

УДК 622. 75/77

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫВКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ПЕСКОВ

Бурдин В.Н.\*, Бурдин Н.В.\*\*

*\*Красноярский государственный медицинский университет,  
Красноярск, Россия*

*\*\*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов  
СО РАН, Кызыл, Россия*

**В работе описаны закономерности стеснённого падения частиц в пульпе, приведены экспериментальные данные, устанавливающие прямую зависимость извлечения частиц золота от скорости осаждения их при стеснённом падении. Отмечена закономерность стеснённого падения частиц золота, связанная с извлечением и содержанием его в зависимости от угла наклона шлюза и от крупности ценного компонента. Показаны способ и устройство для доизвлечения мелких тяжелых минералов и металлов в процессе промывки и грохот-шлюз для его осуществления. Приведены результаты сезонной работы на участке ООО «Восток» по описанной технологии, которые убедительно показывают целесообразность применения этой технологии.**

**Ключевые слова:** технология, обогащение, осаждение, извлечение, минералы.

Гравитационные методы обогащения полезных ископаемых в жидкой среде основываются на процессах разделения твёрдых частиц по их удельному весу, форме, размерам под действием силы тяжести, архимедовой силы, силы сопротивления, силы трения, центробежных сил и т.д.

Скорость падения частиц относительно жидкости определяется соотношением следующих действующих на частицы сил: силы тяжести, подъёмной (архимедовой) силы, гидродинамического сопротивления жидкости и сил механического взаимодействия частиц при их соприкосновении. Сила тяжести  $P$  (вес), направленная вниз, определяется объёмом  $V$  и плотностью  $\rho_t$  частицы:  $P = V\rho_t g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения.

Подъёмная (архимедова) сила, направленная вверх, равна  $R = V\rho_{ж} g$ , где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости.

Гидравлическое сопротивление зависит от размеров и формы частиц, плотности и вязкости жидкости, скорости и ускорения частицы относительно жидкости, а в

условиях стеснённого падения — и от расстояния между частицами.

В обогатительных аппаратах стеснённое падение частиц происходит в потоке движущейся в определённом направлении жидкости, ограниченной стенками аппарата. Вследствие воздействия турбулентных вихрей, срывающихся со стенок, в аппарате происходит перемешивание частиц как в продольном, так и в поперечном направлениях, аналогичное диффузионному. Как показывают исследования, скорости стеснённого падения однородных частиц могут служить основой для расчёта скоростей падения этих частиц при наличии в пульпе различных по крупности и плотности частиц. Скорость стеснённого падения однородных частиц можно рассматривать как скорость их падения в неподвижной жидкости или как скорость движения жидкости, поддерживающей слой частиц, которые находятся относительно наблюдателя в неподвижном состоянии (взвешенный слой). Эксперименты показывают, что при одном и том же объёмном содержании частиц в сосуде, скорости стеснённого падения, определяе-

мые обоими методами, совпадают. В качестве характеристики взвешенного слоя обычно принимают коэффициент разрыхления (пористость) — объёмное содержание жидкой части в слое.

Закономерности равномерного падения изолированного твёрдого тела в неограниченной среде только частично освещают явления, наблюдаемые в процессах обогащения. При массовом движении частиц в обогатительных аппаратах возникают сложные гидродинамические условия движения жидкости. Вследствие наличия в аппаратах и машинах турбулентных режимов происходит перемешивание частиц в продольном и поперечном направлениях. При этом каждая частица испытывает влияние других частиц.

Ричардс, Финкей, Хирст, Ханкок, Загустин и др. (см. Справочник по обогащению углей, 1984) исследователи предложили различные эмпирические формулы для определения скорости стеснённого падения частиц. Однако скорости падения частиц, рассчитанные по этим формулам, значительно отличаются от экспериментальных, поэтому они не нашли практического применения.

Большие работы в этой области выполнены П.В. Лященко (см. Справочник по обогащению углей, 1984). Он считал, что стеснённое осаждение частиц сопровождается двумя видами сопротивления гидродинамическим или аэродинамическим, и механическим вследствие взаимного трения и ударов частиц. Стеснённое осаждение (по П.В. Лященко) характеризуется тем, что осаждение частиц происходит в узких каналах (промежутках), образующихся между отдельными частицами, движущимися совместно, и что всё это происходит в ограниченном стенками и дном пространстве.

Знание закономерностей стеснённого движения массы частиц в среде важно при решении многих практических задач в области гравитационного обогащения, гидротранспорта и процессов, протекающих в «кипящем» слое.

В практике обогащения различают стеснённое осаждение частиц в ограниченной среде и псевдоожижение слоя материала, когда при известной скорости восходящего потока слой материала переходит в текущее состояние, т.е. приобретает подвижность.

### **Коэффициент сопротивления зернистого слоя**

Исследованиями П.В. Лященко (см. Справочник по обогащению углей, 1984) установлено, что коэффициент сопротивления  $\psi_{cr}$  при стеснённом падении частицы уменьшается с увеличением степени разрыхления  $\theta$  взвешенной массы шаров. Им была предложена следующая формула:

$$\psi_{cr} = \frac{\psi}{\theta^n}$$
, где  $\psi$  — коэффициент сопротивления при свободном падении частицы,  $\theta$  — степень разрыхления слоя материала.

$$\theta = \sqrt[n]{\frac{v_{cr}^2}{v^2}},$$
 где  $n$  — показатель степени,

который зависит от размера, плотности, формы частиц и от соотношения их размеров.

При числах  $Re$  от 0,01 до 1000 показатель степени  $n$  изменяется соответственно от 7,6 до 3. Для расчётов он обычно принимается равным 6.

По исследованиям Минца (см. Справочник по обогащению углей, 1984), коэффициент сопротивления выражается формулой  $\psi_{cm} = \kappa^2 / (\theta^2 Re^2)$ , где  $\kappa$  — безраз-

мерный параметр, равный  $\sqrt{\frac{\rho_{ж} P}{\mu^2}}$ , где  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $P$  — сила сопротивления движению одной частицы ( $N$ ),  $\mu$  — вязкость жидкости ( $(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$ );  $\theta$  — параметр, учитывающий пористость слоя материала.

$$\theta = 6(1-m)\sqrt{\frac{\pi}{m^{1.5}}},$$
 где  $m$  — пористость слоя материала.

По Леви — коэффициент сопротивления для турбулентных режимов:

$$\psi_{cr} = \frac{\Delta p d \Phi^{3-n} g m^3 \rho_{ж}}{[2 L G^2 (1-m)^{3-n}]},$$

где  $\Delta p$  — перепад давления (Па);  $d$  — размер частиц (м);  $\Phi$  — фактор формы частиц;  $n$  — показатель режима движения;  $g$  — ускорение свободного падения ( $\text{м}/\text{с}^2$ );  $m$  — средняя пористость слоя;  $L$  — высота слоя (м);  $G$  — массовая (весовая) скорость ( $\text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ ).

Показатель режима движения  $n$  изменяется от 1 (для ламинарного потока) до 2 (для развитого турбулентного режима). В среднем для развитых турбулентных потоков  $n$  принимается равным 1,9.

Фоменко и Погарцевой экспериментально установлена зависимость коэффициента сопротивления  $\psi_{\text{ct}}$  для частиц неправильной формы от числа  $Ar$  и представлена кривой и формулой, в которой

$$\nu_{\text{ct}} = \frac{d^2(\rho_t - \rho_{\infty})g}{[18\mu(1+2,5C)]} = \frac{\nu_0}{(1-2,5C)},$$

где  $C$  — объёмное содержание твёрдого.

Рассмотренные формулы дают результаты, близкие к фактическим, для частиц следующих размеров: 0,1–1,25 мм (формула Ханкока); менее 0,2 мм (формула Лященко); более 1 мм (формула Стокса–Эйнштейна); 0,05–12,5 мм (формулы Фоменко и Погарцевой).

Коэффициент равнопадаемости частиц в условиях стеснённого падения определяется с учётом дополнительных сопротивлений падающему телу, создаваемых стеснёнными условиями.

Значение фиктивной плотности среды для породы равно  $1470 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Коэффициент равнопадаемости частиц в стеснённых условиях значительно больше, чем в свободных условиях. Для породы в свободных условиях он равен 3 или близок к этому значению, а в стеснённых условиях равен 12,2, что вполне соответствует шкале классификации, принятой в практике обогащения [1,2]. Известно, что твёрдое тело можно рассматривать как часть жидкости с большей или меньшей вязкостью [3] (Старовойтов, 1999). Известно также, что прилагаемое ускорение как бы «укрупняет» зёरна минералов, причём чем они тоньше, тем этот эффект выше [4] (Богданович, 1997). Известно уравнение об-

место  $v$  подставлена скорость  $v_{\text{ct}}$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) падения в стеснённых условиях (Справочник по обогащению углей, 1984).

#### Скорость стеснённого осаждения

Ханкок на основании исследований Хирста предложил следующее выражение скорости ( $\text{м}/\text{с}$ ) стеснённого осаждения в зависимости от степени разрыхления слоя материала:  $v_{\text{ct}} = v_0\theta^2$ , где  $v_0$  — конечная скорость свободного падения ( $\text{м}/\text{с}$ );  $\theta$  — степень разрыхления слоя материала.

По формуле Лященко скорость ( $\text{м}/\text{с}$ ) стеснённого падения:  $v_{\text{ct}} = v_0\sqrt{\theta^6} = v_0\theta^3$ ; по формуле Стокса–Эйнштейна:

щего случая для сплошных сред. Это уравнение в любом случае имеет тот же физический смысл: сохранение момента импульса для реальной жидкой среды [4] (Фейнман и др., 1977).

Понятие «частица является частью ветви потока сплошной среды» означает для конкретной частицы то, что чем больше у неё момент импульса и чем она тяжелее, тем она меньше в потоке сплошной среды, и, чем меньше момент импульса и чем она легче, тем она большей крупности. Непроницаемая для менее тяжёлых частиц оболочка в виде постели из достаточно тяжёлых частиц возникает из-за того, что достаточная крупность менее тяжёлых частиц в толще ветви потока сплошной среды не позволяет проникнуть через постель из достаточно мелких и достаточно тяжёлых частиц. Предполагается, что при любом повороте оси вращения ветви потока сплошной среды, по закону сохранения момента импульса, частица начинает вращаться то вокруг одной оси, то вокруг другой и, плюс, вокруг собственной оси и имеет в таком независимом закрученном потоке реальной жидкой среды траекторию в виде растянутой пружины. При этом более тяжёлые частицы образуют внешний слой ветви потока сплошной среды в виде

«вращающегося резинового шланга». А недостаточно тяжёлые частицы находятся в толще такой ветви потока сплошной среды по причине разной вязкости оболочек из воды у лёгких и тяжёлых частиц, имеют такую же траекторию движения и выносятся в процессе обогащения на слив по пути наименьшего сопротивления.

Применение способа доизвлечения мелких тяжёлых минералов и металлов в процессе промывки и грохот-шлюз для его осуществления имеют следующие преимущества: повышение эффективности извлечения мелких частиц ценного компонента при высокой производительности процесса промывки с получением концентрата в виде чёрного и серого шлиха. Способ обогащения включает улавливание тяжёлой фракции в отверстия грохота для дальнейшей промывки в одинаковых составных улавливающих частях шлюза; разгон потока пульпы на шлюзе при снижении общей скорости потока при прохождении составных улавливающих частей шлюза; воздействие на разделяемый материал в каждой составной улавливающей части шлюза потоком пульпы с получением взвешенной тяжёлой фракции с равномерно распределённой жидкой и твёрдой фазой по всей улавливающей части шлюза,

в каждой составной улавливающей части шлюза, выделение более тяжёлой фракции.

Потери золота на шлюзах, пропорциональны квадрату скорости потока на них, а нижний предел скорости определяется крупностью обогащаемых песков. Поэтому, снижая максимальную крупность обогащаемых песков и снижая тем самым скорость потока на шлюзах, можно повысить извлечение мелкого золота. Этот способ повышения извлечения мелкого золота на шлюзах, в сочетании с изменением конструкции самих шлюзов успешно испытан в промышленных условиях и его следует широко внедрять.

Для реализации принципа ограничения максимальной крупности обогащаемых песков использовалась конструкция плоского специального грохота, обеспечивающего грохочение материала в водном потоке 6–8 мм и регулируемый вывод подрешётной фракции на обогащение (рис. 1). Верхнее расположение рифлей под листом грохота в каждой составной части трафарета улучшает промывистость тяжёлой фракции и поддержание её во взвешенном состоянии за счёт обратного отвода частичек с водой через отверстия наверх грохота на последней по длине части каждой составной части трафарета за счёт перепада скоростей потока [6-9].

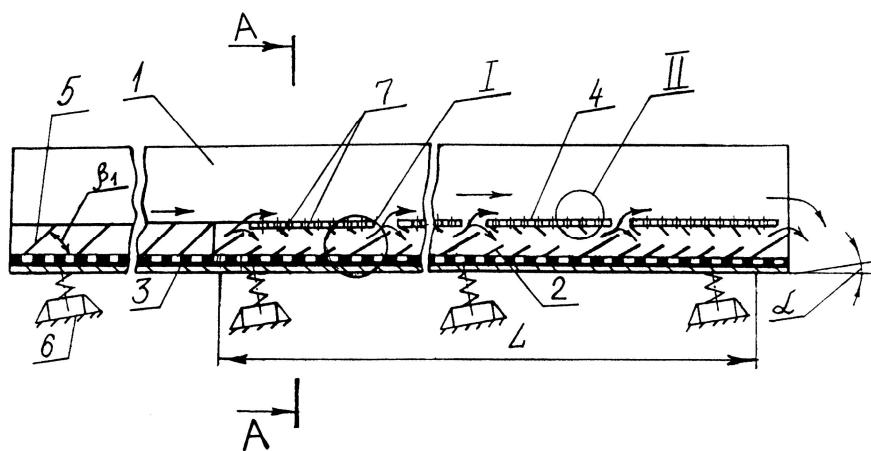


Рис. 1.

Отверстия листа грохота служат для лучшего расслоения как подрешётного, так и надрешётного потоков пульпы на лёгкую и тяжёлую фракции. Частицы ценного тя-

жёлого компонента улавливаются в ячейках резиновых ковриков, расположенных под каждой составной частью трафарета (рис. 2, 3 (1)).

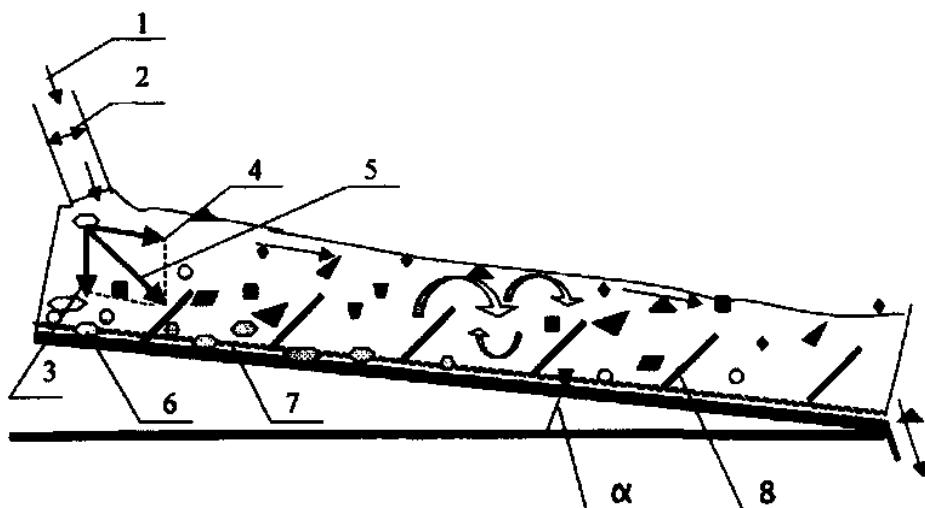


Рис. 2.

1- скорость потока пульпы в пульпопроводе  $V_{\text{нач}}$  м/сек., 2 – диаметр пульпопровода –  $D$  мм. 3 – вектор скорости стесненного падения частички золота  $V_{\text{сп.}}$ , 4 – вектор скорости потока пульпы., 5 – вектор средней скорости падения частички золота  $V_{\text{ср.}}$ , 6 - частички золота, 7 – резиновый коврик, 8 – трафареты,  $\alpha$  – угол наклона шлюза.

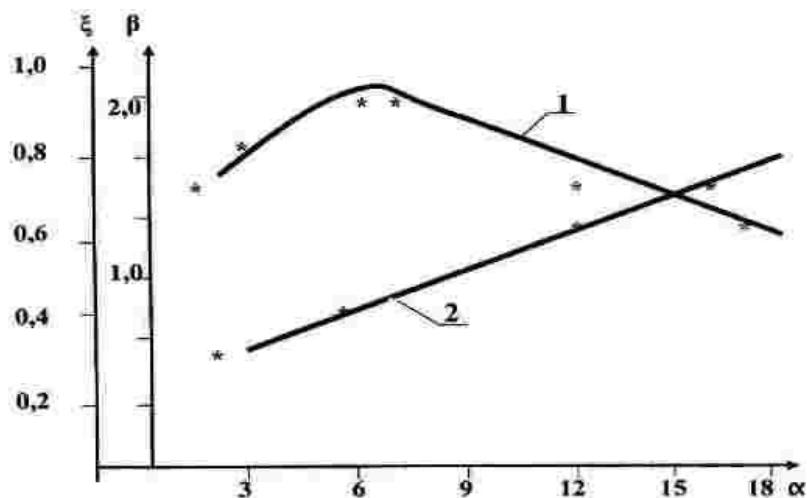


Рис. 3.

$\xi$  – коэффициент извлечения золота в концентрат,  $\beta$  – содержание золота в концентрате  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\alpha$  – угол наклона шлюза. 1 – кривая извлечения, 2 – кривая содержания.

При проведении промышленных сезонных испытаний на полигоне ежесменно фиксировались: извлечение, выход, количество золота. Проводился контроль потока пульпы по скорости, производительности и разжиженности. Полученные экспериментальные данные наглядно показали прямую зависимость извлечения золота от скорости осаждения при стеснённом падении частиц выраженной формулами:

$$\xi = \frac{P_{\text{кон}}}{P_{\text{исх}}} , \quad V_{\text{кон}} = k \cdot \xi \cdot V_{\text{нач}},$$

где  $V_{\text{кон}}$  — конечная скорость стеснённого падения частиц золота,  $V_{\text{нач}}$  — начальная скорость частиц золота в потоке пульпы подаваемой на шлюз,  $k$  — поправочный коэффициент,  $P_{\text{кон}}$  — количество извлеченного золота,  $P_{\text{исх}}$  — количество золота в исходной пульпе (рис. 4 (2))

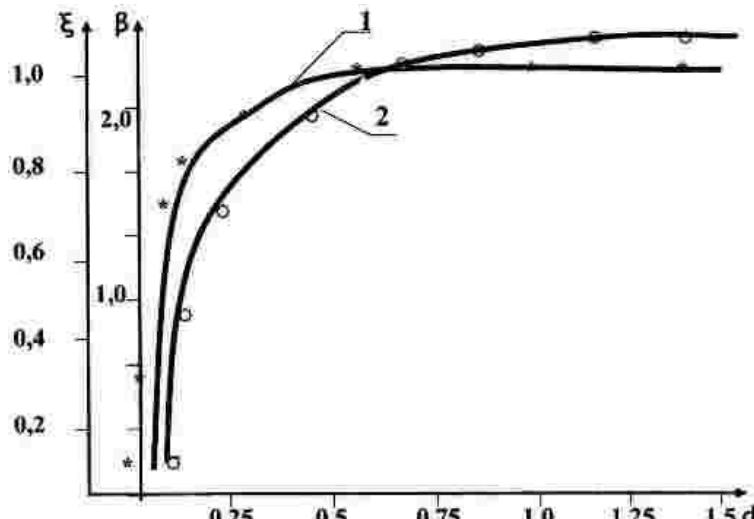


Рис. 4.

$\xi$  – коэффициент извлечения золота в концентрат,  $\beta$  – содержание золота в концентрате кг/м<sup>3</sup>,  $d$  – крупность золота в мм., 1 – кривая извлечения, 2 – кривая содержания

Закономерность стеснённого падения частиц золота, связанная с извлечением и содержанием его в зависимости от угла наклона шлюза и от крупности центрального компонента, представлена графически на рисунках 3, 4.

Полномасштабное сезонное применение вышеописанной технологии доизвлечения мелкого золота проводилось на месторождении россыпного золота р. Ургайлыг, в котором мелкая фракция золота составляла 81 %. Доизвлечено порядка 8 кг золота. Конечным продуктом являются богатые гравитационные концентраты шлюза мелкого наполнения и сокращённый концентрат шлюза глубокого наполнения.

Съём и доводка концентратов шлюзов глубокого и мелкого наполнения осуществлялась два раза в сутки с кратковременной остановкой работы промприбора путём сокращения концентратов пробутовой с последующей загрузкой в специальные контейнеры и обработкой на ШОУ.

В заключении следует отметить, что разработанные способ, устройство и технология дают возможность извлекать мелкое и тонкое золото при переработке россыпных и техногенных месторождений золотосодержащего минерального сырья. Полученные экспериментальные данные наглядно показали прямую зависимость извлечения золота от скорости осаждения

при стеснённом падении частиц. Возможность доизвлечения ценных тяжёлых компонентов и улучшение технологических параметров на действующих горнообогатительных комбинатах (ГОК) с включением в их схемы компоновки оборудования, реализующего вышеописанные изобретения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Справочник по обогащению руд / Недра - 1972г., том -1, с. 220.
2. Справочник по обогащению углей /Москва, Недра – 1984г., 174 - 176 с.
3. В.Старовойтов «В зеркале цифр и уравнений». / Газета “Наука в Сибири”, N 34, 1999.
4. А.В.Богданович «Разделение минеральных частиц в центробежных полях». «Горный журнал», N 4, 1997,
5. Р.Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэнде «Фейнмановские лекции по физике», т.7 /Физика сплошных сред/, М: 1977., стр. 259.
6. Бурдин Н.В., Лебедев В.И., Чадамба П.В., Шадрин В.А. Способ доизвлечения мелких тяжелых минералов и металлов в процессе промывки и грохот-шлюз для его осуществления. /Гравитационные методы обогащения, современное обогатительное оборудование и новые технологии для переработки минерального сырья/.-Тез. докл. н.-т. сем..- ОАО Завод «Труд».-г. Новосибирск.- 2001.- с.55 –57.
7. Бурдин Н.В., Лебедев В.И., Чадамба П.В. Геотехнологии гравитационного извлечения мелкого и дисперсного золота. / Состояние и ос-

воение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества/. (научные труды ТувИКОГР СО РАН). - Кызыл.-2002.-87-99с.

8. Бурдин Н.В., Лебедев В.И. Чадамба П.В. Новая технология переработки золотосодержащего сырья / Горный журнал, № 11-12, 2000. – С. 70-71.

9. Бурдин Н.В., Чадамба П.В. Способ доизвлечения мелких тяжелых минералов и металлов в процессе промывки и грохот-шлюз для его осуществления. /Патент РФ № 2204439. М.: Росагенство по патентам и товарным знакам. - Бюл. № 14, 2003. - 9 с.

## PHYSICAL BASICS OF TECHNOLOGY OF WASHING OF GOLD-CONTAINING SANDS

Burdin V.N.\*, Burdin N.V.\*\*

*\*Krasnoyarsk State Medical University, Krasnoyarsk, Russia*

*\*\*Tuvanian Institute for Exploration of Natural Resources, SB of the RAS, Tuva, Russia*

In the work regularities of hindered falling of particles in a pulp were described and experimental data showing a direct relationship between gold particle recovery and a rate of particle deposition at hindered falling have been presented. Regularity in hindered falling of gold particles associated with gold recovery and its content depending on an sluice slope angle and size of valuable component has been revealed. A way and arrangement for complete extraction of small heavy minerals and metals in the process of panning and screening sluice have been shown. Results of seasonal works the described technology demonstrate that this technology would be appropriate for use.

Keywords: technology, enrichment, sedimentation, extraction, minerals.