

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИКРОДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПЕСКОВ КОМПЛЕКСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С ВЫСОКИМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2017 г. **Н.П. Хрунина, А.Ю. Чебан**

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН (ИГД ДВО РАН), г. Хабаровск

Статья поступила в редакцию 12.05.16 г., доработана 17.05.16 г., подписана в печать 19.10.16 г.

Рассмотрены результаты исследования песков высокоглинистого россыпного сложного комплексного месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла с высокими прочностными характеристиками песков и повышенным содержанием мелких фракций ценных компонентов. Осуществлен энергодисперсионный микроанализ образцов пород. В пробах присутствуют микроэлементы широкого спектра благородных (в том числе золота, серебра, платины), редкоземельных и других элементов. Установлено, что пески исследуемой золотоносной россыпи являются достаточно сложным объектом для дезинтеграции. Экспериментально-аналитическим путем определены акустические характеристики исследуемых песков в исходном состоянии и при водонасыщении, которые свидетельствуют о значительном превышении доли максимальных значений модуля сдвига. Для решения вопроса микродезинтеграции, с целью извлечения мелкого и тонкого золота более экологически и технологически эффективными средствами, предложено использовать системы, в основе которых лежат процессы кавитационно-акустического воздействия на минеральную составляющую гидро-смеси.

Ключевые слова: дезинтеграция, водонасыщение, волновое сопротивление, скорость продольных и поперечных волн ультразвука.

Хрунина Н.П. — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории проблем освоения россыпных месторождений ИГД ДВО РАН (680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51). E-mail: npetx@mail.ru.

Чебан А.Ю. — канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник лаборатории проблем освоения рудных и нерудных месторождений открытым способом ИГД ДВО РАН. E-mail: chebanay@mail.ru.

Для цитирования: Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. Совершенствование процессов микродезинтеграции песков комплексного месторождения благородных металлов с высокими прочностными характеристиками // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-4-10.

Khrunina N.P., Cheban A.Yu.

Improvement of microdesintegration processes for sand obtained from a complex deposit of precious metals and characterized by high strength characteristics

The paper considers research findings on sands from the high-clay alluvial compound complex deposit of the Fadeevsky ore-placer site characterized by high sand strength characteristics and by an elevated content of small fractions of valuable components. The paper describes an energy-dispersive microanalysis of rock samples. The samples contain trace elements of a wide range of noble (including gold, silver, and platinum), rare-earth and other elements. It was established that sands from the gold-bearing placer under study constituted a rather complex object for disintegration. Acoustic characteristics of sands under study in their original state and after water saturation were determined experimentally and analytically. They indicate a significant exceedance of the proportion of shear modulus maximum values. In order to solve the microdisintegration problem for the purpose of extracting small and fine gold by more environmentally and technologically efficient means, the paper proposes to use systems based on processes of cavitation-acoustic influence on the mineral component of the slurry.

Keywords: disintegration, water saturation, wave resistance, velocity of longitudinal and transverse ultrasound waves.

Khrunina N.P. — Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of the Laboratory of problems developing placer deposits of Mining Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI FEB RAS) (680000, Russia, Khabarovsk, Turgenev str., 51). E-mail: npetx@mail.ru.

Cheban A.Yu. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., senior researcher of the Laboratory of problems of ore and non-ore deposits in the open way of MI FEB RAS. E-mail: chebanay@mail.ru.

Citation: Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Sovershenstvovanie protsessov mikrodezintegratsii peskov kompleksnogo mestorozhdeniya blagorodnykh metallov s vysokimi prochnostnymi kharakteristikami. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 3. P. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-4-10.

Введение

В последние годы на территории Приморского края выявлено несколько десятков золотых, золотосеребряных и серебряных месторождений и проявлений. Наиболее значительные из них: Глухое, Кумирное, Малиновское, Майское, Приморское, Салют, Крестовское, Милоградское, Силанское, Союзное, Таежное, Ягодное и др. Коренные комплексные месторождения содержат золото, г/т: Приморское — 11,49; Прогресс — 6,19; Восток-2 — 1,4; Силанское — 0,98; Таежное — 0,63. Всего по краю запасы (балансовые и забалансовые) коренного золота оцениваются примерно в 7,2 т, россыпного — около 13,8 т. Известно более 80 россыпей золота [1]. В большинстве своем пески россыпей представляют собой гетерогенные системы со сложной структурой, важной особенностью которой является присутствие мелкодисперсных глинистых частиц в 3 состояниях: твердом, цементированном между собой и породными минералами; влажном, с включением неразрушенных элементов; в виде вязкой глинистой массы в суспензии. Трансформация продуктивной породной массы методом объемного разрушения в массиве — достаточно трудоемкая операция, недостатки которой связаны с низкой скоростью протекания процессов диффузии в глинистых песках и слабым эффектом разрушения при механическом и гидродинамическом воздействиях [2].

Анализ используемых в производственных условиях технологических операций (оттаивание, выемка, рыхление, разрушение и дезинтеграция песков в безнапорных и напорных потоках воды) и исследование функциональных особенностей всего спектра оборудования на практике [2–6] позволяют констатировать тот факт, что в применяемых технологических процессах добычи полезных ископаемых глинистые пески не подвергаются эффективной дезинтеграции в размерном диапазоне до 0,5 мм и менее.

Физико-механические изменения перерабатываемых глинистых песков золотоносных россыпей тесно связаны с процессами водонасыщения, фильтрационно-дренажного водопоглощения, суффозии, структурной перестройки в водной среде, развивающимися с определенной длительностью в естественных условиях, поэтому совершенствование данных процессов может происходить на основе применения новых интенсифицирующих воздействий, способных разрушать связи между

частицами малых размеров [2, 7–18]. Развитие данных методов может идти по пути изучения вопросов, связанных с изменением физико-механических характеристик песков при водонасыщении.

Результаты исследования

Для оценки и прогнозирования процессов микродезинтеграции высокоглинистых песков с преимущественно мелким и тонким золотом в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке первостепенное значение приобретает исследование структурно-механических, физико-механических, в том числе акустических, свойств песков природных и техногенных объектов месторождений благородных металлов Дальнего Востока.

Целью настоящей работы являлось изучение состава песков и физико-механических (в том числе акустических) и структурно-механических свойств вмещающих пород для обоснования рекомендаций по дезинтеграции песков комплексного месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла с высокими прочностными характеристиками.

С помощью сканирующего электронного микроскопа JCM-6000 PLUS NEOSCOPE (JEOL, Япония) осуществлен энергодисперсионный микроанализ образцов пород, отобранных на участках месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла (рис. 1, 2). В пробах присутствуют микроэлементы широкого спектра благородных (в том числе золота, серебра, платины), редкоземельных и других элементов: Ce, La, Os, Eu, Gd, Nd, Sm, Tb, In, Dy, Th, Fe, Ca, K, P, Si, Al, Mg, Hg, O, C (рис. 2).

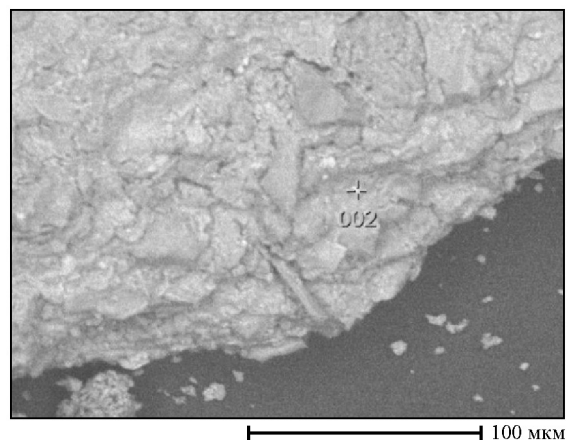
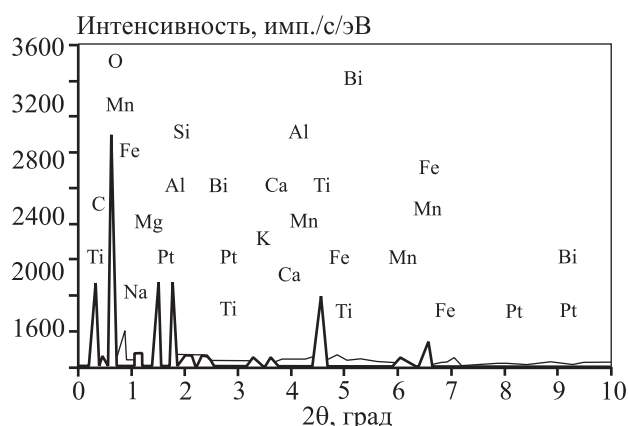


Рис. 1. Изображение сканируемой поверхности исследуемой пробы



Элемент	Содержание		Элемент	Содержание	
	мас.%	ат.%		мас.%	ат.%
C	24,14	36,12	Ca	0,10	0,05
O	45,14	50,71	Ti	10,98	4,12
Na	0,27	0,21	Mn	1,22	0,40
Mg	0,38	0,28	Fe	9,88	3,18
Al	3,80	2,53	Pt	0,20	0,02
Si	3,59	2,30	Bi	0,12	0,01
K	0,17	0,08			

Рис. 2. Спектрограмма микроэлементов исследуемого образца комплексного месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла

Фазовый анализ проб исследуемого месторождения изучали с помощью дифрактометра ДРОН-7 (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург) (напряжение трубки — 40 кВ, ток накала — 20 мкА, шаг сканирования по углу 2θ — 0,05 град). Для идентификации линий рентгеновских спектров использовался программный пакет PDWin (НПП «Буревестник»). В пробах установлены следующие минералы: кварц, нонтронит, герасимовскит, кляшанит, альбит, мусковит, яacobсит, тажеранит, алмадин. Нонтронит (nontronite) — минерал из группы монтмориллонита — вермикулита. Монтмориллониты относятся к трудноразрушаемым глинистым минералам.

Гранулометрический анализ песков выполнен ситовым способом. Масса фракций (+2; -2 +1; -1 +0,5; -0,5 мм) определялась на лабораторных электронных весах «OHAUS Scout Pro SPU202» (Mettler Toledo, Китай) с систематической погрешностью ±0,001 г. Исходная масса проб одной из выборки образцов составляла 306; 309 и 308 г. Содержание фракций <0,5 мм составило от 79 до 84 % от общей массы образцов (рис. 3).

Полученные результаты исследований грану-

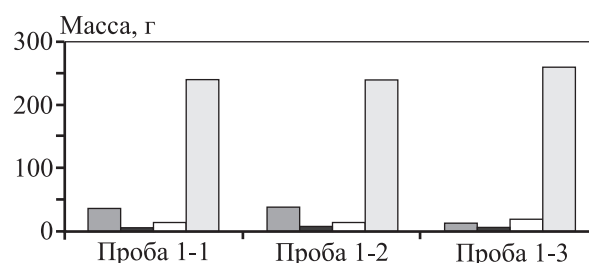


Рис. 3. Гистограмма распределения фракций материала по массе
Фракции слева направо, мм: +2; -2 +1; -1 +0,5; -0,5

лометрического состава песков показали во всех пробах повышенное содержание фракций размером <0,5 мм. Для данного участка со средней естественной влажностью 4,4 % требуется значительное увеличение интенсивности упругих колебаний для водонасыщения и последующей микродезинтеграции песков при экологически безопасных гравитационных способах переработки. Дисперсность фракции <0,5 мм устанавливали с помощью спектра Фурье в среде минеральной гидросмеси посредством лазерного дифракционного микроанализатора «Analysette 22 MicroTec Plus» (Fritsch GmbH, Германия), работающего на основе сходящегося лазерного луча и использующего физический принцип рассеяния электромагнитных волн для определения распределения частиц по размерам.

Учитывая сложность объектов исследования, их комплексность, высокие прочностные характеристики, повышенное содержание мелких фракций ценных компонентов, исследование процессов дезинтеграции приобретает особое значение. Немногие теоретические выводы, полученные до сих пор, дают достаточно ограниченные представления о возникающих процессах кавитации, струйных и вихревых течениях в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния. На наш взгляд, теоретическое обоснование первичной дезинтеграции минеральной составляющей гидросмесей в условиях многоступенчатого кавитационного процесса должно включать оценочные параметры упругости песков, в том числе при сдвиге.

Установление экспериментальным путем значений плотности, естественной влажности, скорости прохождения ультразвукового импульса в продольной волне в исследуемых образцах место-

рождения позволило расчетным путем определить волновое акустическое сопротивление:

$$\zeta = \rho V_p$$

и модуль сдвига [2]:

$$\mu = \rho V^2$$

исследуемых песков с естественной влажностью. Здесь ρ — равновесная эквивалентная плотность песков с естественной влажностью, определенная экспериментальным путем, или расчетная плотность, кг/м^3 ; $V = V_p/\sqrt{3}$ — расчетная скорость поперечных волн в зависимости от водосодержания, где V_p — измеренная экспериментальным путем скорость продольных волн в образце с естественной влажностью или расчетная при равновесной эквивалентной плотности и влажности, м/с .

Измерения скорости ультразвукового импульса выполнялись с помощью ультразвукового прибора «Пульсар-1.1» (НПП «Интерприбор», г. Челябинск) методом сквозного прозвучивания. Результаты измерений и вычислений для одной из выборки образцов представлены на рис. 4.

Минимальное значение модуля сдвига исследуемых песков составляет 0,515 ГПа, а максимальное — превышает его более чем в 3 раза: 1,783 ГПа. Из всей выборки образцов доля максимальных значений модуля сдвига превышает долю минимальных и составляет 60 %. В таком же соотношении изменяется величина волнового сопротивления песков. Учитывая акустические характеристики

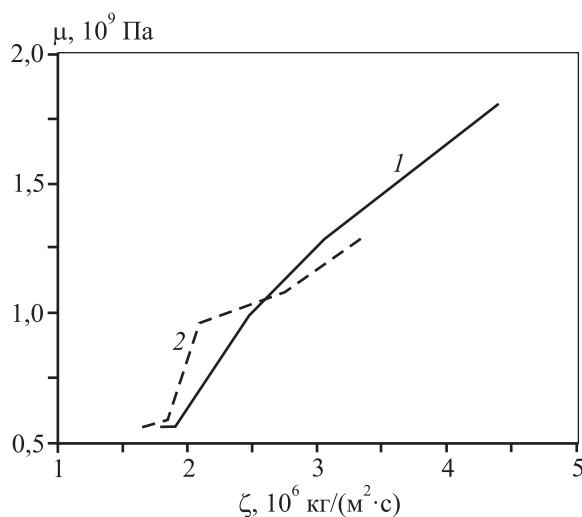


Рис. 4. Зависимость модуля сдвига (μ) от равновесного акустического сопротивления (ζ) песков комплексного месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла при водонасыщении 4,4 % (1) и 30 % (2)

песков, становится очевидным, что полное разрушение жестких структурных связей известными методами будет происходить с низкой эффективностью.

К интенсифицирующим гидродинамические процессы факторам можно отнести высокие сдвиговые напряжения в потоке гидросмеси, интенсивную кавитацию, развитую турбулентность, гидравлические удары и др. Для решения вопроса микродезинтеграции, с целью извлечения мелко- и тонкого золота более экологически и технологически эффективными средствами, авторами разработаны и предлагаются системы, моделирующие процессы [19–21] многоступенчатой струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси. Схема дезинтеграции глинистых песков с высоким содержанием мелко- и тонкого золота, включающая кавитационные реакторы, обеспечивающие резонансные акустические явления в гидропотоке, представлена на рис. 5.

Кавитационные реакторы [19] позволяют осуществить глубокую дезинтеграцию песчано-глинистых частиц до микроуровня посредством преобразования кинетической энергии потока минеральной гидросмеси в энергию акустических колебаний в гидродинамическом генераторе. На входе последнего создают высокоскоростную струю, формирующую посредством отрагательной поверхности скачок уплотнения и торoidalную кавитационную зону с усилением осциллирующей скачка и возникновением полей первичной гидродинамической и вторичной акустической кавитации в гидросмеси.

Системы кавитационных реакторов обеспечивают тонкоструйное разделение с усилением кавитационно-акустического воздействия на минеральную составляющую гидросмеси. Исследуемый процесс вихревого и импульсного гидродинамического воздействия на твердую составляющую включает упругопластическую деформацию и разрушение с образованием новых поверхностей мелких частиц.

Эффективность дезинтеграции зависит от физико-механических особенностей высокоглинистых песков, а также от воздействия среды и различных типов гидродинамического воздействия. В работе [21] обозначен концептуальный подход к теоретическому обоснованию изучаемого процесса. Струйно-акустическая дезинтеграция минеральной составляющей гидросмеси включает

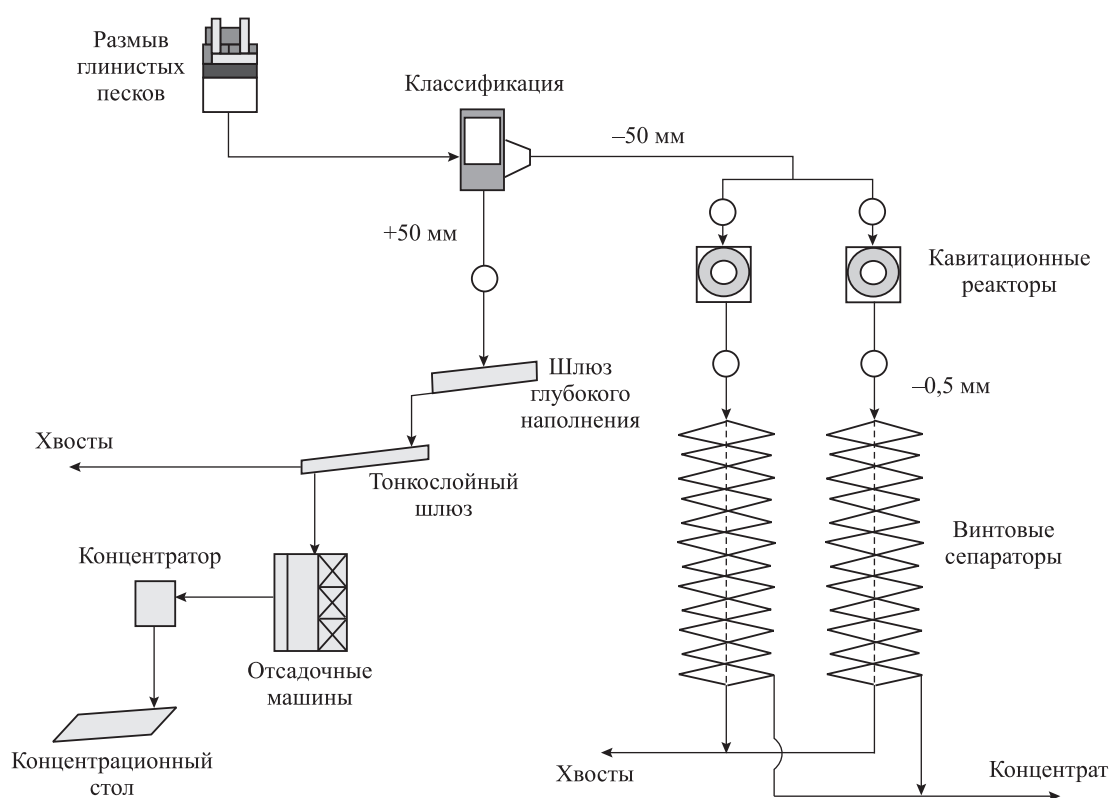


Рис. 5. Схема дезинтеграции глинистых песков с высоким содержанием мелкого и тонкого золота с кавитационными реакторами

расчет гидродинамических эффектов ряда зон, давление гидросмеси в которых изменяется в процессе перемещения в рабочей среде установки. Выделяются зоны давления струи минеральной гидросмеси, зоны сужения (конфузоры) и расширения. Теория гидродинамического воздействия должна развиваться с учетом не только конструктивных параметров установки, но и физико-механических характеристик высокоглинистых песков, образующих твердую составляющую гидросмесей. Такими характеристиками предлагаются акустические и упругие параметры песков, в том числе модуль сдвига. При этом, поскольку дезинтеграция происходит на микроуровне, разрушающий эффект может характеризоваться изменением термодинамического потенциала системы.

Обоснование связи сдвиговой характеристики высокоглинистой твердой составляющей гидросмеси с основными гидродинамическими параметрами системы многоступенчатой струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси является основополагающим фактором при выделении микрочастиц ценных компонентов. Обеспечение протекания процесса при расчетном давлении через стационарные кон-

фузорно-диффузорные системы и кавитационные элементы, не требующие смещения или вращения с помощью приводов, обеспечивает низкое энергопотребление, необходимое только на подачу гидросмеси в установку.

Заключение

В результате экспериментальных исследований элементного состава, фазового анализа высокоглинистых песков россыпного сложного комплексного месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла установлено наличие глинистых минералов монтмориллонитовой группы. Это позволяет отнести изучаемый объект к достаточно сложному для дезинтеграции и извлечения мелких и тонких частиц ценных компонентов при переработке песков. Учитывая также акустические характеристики песков, становится очевидным, что полное разрушение жестких структурных связей известными методами будет происходить с низкой эффективностью.

Для решения вопроса микродезинтеграции, с целью извлечения мелкого и тонкого золота более технологически эффективными средствами, мо-

гут быть использованы системы, в основе которых лежат процессы кавитационно-акустического воздействия на минеральную составляющую гидро-смеси с низкой степенью энергозатратности.

Литература

1. *Архипов Г.И.* Минеральные ресурсы Приморского края: состояние и перспективы // ГИАБ. 2010. No. 4. С. 464—475.
2. *Хрунина Н.П., Мамаев Ю.А., Пуляевский А.М., Стратчук О.В.* Новые аспекты научных основ ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков россыпей Приамурья / Под ред. А.М. Пуляевского. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011.
3. *Кисляков В.Е., Никитин А.В.* Подготовка глинистых песков россыпных месторождений к дезинтеграции управляемым водонасыщением // Горн. журн. 2010. No. 2. С. 28—30.
4. *Лушпей В.П., Петраков А.Е.* Пути решения проблем извлечения тонкодисперсного золота // Горн. инф.-анал. бюл. (науч.-техн. журн). 2013. No. S4-10. С. 87—91.
5. *Кисляков В.Е., Кливоченко С.А.* Нетрадиционные способы разработки россыпных месторождений полезных ископаемых // Успехи соврем. естествознания. 2004. No. 4. С. 144—148.
6. *Кисляков В.Е.* Прогнозная оценка извлечения золота при обогащении песков россыпных месторождений // Цвет. металлы. 2008. No. 3. С. 13—16.
7. *Elshin V.V., Melnyk S.A.* Current state and prospects of development of technology of desorption of gold from the saturated activated carbons // Austr. J. Tech. Natur. Sci. 2014. No. 9—10. P. 114—118.
8. *Zhe Cui, Li Yang, Fan L.S.* Bubble modulation using acoustic standing waves in a bubbling system. Elsevier // Chem. Eng. Sci. 2005. Vol. 60. P. 5971—5981.
9. *Gilmanov A., Sotiropoulos F.* A hybrid Cartesian immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies // J. Comput. Phys. 2005. Vol. 207. No. 2. P. 457—492.
10. *Joe Z., Bruce J., Chris M.* Establishing the process mineralogy of gold ores // Tech. Bull. 2004. No. 14. P. 1—5.
11. *Andres U., Jirestig J., Timoshkin I.* Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses // Powder Technol. 1999. Vol. 104. No. 1. P. 37—49.
12. *Sekerj-Zenkovitch S.Ya., Bordakov G.A., Kalinitchenko V.A., Shingareva I.K.* Faraday resonance in water waves at nearly critical depths // Exp. Therm. Fluid Sci. 1998. Vol. 18. No. 2. P. 123—133.
13. *Berryman J.G., Wang H.F.* Elastic wave propagation and attenuation in double-porosity dual-permeability medium // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2000. No. 37. P. 63—78.
14. *Wilmanski K.* Propagation of sound and surface waves in porous materials // WIAS-Preprint. 2001. No. 684. P. 1—12.
15. *Zhi-Jun Dai, Zhen-Bang Kuang, She-Xu Zhao.* Reflection and transmission of elastic waves from the interface of a fluid-saturated porous solid and a double porosity solid // Transp. Por. Media. 2006. Vol. 65. P. 237—264.
16. *Schanz M., Diebels S.* A comparative study of Biot's theory and the linear theory of porous media for wave propagation problem // Acta Mech. 2003. Vol. 161. P. 213—235.
17. *Smeulders D.J.* Experimental evidence for slow compressional waves // J. Eng. Mech. 2005. Vol. 131. No. 9. P. 908—917.
18. *Wilmanski K.* A few remarks on Biot's model and linear acoustics of poroelastic saturated materials // Solid Dynam. Earth. Eng. 2006. Vol. 26. P. 509—536.
19. *Хрунина Н.П.* Способ дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке и геотехнологический комплекс для его осуществления: Пат. 2506128 (РФ). 2014.
20. *Хрунина Н.П.* Способ струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси и гидродинамический генератор акустических колебаний: Пат. 2506127 (РФ). 2014.
21. *Хрунина Н.П., Чебан А.Ю.* Концептуальный подход к теоретическому обоснованию гидродинамической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси на примере предлагаемой установки // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта (Украина, Днепропетровск). 2015. No. 1 (2). С. 49—56.

References

1. *Arkhipov G.I.* Mineral'nye resursy Primorskogo kraja: sostoyanie i perspektivy [Mineral resources of Primorski Krai: status and prospects]. *GIAB*. 2010. No. 4. P. 464—475.
2. *Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Pulyaevskii A.M., Stratchuk O.V.* Novye aspekty nauchnykh osnov ul'trazvukovoi dezintegratsii vysokoglinistykh zolotosoderzhashchikh peskov rossypei Priamur'ya [New aspects of scientific bases of ultrasonic disintegration of highly clayey sands gold placers of the Amur region]. Ed. A.M. Pulyaevskii. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2011.
3. *Kislyakov V.E., Nikitin A.V.* Podgotovka glinistykh peskov

- rossypanykh mestorozhdenii k dezintegratsii upravlyаемым vodonasyshcheniem [Preparation of clay sand placer deposits in the disintegration of managed water saturation]. *Gornyi zhurnal*. 2010. No. 2. P. 28—30.
4. Lushpei V.P., Petrakov A.E. Puti resheniya problem izvlecheniya tonkodispersnogo zolota [Solutions to problems extracting the pulverized gold]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2013. No. S4-10. P. 87—91.
 5. Kislyakov V.E., Klivochenko S.A. Netraditsionnye sposoby razrabotki rossypanykh mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh [Innovative ways of developing placer deposits of minerals]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2004. No. 4. P. 144—148.
 6. Kislyakov V.E. Prognoznaya otsenka izvlecheniya zolota pri obogashchenii peskov rossypanykh mestorozhdenii [Forecast score extract gold enrichment of sand placer deposits]. *Tsvetnye metally*. 2008. No. 3. P. 13—16.
 7. Elshin V.V., Melnyk S.A. Current state and prospects of development of technology of desorption of gold from the saturated activated carbons. *Austr. J. Tech. Natur. Sci.* 2014. No. 9—10. P. 114—118.
 8. Zhe Cui, Li Yang, Fan L.S. Bubble modulation using acoustic standing waves in a bubbling system Elsevier. *Chem. Eng. Sci.* 2005. Vol. 60. P. 5971—5981.
 9. Gilmanov A., Sotiropoulos F. A hybrid Cartesian immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies. *J. Comput. Phys.* 2005. Vol. 207. No. 2. P. 457—492.
 10. Joe Z., Bruce J., Chris M. Establishing the process mineralogy of gold ores. *Tech. Bull.* 2004. No. 14. P. 1—5.
 11. Andres U., Jirestig J., Timoshkin I. Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses. *Powder Technol.* 1999. Vol. 104. No. 1. P. 37—49.
 12. Sekerj-Zenkovich S.Ya., Bordakov G.A., Kalinitchenko V.A., Shingareva I.K. Faraday Resonance in water waves at nearly critical depths. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1998. Vol. 18. No. 2. P. 123—133.
 13. Berryman J.G., Wang H.F. Elastic wave propagation and attenuation in double-porosity dual-permeability medium. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2000. No. 37. P. 63—78.
 14. Wilmanski K. Propagation of sound and surface waves in porous materials. *WIAS-Preprint*. 2001. No. 684. P. 1—12.
 15. Zhi-Jun Dai, Zhen-Bang Kuang, She-Xu Zhao. Reflection and transmission of elastic waves from the interface of a fluid-saturated porous solid and a double porosity solid. *Transp. Por. Media*. 2006. Vol. 65. P. 237—264.
 16. Schanz M., Diebels S. A comparative study of Biot's theory and the linear theory of porous media for wave propagation problem. *Acta Mech.* 2003. Vol. 161. P. 213—235.
 17. Smeulders D.J. Experimental evidence for slow compressional waves. *J. Eng. Mech.* 2005. Vol. 131. No. 9. P. 908—917.
 18. Wilmanski K. A few remarks on Biot's model and linear acoustics of poroelastic saturated materials. *Solid Dynam. Earth. Eng.* 2006. Vol. 26. P. 509—536.
 19. Khrunina N.P. Sposob dezintegratsii mineral'noi sostavlyayushchei gidrosmesi v usloviyakh rezonansnykh akusticheskikh yavlenii v gidropotoke i geotekhnologicheskii kompleks dlya ego osushchestvleniya [A method to the disintegration of the mineral components of hydraulic fluid in terms of resonance acoustic phenomena in gidropotoke and geotechnological complex for its implementation]; Pat. 2506128 (RF). 2014.
 20. Khrunina N.P. Sposob struino-akusticheskoi dezintegratsii mineral'noi sostavlyayushchei gidrosmesi i gidrodinamicheskii generator akusticheskikh kolebaniy [A method the jet acoustic disintegration mineral components of hydraulic fluid and hydrodynamic acoustic waves generator]; Pat. 2506127 (RF). 2014.
 21. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Kontseptual'nyi podkhod k teoreticheskomu obosnovaniyu gidrodinamicheskoi dezintegratsii mineral'noi sostavlyayushchei gidrosmesi na primere predlagaemoi ustanovki. In: *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoj promyshlennosti i transporta* [Conceptual approach to the theoretical substantiation of hydrodynamic disintegration of mineral components of hydraulic fluid on the example of the proposed installation. In: *Modern innovative technologies of training engineers for mining and transport*]. Ukraina, Dnepropetrovsk. 2015. No. 1 (2). P. 49—56.