УДК 622.775

С.Б.ТАТАУРОВ, *канд. техн. наук, доцент, tataurovsb@mail.ru*
Министерство образования и науки Российской Федерации

S.B.TATAUROV, *PhD in eng. sc., associate professor, tataurovsb@mail.ru*
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

ОЦЕНКА РОССЫПНОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ КРИОЛИТОЗОНЫ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

В работе представлены результаты воздействия криогенеза на вещественный состав и геотехнологические свойства россыпного золотосодержащего сырья природного и техногенного происхождения. В частности, показаны отличительные особенности вещественного состава россыпей криолитозоны и за пределами, а также изучена природа, выявлены механизмы и установлены закономерности редуцирования амальгам золота техногенного происхождения. На основании полученных результатов обоснована необходимость применения комбинированной геотехнологии кучного выщелачивания золота из россыпей криолитозоны, включающей предварительную концентрацию крупного, среднего и мелкого золота, а также амальгамы.

***Ключевые слова*:** криогенез, россыпные месторождения, техногенные амальгамы золота, трансформация, криолитозона.

ASSESSMENT OF ALLUVIAL GOLD-BEARING RAW MATERIALS FROM THE PERMAFROST ZONE FOR JUSTIFICATION OF COMBINED GEOTECHNOLOGY OF GOLD HEAP LEACHING

The paper presents results of cryogenetic impact on mineral composition and geotechnological properties of alluvial gold-bearing raw materials of natural and man-made origin. In particular, distinctive features in mineral composition of alluvial deposits are described within the permafrost zone and outside it as well as the nature, mechanisms and peculiar features in reduction of man-made gold amalgams are shown. The results obtained were used to justify the expediency of implementation of the combined heap gold ore leaching technology at alluvial deposits in the permafrost zone, which includes preliminary concentration of coarse, medium and fine gold as well as the gold amalgam.

***Key words*:** cryogenesis, alluvial deposits, man-made gold amalgams, transformation, permafrost zone.

По своей природе криогенез является процессом, приводящим к физическим, физико-химическим и химическим трансформациям руд и минералов за счет преобразования солнечной энергии в дискретные тепловые колебания в оттаивающих, промерзающих и мерзлых массивах горных пород.

Интенсивность воздействия криогенеза на состав, строение и свойства минерального сырья определяется изменением термодинамических параметров в пространстве и во времени, зависящих как от физико-географических, так и горно-геологических условий.

Таблица 1

Характеристика россыпей золота природного и техногенного происхождения по разрезу криолитосферы

	Слой*	Подзоны (слои)*	Криогенная текстура*	Льдистость*	Технологические типы и степень окисления	Характеристика золота	Тип месторождений
Криолитозона	Экзо- (фазово-активная)	Активная (суточный)	Массивная	СТР, СМР льдистые,	Окисленные (70-100%)	Преобладание крупного и среднего золота в свободном виде, золота в сростках и в окисленной рубашке, уплощенно-таблитчатая, таблитчато-пластинчатая, высокая пробность, амальгама	Россыпные (техногенные)
		Высоко-активная (сезонный)	Корковая, корково-массивная	СТР, СМР, сильно-льдистые			

По данным [10]; СТР, СМР – соответственно сезонно-талые и сезонно-мерзлые руды

Согласно современным представлениям по энергообеспеченности выделяют следующие энергетические слои криолитозоны: экзослой (высоко- и среднеактивный), эпислой (низкоактивный), мезослой (квазистационарный) и эндослой (низкоактивный) [10].

Наиболее активным слоем криолитозоны является экзослой, в котором формируются россыпные и геотехногенные месторождения золота. Главную роль в его высокой активности определяет количество циклов суточного и сезонного промерзания-оттаивания, т.е. количество переходов температуры горных пород через 0 °С (табл.1). Для территории криолитозоны России количество циклов промерзания-оттаивания горных пород на дневной поверхности в год в среднем изменяется от 50 до 100 [1].

В результате этого, активность криогенеза в слое суточных и сезонных колебаний температур возрастает кратно, а для некоторых районов в десятки и сотни раз сокращает время на формирование и продуктивность россыпей, а также на изменение физических, физико-химических и технологических свойств золотосодержащего сырья. Наиболее подвержены этому воздействию россыпные месторождения и отвалы золотоизвлекательных предприятий криолитозоны.

Анализ геологических и справочных данных [1], кадастров месторождений россыпного золота свидетельствует, что в районах распространения криолитозоны золото в россыпях характеризуется более высокой крупностью, пробностью и уплощенностью, по сравнению с объектами, находящимися за

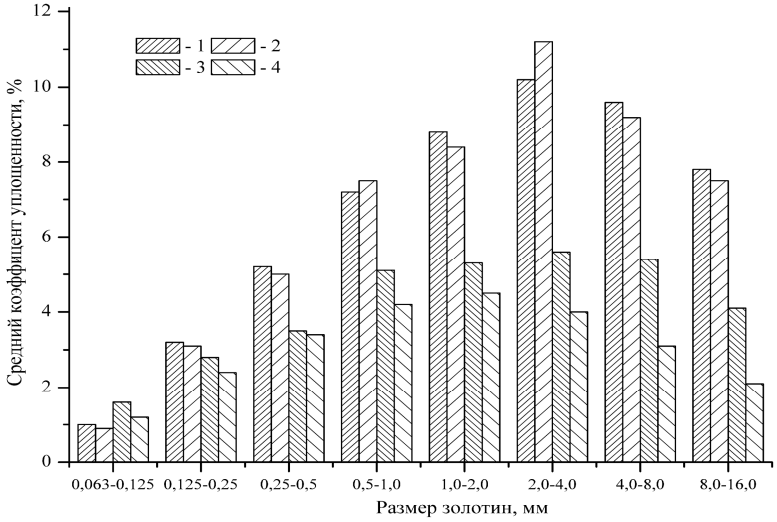


Рис.1. Изменчивость уплощенности золота в криолитозоне и за ее пределами

1, 2 – криолитозона сплошного типа; 3, 4 – территория отсутствия криолитозоны

пределами территории распространения многолетнемерзлых горных пород. По всей видимости, определяющими факторами геотехнологических свойств золота криолитозоны кроме первичных признаков и возраста коренных источников является и общая энергоемкость процессов, участвующих в криогенном преобразовании золотосодержащего сырья на территории развития криолитозоны различных типов и за ее пределами.

В частности, вскрыты отличия в форме частиц золота по площади распространения криолитозоны и за ее пределами. Установлено, что для территории криолитозоны сплошного типа характерны более уплощенные частицы золота, чем за ее пределами. Как показали результаты анализа заметное увеличение коэффициента уплощенности золотин характерно для частиц крупностью +0,25 мм, а своего максимума они достигают при крупности –4+2 мм. Максимальная разница между коэффициентом уплощенности золотин класса –0,5+0,25 мм на территории криолитозоны и за ее пределами, составила 65 %. С уменьшением размера частиц крупностью –0,25 мм наблюдается увеличение комковатости золота (рис.1).

Выявленные отличия россыпного золота по крупности, форме и пробности, с учетом возраста коренных источников, расположенных на территории криолитозоны и за ее пределами, обобщены применительно к исследуемым объектам ряда золотоносных провинций (табл.2).

Установленные отличия в изменении параметрических характеристик россыпного золотосодержащего сырья по широтной зональности криолитозоны и за ее пределами позволяют решать задачи по оптимизации геотехнологий кучного выщелачивания золота на стадии решения предпроектных и проектных задач, а также использовать при проведении минералогических исследований золотосодержащего сырья. В частности, оценка пробности (с пересчетом на плотность), крупности, коэффициента уплощенности россыпного золота позволяет более точно оценивать уровень его извлечения в расчетных формулах, что особо важно при выборе комбинированных геотехнологий сочетающих процессы предварительной концентрации и кучного выщелачивания золотосодержащего сырья.

В ходе исследований золотосодержащего сырья техногенных месторождений криолитозоны были проведены комплексные исследования золотосодержащих амальгам, присутствие которых обязано широкому применению метода амальгамации в период XIX-XX веков. В результате в техногенных месторождениях и отвалах золотодобычи криолитозоны накоплены десятки тонн амальгамы золота и металлической ртути, которую следует предварительно утилизировать для снижения потерь золота при кучном выщелачивании и экологической безопасности экосистем.

С этой целью был проведен цикл исследований по изучению изменения структуры, агрегатного состояния и технологических свойств амальгам золота техногенного происхождения в условиях криолитозоны.

Таблица 2

Изменения геотехнологических свойств золота россыпных месторождений по широтной зональности криолитозоны и за ее пределами

Показатели	Россыпные месторождения			Техногенные месторождения	
	В пределах развития криолитозоны		За пределами криолитозоны	В пределах развития криолитозоны	За пределами криолитозоны
Возраст коренных источников (по Е.И.Тищенко)	Рифейский Мезозойский		Кайнозойский	Рифейский Мезозойский	Кайнозойский
Золотоносные провинции (по Г.П. Воларовичу и др.)	Лено-Енисейская	Забайкальская	Восточно-Приморская	Лено-Енисейская, Забайкальская	Восточно-Приморская
Размерность золота	Крупное – тип Г	Среднее – тип В	Мелкое – тип Б	Среднее – тип В мелкое – тип Б	Мельчайшее – тип А
Уплощенность формы	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
Пробность золота	~950	~860	~750	~860 – 950	~750

Примечание. Размерность россыпного золота приводится по классификации Гинзолото.

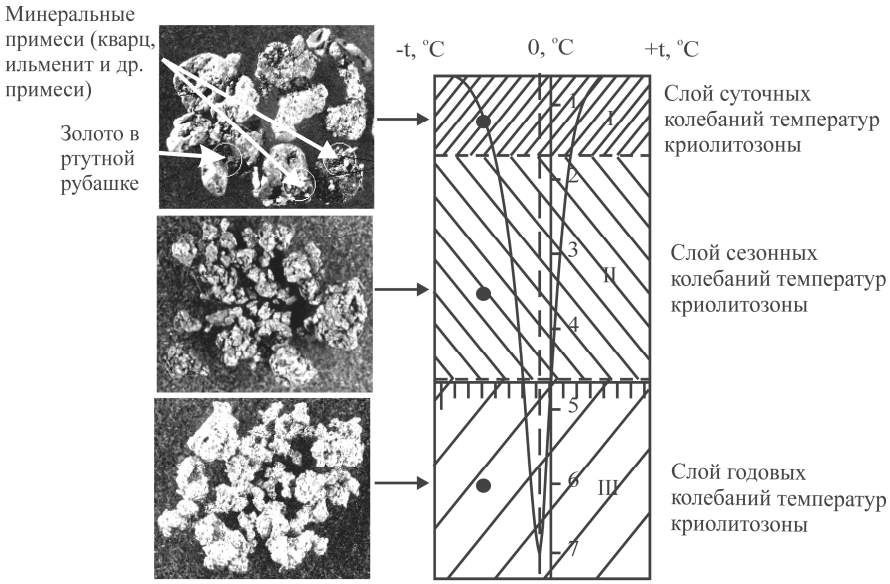


Рис.2. Схема редуцирования амальгам золота в техногенных отвалах криолитозоны (×150)

Методологической основой наших исследований стали работы в области изучения амальгамных систем Плаксина И.Н. [7], Козловского М.Т. и др.[5], Коршунова В.Н. [6], Шевкаленко и др. [9].

Исследования проводились на техногенных месторождениях золота криолитозоны Забайкалья и за ее пределами, отбор амальгам золота проводился как из массивов, так и из продуктов переработки техногенного золотосодержащего сырья. Общее количество проб амальгам золота составило 35, масса проб амальгам золота техногенного происхождения составляла от 3 до 5 г.

В результате исследований установлены взаимосвязи между содержанием химических компонентов и минеральных примесей в амальгамах золота, количеством циклов замерзания-оттаивания (ЦЗО) и временем нахождения в отвалах золотодобычи. Полученные результаты свидетельствуют, что в слое годовых колебаний температур переход амальгамы по схеме жидкое → гетерогенно-жидкое → твердое агрегатное состояние происходит в пять раз медленнее, чем в слое сезонных колебаний температур, и на порядок медленнее, чем в суточном слое колебаний температур (рис.2). Это объясняется тем, что динамические колебания суточных и сезонных температур в техногенных массивах, при прочих равных условиях, играют решающую роль в динамике трансформации их строения и свойств. Из чего следует, что процесс редуцирования амальгам золота техногенного происхождения в криолитозоне приводит к переходу одного вещества в другое вследствие колебаний температур среды, заканчивающийся обособлением металла первично растворенного в ртути.

Исследования структуры и состава амальгам золота техногенных месторождений и амальгам, синтезированных в лабораторных условиях, показали, что в силу активизации кинетики твердотельной диффузии ртути и золота при циклическом замерзании-оттаивании (ЦЗО) наблюдается образование зародышей кристаллов, которые переходят затем в более крупные кристаллиты золота в отличие от амальгам золота находящихся в слое годовых колебаний температур в диапазоне их отрицательных значений (рис.3, *а*, *б*).

Дальнейшая трансформация амальгам золота в криолитозоне в результате динамических суточных и сезонных колебаний температур, выщелачивания криогенными концентрированными водными растворами и высокой миграционной подвижности ртути в газообразном и жидком состоянии приводит к

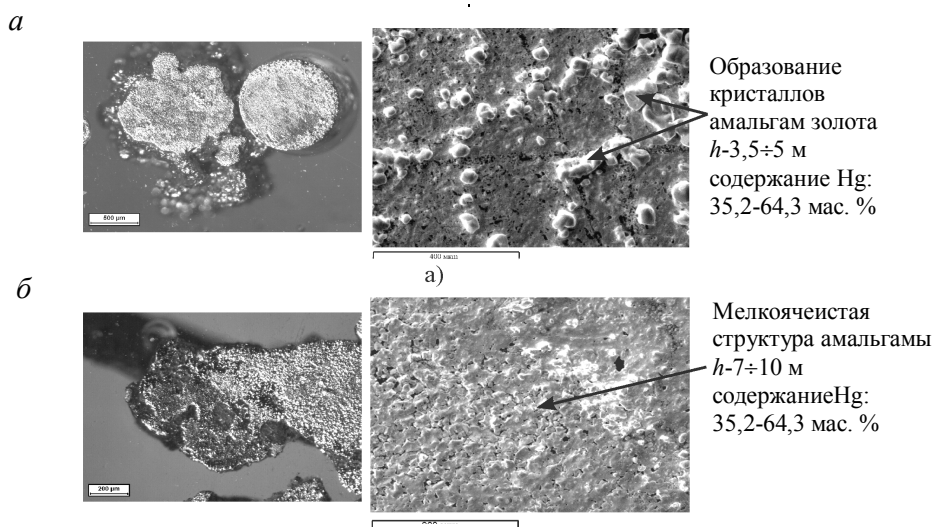


Рис.3. Структура амальгам золота техногенного происхождения в криолитозоне (месторождение Большой Горохон): слой сезонных (*а*) и годовых колебаний температур (*б*)

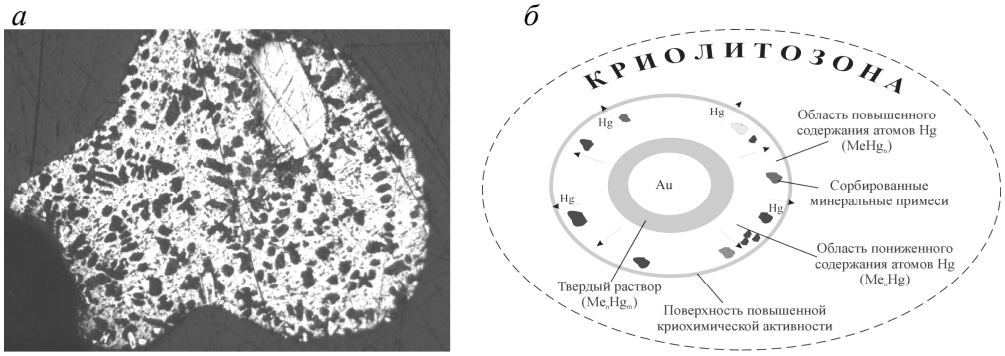


Рис.4. Микрофотография образца твердого раствора амальгамы золота техногенного происхождения в отраженном свете, отобранная из слоя суточных колебаний температур (*а*) (увел.×80, месторождение Большой Горохон) и структура золотосодержащей амальгамы в криолитозоне (*б*)

увеличению содержания золота в амальгаме. В результате содержание ртути сокращается настолько, что образовавшиеся отдельные кристаллиты амальгам золота и других металлов (Cu, Pb, Ag) объединяются, образуя частицы, крупность которых может превышать фоновые значения крупности природного золота. Причем как установлено натурными и экспериментальными исследованиями, образующиеся амальгамы имеют зональное строение, что объясняется различиями в плотности и растворимостью в ртути металлов – золота, серебра, свинца и меди.

Изучение образцов золотосодержащих амальгам, находящихся в твердом агрегатном состоянии техногенного происхождения показало, что амальгамы представляют собой ядро золота, окруженное оболочками состоящими из амальгам, содержащих – золото (17,67 до 27,16 мас. %), свинец (38,62 до 87,19% мас. %), ртуть (7,52 до 15 мас. %), ближе к периферии установлены высокие содержания кислорода от 37,86 до 59,41 мас. %. Причем высокие концентрации кислорода в амальгаме установлены в соединениях со свинцом. Кроме мелких и тонких частиц золота амальгама по периферии содержит и другие минеральные примеси (рис.4, *а*).

Таким образом, исследования структуры твердой золотосодержащей амальгамы техногенных месторождений золота, ото-

бранной на глубине суточных колебаний температур в условиях распространения островной криолитозоны показало, что золотосодержащие амальгамы имеют зональное строение из амальгам различного состава и химически чистых металлов (меди, серебра, свинца и т.д.), а также минеральных примесей (рис.4, *б*).

По результатам исследований была составлена гистограмма плотности амальгамообразующих элементов и модели распределения химических соединений ртути в амальгамах с металлами первой IMe и второй IIMe групп [8].

На основании результатов проведенных исследований структурного, вещественного и фазового состава золотосодержащих амальгам техногенного происхождения была установлена взаимосвязь между изменением содержания в ней компонентов и воздействия ЦЗО в отвалах золотодобычи криолитозоны [11].

Из исследований структурного и фазового состава золотосодержащих амальгам, следует, что при вовлечении в отработку техногенных амальгамосодержащих месторождений золота методом кучного выщелачивания, извлечение золота при выщелачивании амальгамы происходить практически не будет вследствие нахождения золота в оболочке из ртути, свинца и минеральных примесей (кварца, ильменита, оксидов и гидрооксидов железа и др.).

Поэтому для извлечения золотосодержащих амальгам и металлической ртути техногенного происхождения наиболее приемлемым решением остается использование физических методов утилизации амальгам в голове геотехнологий кучного выщелачивания, что потребовало изучения свойств золотосодержащих амальгам техногенных месторождений криолитозоны.

На основании полученных результатов динамики криогенных преобразований состава и структуры амальгам золота (системы «золото-ртуть-минеральные примеси») техногенного происхождения были установлены физические и физико-химические свойства золотосодержащих амальгам техногенных месторождений Забайкалья (табл.3).

Таблица 3

Важнейшие физические и физико-химические свойства золотосодержащих амальгам техногенных месторождений

Агрегатное состояние		Физико-химические свойства				
		ρ, кг/м^3	λ(теор), Вт/(м·К)	ε, 10^{-5} мкВ/°С	$\chi_{уд}$, 10^{-8} м^3/кг	Cos θ_{max}
Жидкое	I	13780	21,5	–1,69	0,096	0,763
Гетерогенно-жидкое	II	14010	33,9	–1,67	0,222	Смачивание не наблюдалось
		15425	109,05	–1,5	0,01	
Твердое	III	14370	172,94	–1,69	0,115	–

Примечание: I, II, III – амальгамы геотехногенных месторождений, ρ, λ, ε, $\chi_{уд}$, Cosθ – соответственно плотность, коэффициент теплопроводности, термоэдс, удельная магнитная восприимчивость, краевой угол смачивания

На основе функциональной зависимости изменения плотности амальгамных систем получена формула ее расчета для различных систем «металл-ртуть-минеральные примеси», содержащих Au, Cu и другие металлы [11],

$$\rho_{ам} = \frac{\rho_{Au}\rho_{Hg}}{n_{Au}\rho_{Hg} + \rho_{Au}(1-(n_{Au}+n_{мин.пр.}))} + \frac{1}{\sum_{i=0}^{n}\frac{n_i}{\rho_i}},$$

где n_{Au}, $1-(n_{Au}+n_{м.пр.})$, $n_{м.пр.}$ – соответственно содержание Au, Hg и минеральных примесей в амальгаме, д.е.; n_i, ρ_i – соответственно весовое содержание и плотность минерала в амальгаме, д.е. и кг/м^3; ρ_{Hg}, ρ_{Au} – соответственно плотность ртути и золота, кг/м^3.

На основании полученных результатов исследований были созданы аппараты [3, 4] и разработана комбинированная геотехнология кучного выщелачивания золотосодержащего сырья криолитозоны [8].

Выводы

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

- установлены отличия в гранулометрическом составе, коэффициенте уплощенности и пробности россыпного золота по широтной зональности криолитозоны и за ее пределами;
- дана количественная оценка вещественному, фазовому составу, строению и свойствам золотосодержащих амальгам техногенных месторождений криолитозоны, вскрыты закономерности и объяснена природа редуцирования амальгам в техногенных массивах в условиях криогенеза за счет разнопериодных циклических колебаний температур по вертикальному разрезу криолитосферы:
- процесс редуцирования амальгам золота техногенного происхождения в криолитозоне приводит к переходу одного вещества в другое вследствие колебаний температур среды по разрезу криолитосферы, заканчивающийся обособлением металла первично растворенного в ртути.
- золотосодержащие амальгамы техногенных месторождений имеют зональное строение из амальгам различного состава и химически чистых металлов (меди, серебра, свинца и т.д.), а также минеральных примесей.

Таким образом, на основе выполненных исследований изучена природа, выявлены механизмы и установлены закономерности криогенного преобразования вещественного состава и геотехнологических свойств россыпного золотосодержащего сырья криолитозоны позволяющие оптимизировать параметры геотехнологий кучного выщелачивания золота с применением предварительной концентрации крупного, среднего и мелкого золота и золотосодержащей амальгамы техногенных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронков О.К.* К прогнозу морозного выветривания и морозостойкости скальных пород на территории СССР / О.К.Воронков, Л.Ф.Ушакова // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1985. Т.137. С.86-92.

2. Закономерности развития золотороссыпных узлов и россыпей золота / Мин-во геологии СССР, Вост.-Сиб. научн.-исслед. Институт геологии, геофизики и минер. сырья. М: Недра. 1985. 136 с.

3. *Кармазин В.В.* Золотодобыча России XIX-XX веков и современные технологии ликвидации причиненного ею экологического ущерба. / В.В.Кармазин, В.П.Мязин, О.И.Рыбакова, В.А.Измалков, С.Б.Татауров // МГГУ. М., 2000. 40 с.

4. *Кармазин В.В.* Теоретические и экспериментальные исследования сегрегационно-диффузионной концентрации золота из отвальных продуктов / В.В.Кармазин, С.Б.Татауров, Н.П.Кармазина, С.Н.Рахимов // Золотодобывающая промышленность. 2009. № 4 (34). С.6-12.

5. *Козловский М.Т.* Амальгамы и их применение / М.Т.Козловский, А.И.Зебрева, В.П.Гладышев. Алма-Ата. 1971. 364 с.

6. *Коршунов В.Н.* Современные взгляды на структуру амальгам //Амальгамные системы: строение и электрохимические свойства. М.: Изд-во МГУ. 1990. С. 11-15.

7. *Плаксин И.Н.* Исследование состава и структуры амальгам золота в связи с вопросом о процессе амальгамации золотых руд // Сбор. научных трудов Моск. горн. акад. 1930. С.115-132.

8. *Татауров С.Б.* Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в условиях криолитозоны / М.: Горная книга. 2008. 318 с.

9. Техногенная амальгамация золота в россыпях: физические и химические следствия / В.Л.Шевкаленко, Л.Н.Шокина, В.В.Крячко и др.// Доклады АН СССР. 1991. №1. Т.320. С.197-198.

10. *Шепелев В.В.* К понятию о криолитосфере Земли. Институт мерзлотоведения СО РАН. Якутск, 1997. 72 с

11. *Шестернев Д.М.* Криогенез и ртутьсодержащие соединения в горнопромышленных отвалах / Д.М.Шестернев, С.Б.Татауров. Институт мерзлотоведения СО РАН. Якутск, 2003. 178 с.

12. *Shesternyov D.M.* Exploration of behaviour bridgings of mercury in technogenic rock masses permafrost / D.M.Shesternyov, S.B.Tataurov // Journal of glaciology and geocryology. China, 2004. V.26. P. 275-280.

REFERENCES

1. *Voronkov O.K.* On Forecast of Frost Weathering and Freeze Resistance of Rock on the Territory of USSR / O.K.Voronkov, L.F.Ushakova // Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydrotechnics named after B.E. Vedeneev. V.137. P. 86-92.

2. Regularities in Development of Alluvial Gold Concentrations and Placer Deposits of Gold / Ministry of Geology of USSR, East-Siberian ResearchInstitute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials. Moscow: Nedra, 1985. P. 136.

3. *Karmazin V.V.* Gold Mining in Russia in 19th and 20th Centuries and Advanced Technologies of Environmental Damage Recovery Caused by Gold Mining Practice / V.V.Karmazin, V.P.Myazin, O.I.Rybakova, V.A.Izmalkov, S.B.Tataurov. Moscow, Moscow State Mining Institute. 2000. 40 p.

4. *Karmazin V.V.* Theoretical and Experimental Studies into Segregation-Diffusion Concentration of Gold from Dump Waste Products / V.V.Karmazin, S.B.Tataurov,

N.P.Karmazina, S.N.Rakhimov // Gold Mining Industry. N.4 (34). 2009. P. 6-12.

5. *Kozlovskiy M.T.* Amalgams and their Application / M.T.Kozlovskiy, A.I.Zebreva, V.P.Gladyshev. Alma-Ata, 1971. 364 p.

6. *Korshunov V.N.* Modern Concepts of Amalgam Structures // Amalgam Systems: Composition and Electrochemical Properties, Moscow: Publishing House of the Moscow State University, 1990. P. 11-15.

7. *Plaksin I.N.* Studies of Conposition and Structure of Gold Amalgams as Connected with Gold Ore Amalgamation Processes // Moscow, Proceedings of the Moscow Mining Academy, 1930. P. 115-132.

8. *Tataurov S.B.* Transformation and Processing of Gold-Bearing Raw Materials in Conditions of Permafrost Zone / Moscow: «Gornaya Kniga», 2008. 318 p.

9. Man-Caused Gold Amalgamation in Placer Deposits: Physical and Chemical Consequences / V.L.Shevkalenko, L.N.Shokina, V.V.Kryachko et al. // Reports of USSR Academy of Scientists. 1991. V. 320. N.1. P.197-198.

10. *Shepelev V.V.* On Concept of Permafrost Zone of Earth // Yakutsk: Institute of Permafrost Studies of Siberian Section of RAS, 1997. 72 p.

11. Shesternyov D.M., Tataurov S.B. Cryogenesis and Mercury-Bearing Compounds in Mining Waste Dumps / Yakutsk: Institute of Permafrost Studies of Siberian Section of RAS, 2003. 178p.

12. Shesternyov D.M., Tataurov S.B. Exploration of behaviour bridgings of mercury in technogenic rock masses permafrost / D.M.Shesternyov, S.B.Tataurov // Journal of glaciology and geocryology. China. 2004. V.26. P. 275-280.