УДК 622.271.1:236.73

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЗИНТЕГРИРУЕМОСТИ ВЫСОКОГЛИНИСТЫХ ПЕСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Н.П.ХРУНИНА**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, npetx@mail.ru*
**А.Ю.ЧЕБАН**, *канд. техн. наук, доцент, chebanay@mail.ru*
*Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия*

Рассмотрены результаты исследования высокоглинистых песков золотоносного россыпного месторождения руч. Бешеный Приморского края. Установлено, что пески исследуемой золотоносной россыпи являются достаточно сложными для дезинтеграции и последующего обогащения из-за высокого содержания дисперсной фракции, оксидов железа, глинистого минерала монтмориллонита и обладают низкой динамикой снижения упругих характеристик при водонасыщении. Для решения проблемы дезинтеграции высокоглинистых песков с низкой динамикой изменения деформационных свойств при водонасыщении обоснована необходимость расширения исследований процессов, основанных на преобразовании кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний с последовательным совмещением дополнительных гидродинамических эффектов, включая струйное разделение.

***Ключевые слова***: дисперсность, водонасыщение, дезинтеграция, скорость ультразвука.

**Введение.** Согласно данным геологических исследований, золотоносные россыпи Дальнего Востока России имеют в некоторых случаях содержание глин более 80 %. Ввод в эксплуатацию таких месторождений сдерживается из-за плохой изученности и отсутствия совершенных способов и систем разработки нового уровня, основанных на эффективных методах воздействия, исключающих дополнительную нагрузку на окружающую среду [1, 6, 8]. Широко применяемые технологии добычи и переработки песков приемлемы для песков с низким (до 25 %) содержанием глинистой составляющей. При этом потери мелких частиц золота, по имеющимся оценкам, составляют более 58 % [11]. По классу крупности –0,5+0,2 мм и по классу –0,2 мм нормативные коэффициенты извлечения соответственно равны: на вашгердно-шлюзовых приборах (ГВ, ПВШ) – 0,68 и 0,32, на гидромеханических грохотах (ГГМ) – 0,78 и 0,40, на скрубберных приборах (ПКС, ПКБШ) – 0,85 и 0,60 [5]. Потери фракций золота размером менее 0,125 мм на шлюзах глубокого наполнения составляют от 99 до 100 %, на шлюзах мелкого наполнения – от 80 до 96 %, на отсадочных машинах – от 37 до 50 % [2, 3]. Кроме того, попадая в процессы промывки и обогащения, высокоглинистые пески дезинтегрируются в среднем на 5-8 % при дражном способе разработки и на 20-25 % при использовании промывочных установок типа ПКС в комплексе с гидровашгердом [4, 9].

Для эффективного извлечения мелких и тонких частиц золота и других ценных компонентов из высокоглинистых песков необходимо создание новых способов и средств дезинтеграции, способных разрушить структурные связи между глинистыми частицами. Применение новых подходов к оценке влияния водонасыщения на процессы дезинтеграции высокоглинистых песков и само расширение объектов исследования, при более детальном изучении влияния водонасыщения на упругие характеристики глинистых песков россыпей, дополнит общие сведения, позволит оценить исследуемые объекты с достаточной степенью достоверности и создаст предпосылки для выработки новых идей по созданию эффективных средств и способов дезинтеграции и обогащения песков.

**Экспериментальная часть и расчеты.** Цель настоящей работы состояла в экспериментальном изучении ряда физико-механических, в том числе прочностных, структурно-механических свойств, элементного состава, фазового анализа и влияния степени водонасыщения на упругие свойства глинистых золотосодержащих песков исследуемого месторождения. Определялась гранулометрия песков, а также дисперсность, плотность, влажность, скорость ультразвука, волновое сопротивление, модуль сдвига, модуль Юнга в исходном состоянии и при водонасыщении до 30 %. Измерения проводились на приборах и оборудовании Центра коллективного пользования ИГД ДВО РАН, Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН и Испытательного центра ДВГУПС. Дисперсность песковой фракции с размером частиц менее 0,5 мм исследовалась на лазерном дифракционном микроанализаторе размеров частиц ANALYSETTE 22. Спектрометрический анализ выполнен на рентгенофлюоресцентном спектрометре «Mobilab X-50». Фазовый анализ проб изучался с помощью дифрактометра ДРОН-7. Напряжение трубки – 40 кВ, ток накала – 20 мкА. Шаг сканирования по углу 2Theta – 0,05 град. Для идентификации линий рентгеновских спектров использовался программный пакет PDWin (НПП «Буревестник»). Для определения прочностных свойств песков с помощью прибора «Пульсар – 1.1» измерялась скорость продольных волн в образцах с естественной влажностью. Рабочая частота составляла 60 кГц. Эксперимент проводился при температуре воздуха 23,5 °С и относительной влажности 70 %.

По данным исследований песков месторождения руч. Бешеный установлено, что частицы размером менее 0,5 мм составляют большую часть навески (от 57 до 75 %). Доля материала с содержанием частиц размером менее 0,005 мм в песковой фракции большинства исследованных образцов колеблется от 88 до 99,9 %, а в отдельных случаях – от 44 до 63 %. В пробах выявлены соединения: железа – от 43,7 до 72,3 кг/т; титана – от 7,3 до 14,4 кг/т, а также – соединения Ni, W, Rb, Sr, Zr, Mn, Co, Cr и др. С помощью фазового анализа и идентификации линий рентгеновских спектров в пробах установлены минералы: монтмориллонит, содержащий алюминий; стилбит, сепиолит $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$, палыгорскит $O_2H_4 \cdot (OH)_{10}O_4MgAlSi$, ферроактинолит $Ca_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$ и коренсит. На рис.1 зафиксированы максимумы интенсивности от систем различных кристаллографических плоскостей образца исследуемого месторождения.

Определения модулей упругости и их зависимостей от волнового сопротивления крайне важны для понимания особенностей процесса дезинтеграции глинистой составляющей песков на стадии предварительной оценки. Скорость ультразвука в продольном направлении в образцах размером 0,25 × 0,20 × 0,15 м при начальной влажности от 12,7 до 20 % изменялась от $1{,}61 \cdot 10^3$ до $1{,}74 \cdot 10^3$ м/с. Экспериментальным и аналитическим путем определены: параметры изменения эффективной сжимаемости; скорости продольной ультразвуковой волны $V$ при равновесной эквивалентной плотности; модуль сдвига μ (вторая компонента Ламе); модуль продольного растяжения $E$ (модуль Юнга) и коэффициент поперечного сжатия $\nu$ (коэффициент Пуассона) при изменении водонасыщения до 30 %.

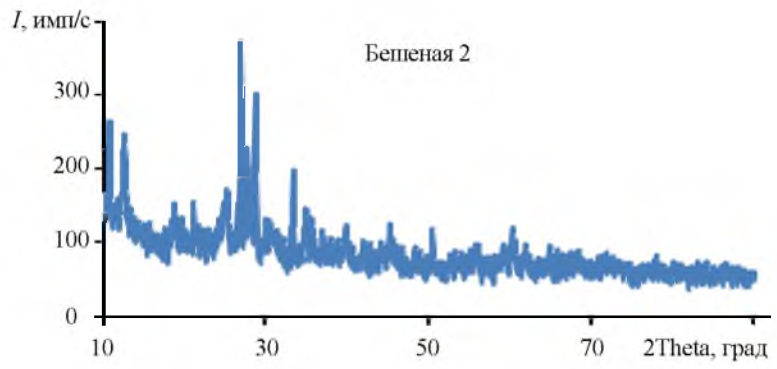



Рис.1. Дифрактограмма пробы второго участка месторождения руч. Бешеный

Модули сдвига μ исследуемых песков в состоянии естественного водонасыщения

и водонасыщенных до 30 %, а также первые компоненты Ламе λ для песков в тех же состояниях определяли по формулам [6, 10]:

$$\mu = \rho V_S^2,\ \lambda = \rho(V^2 - 2V_S^2),$$

где ρ – плотность песков в состоянии естественного водонасыщения, определенная экспериментальным путем, или равновесная плотность водонасыщенных до 30 % песков, определенная расчетным путем; $V_S$ – расчетные скорости поперечных волн в песках в состоянии естественного водонасыщения или водонасыщенных до 30 %, определяемые по формуле $V_S = V/\sqrt{3}$; $V$ – скорость продольных волн в состоянии естественного водонасыщения, определенная экспериментальным путем.

Модули продольного растяжения $E$ для песков в естественном состоянии и водонасыщенных определяли по формуле [6, 10]

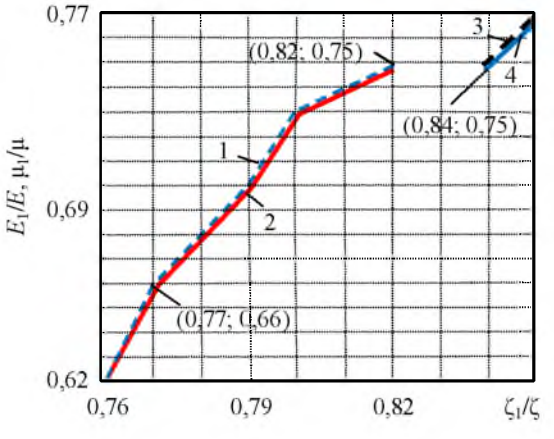



Рис.2. Зависимости относительных значений модуля продольного растяжения $E_1/E$ (кривые 1, 3) и сдвига $\mu_1/\mu$ (кривые 2, 4) от относительного равновесного волнового сопротивления $\zeta_1/\zeta$ высокоглинистых золотоносных песков месторождения руч. Бешеный при изменении их водонасыщения от 12,7 до 30 % на первом участке (кривые 1, 2) и от 20 до 30 % на втором участке (кривые 3, 4)

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}.$$

При исследовании проб с двух участков месторождения руч. Бешеный от относительного равновесного волнового сопротивления $\zeta_1/\zeta$ водонасыщенных песков $\zeta_1$ (с содержанием воды до 30 %) по отношению к пескам с естественной влажностью ζ получены зависимости $E_1/E$ и $\mu_1/\mu$ (рис.2).

Волновое сопротивление ζ высокоглинистых золотосодержащих песков определялось по формуле $\zeta = \rho V$. Скорость $V_1$ продольных ультразвуковых волн при равновесном эффективном значении плотности $\rho_1$ при водонасыщении до 30 % рассчитывалась с учетом объемного содержания в водонасыщенных песках воды и эффективной сжимаемости водонасыщенных песков $\beta_1$ [6, 10]:

$$V_1 = \sqrt{1/\rho_1\beta_1}.$$

Полученные зависимости (рис.2) показывают характер изменения относительных модулей упругости $\mu_1/\mu$ и $E_1/E$ при увеличении водонасыщения высокоглинистых песков до 30 %.

Углы наклона кривых $(\mu_1/\mu)(\zeta_1/\zeta)$ и $(E_1/E)(\zeta_1/\zeta)$ на каждом участке совпадают между собой, следовательно, в процессе водонасыщения изменение упругих характеристик сдвига и растяжения подчиняется одному закону. Полученные расчетные значения динамики происходящих изменений деформационных свойств исследуемых песков на первом участке различаются значительно и в некоторых случаях достаточно низкие. Изменение динамики деформационных свойств исследуемых песков на первом участке составляет от 1,4 до 2,2, а на втором участке – от 2,3 до 2,5.

Коэффициент Пуассона ν для песков в естественном состоянии водосодержания и водонасыщении до 30 % определялся по формуле [6, 10]

$$\nu = \lambda / 2(\lambda + \mu).$$

Коэффициент поперечного сжатия ν при изменении водонасыщения остается практически постоянным и равным 0,25 (в одном только случае – 0,27).

Проблема дезинтеграции высокоглинистых песков россыпей с преимущественно мелким золотом в настоящее время приобретает все большую актуальность. Получают развитие резонансные, электротермические, акустические, теплофизические, оптические, гидродинамические эффекты разрушения минеральной составляющей, моделируемые с помощью взрывной автоэмиссии с катода в сильных электрических полях мощных ускорителей, ультразвуковых, электроразрядных [14, 15], электромагнитных (СВЧ), лазерных [16], вибрационных, гидродинамических воздействий. Однако достаточно развитая экспериментальная и теоретическая база для практической реализации процессов дезинтеграции минеральных гидросмесей отсутствует. Немногие теоретические выводы, полученные до сих пор, дают только приблизительные представления о возникающих процессах кавитации, струйных и вихревых течениях в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния. Развитие исследований гидродинамического воздействия на многокомпонентные среды гидросмесей позволит получить сведения, которые обеспечат реализацию технологии с рядом существенных преимуществ, в том числе с обеспечением низких энергозатрат.

Для решения проблемы дезинтеграции высокоглинистых песков, подобных исследуемому месторождению, в ИГД ДВО РАН создана принципиальная схема струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в гидропотоке [7, 12, 13], которая включает скоростную подачу струи в гидродинамический генератор, обработку материала в условиях активных гидродинамических воздействий посредством влияния размещенных внутри корпуса соосно и последовательно соединенных стационарных кавитационных элементов. С помощью дополнительно установленных пакетов подвижных упругих пластинчатых элементов осуществляют дополнительное струйное разделение с усилением кавитационно-акустического воздействия на минеральную составляющую гидросмеси и получением заданного среднего значения объемной плотности мощности гидродинамического возмущения для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц.

Идея преобразования кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний в гидродинамическом генераторе, а также ряд дополнительных гидродинамических эффектов, в том числе струйное разделение, позволит после достаточного теоретического и экспериментального обоснования приблизить практическую реализацию подобных систем.

## Выводы

1. Наличие глинистого минерала монтмориллонита в исследуемых образцах песков, выявленное преобладание в пробах соединений железа, которое может свидетельствовать о прочных водостойких связях, а также установленное гранулометрическим анализом содержание частиц размером менее 0,005 мм в песковой фракции исследованных образцов от 88 до 99 % позволяет отнести пески к трудноразрушаемым и сложным для последующего обогащения.

2. Поскольку процесс дезинтеграции высокоглинистых песков предполагается инициировать посредством импульсного воздействия на многокомпонентные среды гидросмесей, исследованы изменения зависимостей относительных упругих характеристик растяжения $(E_1/E)(\zeta_1/\zeta)$ и сдвига $(\mu_1/\mu)(\zeta_1/\zeta)$ от волнового сопротивления песков при водонасыщении. Установлено, что при водонасыщении динамика изменения деформационных свойств исследуемых песков на первом участке различается значительно и в некоторых случаях достаточно низкая.

3. Полученные результаты позволили для дезинтеграции высокоглинистых песков с низкой динамикой изменения деформационных свойств при водонасыщении обосновать необходимость расширения исследований процессов, основанных на преобразовании кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний с последовательным совмещением дополнительных гидродинамических эффектов, включая струйное разделение.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Атлас основных золотороссыпных месторождений юга Дальнего Востока и их горно-геологические модели / А.П.Сорокин, А.П.Ван-Ван-Е, В.Д.Глотов и др. Владивосток, Благовещенск, Хабаровск: ДВО РАН, 2000. 334 с.

2. *Замятин О.В.* Расчет потерь золота с эфелями промывочных приборов по данным ситовых анализов / О.В.Замятин, Б.К.Кавчик // Золотодобыча. 2008. № 111. С.9-16.

3. *Кавчик Б.К.* Компьютерная программа расчета нормативных потерь золота с эфелями промывочных приборов // Золотодобыча. 2009. № 132. С.15-17.

4. *Карепанов А.В.* Технико-экономическая оценка применения новой технологии при разработке высокоглинистых песков золота и платины / А.В.Карепанов, В.Е.Кисляков // Фундаментальные исследования. 2005. № 1. С.51-52.

5. *Куторгин В.И.* Оценка полноты использования запасов при отработке россыпных месторождений благородных металлов // Руды и металлы. 2004. № 1. С.43-50.

6. Новые аспекты научных основ ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков россыпей Приамурья / Н.П.Хрунина, Ю.А.Мамаев, А.М.Пуляевский, О.В.Стратечук. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. 167 с.

7. Пат. 2506127 РФ, МПК B03B5/00. Способ струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси и гидродинамический генератор акустических колебаний / Н.П Хрунина. // Опубл. в БИ. 2014. № 4.

8. Проблемы рационального освоения золотороссыпных месторождений Дальнего Востока (геология, добыча, переработка) / Ю.А.Мамаев, А.П.Ван-Ван-Е, А.П.Сорокин, В.С.Литвинцев, А.М.Пуляевский. Владивосток: Дальнаука, 2002. 200 с.

9. *Рассказов И.Ю.* Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области / И.Ю.Рассказов, А.Ю.Чебан, В.С.Литвинцев // Горный журнал. 2013. № 2. С.30-34.

10. Ультразвуковая технология / Б.А.Агранат, В.И.Башкиров, Ю.И.Китайгородский, Н.Н.Хавский. М.: Металлургия, 1974. 503 с.

11. *Хрунина Н.П.* Обоснование параметров ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков россыпей Приамурья: Автореф. дис. … канд. техн. наук / Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук. Хабаровск, 2011. 22 с.

12. *Хрунина Н.П.* О результатах исследований песков месторождения благородных металлов / Н.П.Хрунина, А.Ю.Чебан // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014: Сб. науч. тр. международ. конф. Днепропетровск: НГУ, 2014. С.121-127.

13. *Хрунина Н.П.* Совершенствование процессов разработки высокоглинистых золотоносных россыпей Приамурья / Н.П.Хрунина, А.Ю.Чебан // Vědecký průmysl evropského kontinentu-2013: materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference (Praha, 27 listopadu – 05 prosinců 2013 roku). Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. Dil 34: Technické vědy. S.37-40.

14. *Achenbach J.D.* Separation at the interface of a circular inclusion and the surrounding medium under an incident compressive wave / J.D.Achenbach, J.H.Hemman, F.Ziegler // J. Appl. Mech., ASME, E. 1970. N 2. P.46-53.

15. *Andres U.* Electrical disintegration of rock Mineral proc. // Extractive Metallurgy Rev., 1995. N 14. P.87-110.

16. *Sigimoto D.* et al. Performance of high power lasers for rock excavations // Proc. SPIE 388. 2000. P.49-59.


## REFERENCES


1. *Sorokin A.P., Van-Van-E A.P., Glotov V.D.* et al. Atlas osnovnyh zolotorossypnyh mestorozhdenij juga Dal'nego Vostoka i ih gorno-geologicheskie modeli (*Atlas of basic gold placer deposits of the southern Far East and their mining-and-geological models*). Vladivostok, Blagoveshchensk, Habarovsk: DVO RAN, 2000, p.334.

2. *Zamjatin O.V., Kavchik B.K.* Raschet poter' zolota s jefeljami promyvochnyh priborov po dannym sitovyh analizov (*Calculation of the losses of gold with sluice box dredge tailings based on screen assays*). Zolotodobycha. 2008. N 111, p.9-16.

3. *Kavchik B.K.* Komp'juternaja programma rascheta normativnyh poter' zolota s jefeljami promyvochnyh priborov (*A computer program for a calculation of normative losses of gold with sluice box dredge tailings*). Zolotodobycha. 2009. N 132, p.15-17.

4. *Karepanov A.V., Kisljakov V.E.* Tehniko-jekonomicheskaja ocenka primenenija novoj tehnologii pri razrabotke vysokoglinistyh peskov zolota i platiny (*Technical and economic evaluation of applying new technology when exploiting very clayey sands of gold and platinum*). Fundamental'nye issledovanija. 2005. N 1, p.51-52.

5. *Kutorgin V.I.* Ocenka polnoty ispol'zovanija zapasov pri otrabotke rossypnyh mestorozhdenij blagorodnyh metallov (*Assessment of draining reserves when exploiting placer deposits of precious metals*). Rudy i metally. 2004. N 1, p.43-50.

6. *Khrunina N.P., Mamaev Ju.A., Puljaevskij A.M., Stratechuk O.V.* Novye aspekty nauchnyh osnov ul'trazvukovoj dezintegracii vysokoglinistyh zolotosoderzhashhih peskov rossypej Priamur'ja (*New aspects of the scientific basis of very clayey gold-bearing sand ultrasonic disintegration in Amur region alluvial deposits*). Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2011, p.167.

7. *Khrunina N.P.* Sposob strujno-akusticheskoj dezintegracii mineral'noj sostavljajushhej gidrosmesi i gidrodinamicheskij generator akusticheskih kolebanij (*Method of jet-acoustic disintegration of hydraulic fluid mineral components and hydrodynamic acoustic waves generator*). Pat. 2506127 RF, MPK V03V5/00. Opubl. v BI. 2014. N 4.

8. *Mamaev Ju.A., Van-Van-E A.P., Sorokin A.P., Litvincev V.S., Puljaevskij A.M.* Problemy racional'nogo osvoenija zolotorossypnyh mestorozhdenij Dal'nego Vostoka (geologija, dobycha, pererabotka) (*Problems of the sustainable development of gold placer deposits in the Far East (geology, mining, processing)*). Vladivostok: Dal'nauka, 2002, p.200.

9. *Rasskazov I.Ju., Cheban A.Ju., Litvincev V.S.* Analiz tehnicheskoj osnashhennosti gornodobyvajushhih predprijatij Habarovskogo kraja i Evrejskoj avtonomnoj oblasti (*Analysis of equipment in mining enterprises of the Khabarovsk Krai and the Jewish autonomous oblast*). Gornyj zhurnal. 2013. N 2, p.30-34.

10. *Agranat B.A., Bashkirov V.I., Kitajgorodskij Ju.I., Havskij N.N.* Ul'trazvukovaja tehnologija (*Ultrasonic technology*). Moscow: Metallurgija, 1974, p.503.

11. *Khrunina N.P.* Obosnovanie parametrov ul'trazvukovoj dezintegracii vysokoglinistyh zolotosoderzhashhih peskov rossypej Priamur'ja: Avtoref. dis. … kand. tehn. nauk (*Justification of parameters for ultrasonic disintegration of very clayey sands in Amur region gold placers: The autor ... PhD in Engineering Sciences*). Institut gornogo dela Dal'nevostochnogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk. Habarovsk, 2011, p.22.

12. *Khrunina N.P., Cheban A.Ju.* O rezul'tatah issledovanij peskov mestorozhdenija blagorodnyh metallov (*Findings of the research on sand deposits of precious metals*). Sovremennye innovacionnye tehnologii podgotovki inzhenernyh kadrov dlja gornoj promyshlennosti i transporta 2014: sb. nauch. tr. mezhdunarod. konf. Dnepropetrovsk: NGU, 2014, p.121-127.

13. *Khrunina N.P., Cheban A.Ju.* Sovershenstvovanie processov razrabotki vysokoglinistyh zolotonosnyh rossypej Priamur'ja (*Improvement of the process of very clayey sands exploitation in Amur region gold placers*). Vědecký průmysl evropského kontinentu-2013: materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference (Praha, 27 listopadu – 05 prosinců 2013 roku). Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. Dil 34: Technické vědy, p.37-40.

14. *Achenbach J.D., Nemman J.H., Ziegler F.* Separation at the interface of a circular inclusion and the surrounding medium under an incident compressive wave. J. Appl. Mech., ASME, E. 1970. N 2, p.46-53.

15. *Andres U.* Electrical disintegration of rock Mineral proc. Extractive Metallurgy Rev., 1995. N 14, p.87-110.

16. *Sigimoto D.* et al. Performance of high power lasers for rock excavations. Proc. SPIE 388. 2000, p.49-59.

## STUDY ON DISINTEGRATION OF VERY CLAYEY SANDS IN PRECIOUS METAL DEPOSITS

**N.P.HRUNINA**, *PhD in Engineering Sciences, Senior Research Assistant, npetx@mail.ru*
**A.Yu.CHEBAN**, *PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, chebanay@mail.ru*
*Mining Institute of Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Habarovsk, Russia*

The article covers findings of the research on very clayey sands of the gold placer in the stream Mad, Primorsky Krai. The sands of the gold placer studied proved to be rather complicated for disintegration and subsequent enrichment owing to high content of dispersed factions, iron oxides, and the clay mineral montmorillonite and have low dynamics of reducing elastic properties under water saturation. To solve the problem of disintegration of very clayey sands with low dynamics of deformation properties under water saturation the authors justified the need for further research into processes based on conversion of the kinetic energy of the fluid flow in the energy of acoustic oscillations with a sequential combination of additional hydrodynamic effects including jet division.

***Key words***: dispersability, water saturation, disintegration, the speed of ultrasound.