — вскрыша; 2 — продуктивный пласт; 3 — непроработанная зона; Ш 1, Ш 2, Ш 3 — шурфы

Если условно принять границу содержания равной 125 мг/т, то получим разрез, на котором зона 1 — часть блока, в которой уменьшилось содержание золота (условно — вскрышные породы), зона 2 — продуктивный пласт, мощность которого равна половине мощности блока песков. Образование зоны 3, представляющей собой пласт песков с высоким (более 125 мг/т) содержанием золота, объясняется положением этой зоны выше кривой депрессии, вследствие чего данный участок не подвергается воздействию потока воды, а миграция проходит за счет фильтрации с поверхности атмосферных осадков и “промерзания – протаивания” горной массы.

В октябре 2014 г. (продолжительность эксперимента 2 года) с экспериментального участка отобраны пробы, результат их обогащения представлен на рис. 5б. Среднее содержание золота в пяти верхних пробах снизилось относительно среднего в шурфе 1 на 21.2%, в шурфе 2 — на 8.7, в шурфе 3 — на 24.4%. Таким образом, за два промывочных сезона удалось сформировать обогащенный пласт (с содержанием выше 125 мг/т), объем которого составляет 44% от общего объема песков в экспериментальном блоке.

Полученные данные позволяют значительно расширить теоретические знания о процессе миграции частиц золота, разработать методику расчета основных параметров технологии, которая в изменяющихся горно-геологических условиях способна оперативно управлять влияющими на миграцию золота факторами.

#### ВЫВОДЫ

Определено, что миграция частиц золота в техногенных песках происходит более интенсивно при увеличении количества циклов “промерзания – протаивания”. Криогенные процессы как самостоятельный фактор оказывают заметное воздействие на миграцию золота только мелких классов крупности ( $-0.25$  мм). Экспериментально доказано, что основным влияющим на перемещение частиц фактором является фильтрационный поток воды.

При комплексном воздействии на горную массу зона концентрации золота смещается вниз, увеличиваясь на 20–64% в сравнении с воздействием только энергии водного потока, а также происходит ее перемещение по длине отвала, причем преобладающее влияние оказывает энергия безнапорного потока воды.

На основе натуральных экспериментальных исследований установлено, что после воздействия на горную массу потока воды и ее промерзания в зимний период содержание золота в верхнем слое уменьшилось на 62% относительно исходного, в нижнем — увеличилось на 68.9%.

В результате промышленных испытаний на экспериментальном полигоне за два промывочных сезона удалось сформировать обогащенный пласт объемом 44% от общего объема песков в блоке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаверов Н. П., Трубецкой К. Н. Горные науки в системе наук о земле // Вестн. РАН. — 1996. — Т. 66. — № 5. — С. 411–418.
2. MacFarlane K. E., Nordling M. G. Yukon exploration and geology overview 2013, Whitehorse, Canada (Yukon Geological Survey), 2014. — 80 p.
3. Van Loon S. and Bond J. D. Yukon placer mining industry report 2010–2014, Whitehorse, Canada (Yukon Geological Survey), 2014. — 230 p.
4. Ван-Ван-Е А. П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. — М.: Горная книга, 2010. — 268 с.

5. **Рассказов И. Ю., Литвинцев В. С., Мамаев Ю. А.** Ресурсная база техногенных россыпных месторождений и основные направления их освоения // Золотодобывающая пром-сть. — 2011. — № 1. — С. 14–20.
6. **Литвинцев В. С.** О ресурсном потенциале техногенных золотороссыпных месторождений // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 118–126.
7. **Мирзеханов Г. С., Мирзеханова З. Г.** Ресурсный потенциал техногенных образований россыпных месторождений золота. — М.: Макс Пресс, 2013. — 288 с.
8. **Litvintsev V. S.** Basic directions of the strategy of mastering of anthropogenic ore and placer deposits of noble metals, Eurasian mining. — 2014. — № 1. — P. 7–11.
9. **Литвинцев В. С., Серый Р. С., Банщикова Т. С., Сас П. П.** Проблемы оценки и освоения техногенных образований золотосодержащих россыпей Приамурья // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 72–79.
10. **Копылов Р. Н.** Дифференциация золота в аллювиальных пластовых россыпях / отв. ред. Э. Д. Избеков. — Якутск: Сахаполиграфиздат, 2002. — 141 с.
11. **Пустовалов Л. В.** Петрография осадочных пород. — М.; Л.: Гостоптехиздат, 1940. — 476 с.
12. **Ферсман А. Е.** Геохимия: избр. труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — Т. 2. — С. 387–798.
13. **Полянин В. А.** Литологические исследования четвертичных отложений долин Волги и Камы на территории Татарии // Учен. зап. Казан. ун-та, 1957. — Т. 117. — Кн. 4. — 214 с.
14. **Лазаренко А. А.** Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны и Оки) // Труды Геол. ин-та, 1964. — Вып. 120. — 233 с.
15. **Лунев Б.С., Наумова О.Б.** Атлас геологии россыпей. Т. 1: Факторы россыпеобразования. — Пермь, 2005. — 344 с.
16. **Алексеев В. С.** Обоснование рациональной технологии формирования продуктивной зоны при открытой разработке техногенных россыпей Приамурья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Хабаровск, 2012. — 22 с.
17. **Мамаев Ю. А., Литвинцев В. С., Алексеев В. С.** Процессы формирования продуктивного пласта техногенных россыпей благородных металлов // Тихоокеан. геология. — 2012. — Т. 31. — № 4. — С. 106–112.

*Поступила в редакцию 27/IV 2017*