



БИЦКИЙ Р.Р. (Институт общей физики имени А.М. Прохорова, Москва, Россия; ООО «Лассард», Обнинск, Россия)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Технический прогресс невозможен без создания новых устройств, количественные и качественные показатели которых кардинально отличаются от известных, что в свою очередь требует новых технологий и материалов. В создании новых материалов все чаще используются редкие и редкоземельные металлы, запасы которых весьма ограничены. Поэтому разработка и внедрение новых способов добычи таких металлов являются своевременной и актуальной задачей.

Рассмотрены перспективные методы добычи полезных ископаемых из вулканических газов. Предложенная модель позволяет выявить состав вулканического газа, экспериментально доказать его динамические свойства, разработать модель, позволяющую проследить поведение газа, на ее основе разработать принципиальную схему извлечения редкоземельных элементов (РЗЭ) и представить аппаратно-технологическую схему получения РЗЭ из фумарол (видов газа) в виде фумарольной металлургической установки.

На базе модельной системы с растворами тяжелых металлов в жидкости показана возможность изучения поведения частиц газа. Подобная модельная система пересчитана на вулканический газ и позволяет интерпретировать результаты для фумарольной металлургической установки (ФМУ), определив критические размеры элементов такой установки (размеры купола, параметры соединительных рукавов).

Ключевые слова: фумаролы, фумарольная металлургическая установка (ФМУ), динамическое рассеяние света, редкоземельные элементы, вулканический газ, комбинационное антистоксовое рассеяние света, ионообменные смолы.

Введение

В настоящее время рынок редких металлов находится в сложном положении. Существует множество новых технологий, которые требуют редких элементов, но так как производство этих элементов очень ограничено, а цена очень высока, такие технологии не имеют возможности быть реализованными, и сейчас во многих областях техники используют аналоги, которые уступают в качестве, но более доступны.

И хотя никто не говорит о том, что миру катастрофически не хватает редких металлов, рынок не трясет от неудовлетворенного спроса – это не значит, что его нет.

Традиционное производство редких металлов осуществляется методом попутной добычи из руд, содержащих необходимый металл в малых концентрациях. Данный метод – это сложный и многоэтапный процесс. Сначала необходимо добыть и перевезти огромное количество слабонасыщенных руд с содержанием 0,5–1 г/т. Потом производится первичный обжиг для удаления ненужных элементов. После этого требуется разогреть концентрированные руды до газо-

образного состояния. И только тогда можно получить необходимый металл. Весь этот процесс требует огромных денежных и ресурсных вложений. Например, чтобы получить 1 т рения, необходимо добыть, перевезти и обработать 1–2 млн т руды.

Однако расход денег и ресурсов – это не самая главная проблема. Суть в том, что объем известных используемых месторождений попросту недостаточен для обеспечения потребностей рынка. Для примера можно привести недавнюю сделку по рению между Чилийской металлургической компанией Molymet и американским производителем авиационных двигателей для гражданской и военной авиации Pratt&Whitney (<http://www.pw.utc.com/News/Story/20140904-0800>) объявленная сумма сделки – \$690 млн. Сейчас мировой запас рения оценивается в 2,4 тыс. т. Объявленная цена за килограмм – \$3000. Нетрудно подсчитать, что Pratt&Whitney одной сделкой выкупили почти 10 % всего мирового запаса рения!

Скорость выработки открытых месторождений редких металлов выше, чем скорость открытия новых месторожде-



ний, что приводит к постепенному истощению разведанных мировых запасов. Также открытые месторождения являются не возобновляемыми, поэтому содержание ресурсов в них уменьшается с каждым годом. Разведка новых месторождений всегда стоит денег и идет медленно [1-6].

В такой ситуации остро встает вопрос разработки и реализации новых способов добычи.

Описание технологии

Применение фумарольных металлургических установок (ФМУ) является новым, но уже апробированным технологическим решением на рынке добычи редких и благородных металлов из вулканических газов. Эта технология дает возможность разрабатывать возобновляемые «месторождения» металлов, что позволяет забыть на некоторое время об использовании традиционных месторождений, которые в итоге истощатся, что приведёт к трате денег и времени на разведку и разработку новых.

Предлагаемая установка использует технологию селекции на ионообменных смолах, что позволяет ей опционально добывать конкретный металл в зависимости от потребностей потребителя в данный момент времени. Авторы готовы предоставить любую ионообменную смолу в зависимости от того, какой конкретно металл актуален в данный момент времени. Таким образом, ФМУ предоставляет возможность разрабатывать многоэлементные месторождения.

В предложенной технологии используется селекция металла на ионообменных смолах, потому что на вершине вулкана, как правило, нет большого количества свободной воды, которая необходима при использовании технологии барботирования газа.

ФМУ не требует большого количества обслуживающего персонала во время стационарной работы и не имеет больших потерь расходного материала – ионообменной смолы.

Исследования вулканов показывают [7–9], что процесс дегазации магмы может происходить стационарно годами, а постоянное отслеживание элементного состава газа позволит заблаговременно узнать о возможном извержении.

Над площадкой интенсивного выделения газов монтируется газосборный купол, из которого газ через соединительный рукав подается в технологический блок. Тут стоит упомянуть, что расчеты процессов коагуляции частиц позволяют нам определить необходимые размеры и параметры ФМУ и концентрацию редкоземельных элементов (РЗЭ), что в свою очередь дает нам возможность улавливать из газа частицы фильтрами Петрянова до первой стадии. Общая схема установки:

В первой секции блока газ проходит через емкость, заполненную сорбентом (цеолит), на поверхности которого кристаллизуются минералы рения, других редких и благородных металлов. Продолжительность одного цикла адсорбции ~2 недели. Во второй секции газ, прошедший через сорбент, охлаждается и образует конденсат, состоящий из смеси серной (H_2SO_4) и соляной (HCl) кислот. В третьей секции сорбент (цеолит), содержащий соединения рения, редких и других металлов, промывают полученным кислотным конденсатом, в котором соединения (соли, сульфиды) рения, редких и благородных металлов растворяются. В четвертой секции этот раствор проходит через колонну, заполненную анионообменной смолой, в которой концентрируются рений и другие редкие и благородные металлы. Полученный концентрат, содержащий не менее 10–15 % рения, вывозится на переработку. Указанная технология успешно опробована на вулкане и защищена патентами, эффективность технологии практически не зависит от объема сорбента. Объем сорбента в опытах изменялся на пять порядков: от 10 г до 300 кг [10–13].



Рис. 1. Принципиальная схема извлечения рения и других РЗЭ из вулканического газа

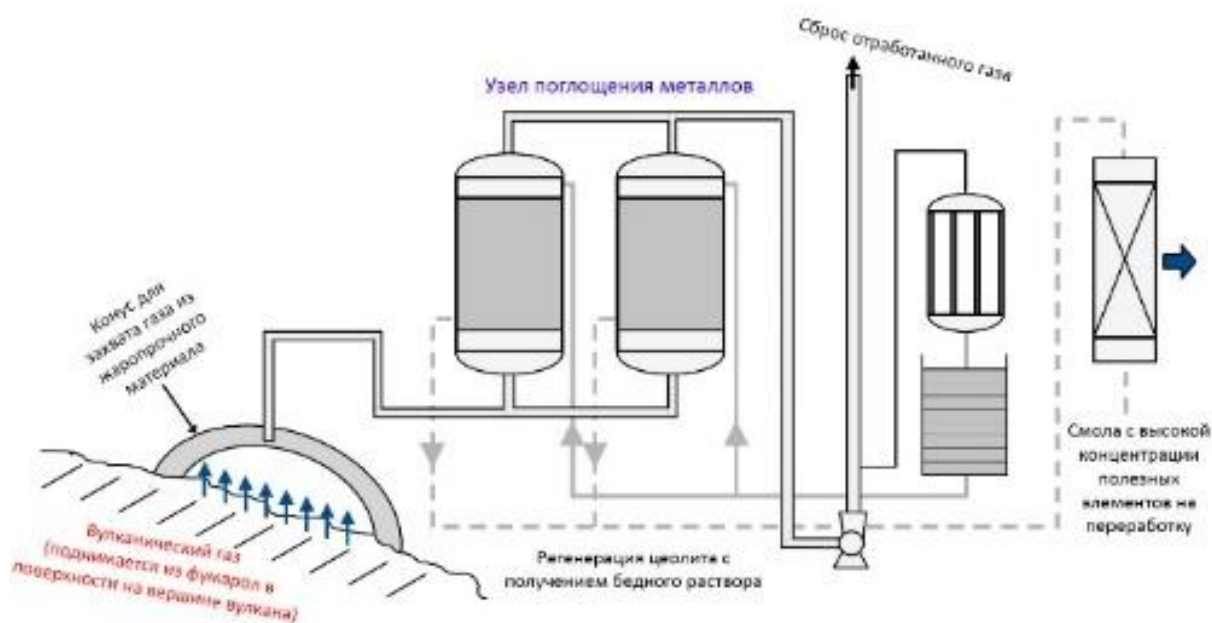


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема получения концентрата рения из фумарол (выходов газа) на вулкане Кудрявый

Метод динамического рассеяния света

Для расчёта параметров установки, как говорилось выше, нужно знать концентрации целевых частиц и скорость их коагуляции, чтобы не допустить выпадения частиц в осадок до сорбента.

Для измерения узких спектров применяются методы оптического смешения [14], сводящиеся к гетеродинированию [15] или к исследованию самобиений

частот рассеянного света. Этот принцип впервые был предложен Г.С. Гореликом в 1947 г. [16] и экспериментально реализован Гумундсенем и Форрестером в 1955 г. [17].

Сущность метода состоит в том, что свет, рассеянный исследуемым участком образца, направляется на фотокатод квадратичного по полю фотоприемника. На катоде возникают биения между различными частотными компонентами



спектра падающего света (автодинного детектирования). При этом освещенность фотокатода и, следовательно, фототок будут промодулированы по амплитуде частотами биений (от нуля до ширины спектра рассеяния).

С помощью используемого в настоящей работе коррелятора накапливается функция корреляции фототока, пропорционального интенсивности рассеянного света, т.е. функция корреляции интенсивности:

$$G^{(2)}(\tau) = \langle I(0)I(\tau) \rangle = g^{(2)}(\tau) \cdot \langle I \rangle^2, \quad (1)$$

где угловые скобки означают усреднение по времени. Эта функция связана с функцией корреляции поля рассеянного света:

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + A |g^{(1)}(\tau)|, \quad (2)$$

а $g^{(1)}$ связана со спектрами преобразования Фурье.

Броуновское движение частиц при рассеянии света приводит к уширению спектра рассеянного света до $\sim 10-10\,000$ Гц.

В случае рассеяния на монодисперсных частицах, взвешенных в жидкости, спектр рассеянного света и спектр фототока, а следовательно, и рассеянного света представляет собой лоренциан, максимум которого, расположен на частоте возбуждающего света с полушириной на полувысоте $\Gamma = Dq^2$, где D – коэффициент диффузии частиц, $\bar{q} = \bar{k}_s - \bar{k}_L$, \bar{k}_s и \bar{k}_L – волновые вектора рассеянного и возбуждающего света [18]:

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + A \cdot \exp(-2\Gamma\tau). \quad (3)$$

Измерив ширину спектра фототока или его корреляционную функцию можно, согласно (3), найти коэффициент диффузии частиц в жидкости, а из него определить радиус из соотношения Стокса-Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}. \quad (4)$$

Зная радиус частицы r , её коэффициент преломления n и интенсивность рассеяния света, можно определить концентрацию частиц, пользуясь приближением Релея-Ганся-Дебая (РГД) [19-20],

$$\frac{I_\theta}{I_L} = \eta_e \frac{k^4 V_p^2 \left| \frac{n_1}{n_2} - 1 \right|^2}{4\pi} \frac{V_{sc}^{90}}{R^2} \times \quad (5)$$

$$\times G^2(\theta) N_p \frac{1}{\sin(\theta)},$$

где I_L – интенсивность возбуждающего лазерного пучка, η_e – квантовая эффективность катода ФЭУ, $k = \frac{4\pi n_2}{\lambda}$ – волновой вектор падающей волны, V_p – объем частицы, V_{sc} – рассеивающий объем, R – расстояние от точки наблюдения до рассеивающего объема, N_p – концентрация частиц, $G^2(\theta)$ – форм-фактор частиц в случае их сферической формы:

$$G^2(\theta) = \frac{9}{(qr)^6} (\sin qr - qr \cos qr)^2, \quad (6)$$

где q – волновой вектор рассеяния:

$$q = \frac{4\pi n_2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}. \quad (7)$$

Сравнив измеренные интенсивности рассеяния в жидкости с известными коэффициентами рассеяния, можно получить абсолютную интенсивность и определить концентрацию частиц [21].

Экспериментальные данные

В эксперименте использовались 3 образца: 2 образца оксида вольфрама (WO), в модельной системе, и 1 оксид рения (ReO₂). Поведение частиц каждого образца изучалось в течение двух дней по 5 ч в каждый с промежутками в 100 с. В течение всего эксперимента мы наблюдали картину, которая не совсем укладывается в классическую теорию коагуляции частиц. Теория коагуляции, по Смолуховскому и Дерягину-Ландау-Фервею-Овербеку [22], описывает процесс постепенного смещения максимума непрерывного распределения концентрации в сторону увеличения радиуса частиц вплоть до выпадения в осадок. В реальной системе наблюдали картину трех устойчивых пиков: 1-й пик приходился на отдельные элементарные частицы радиусом до 60 нм., 2-й пик в промежутке 95–185 нм и 3-й пик – порядка 500 нм и больше.

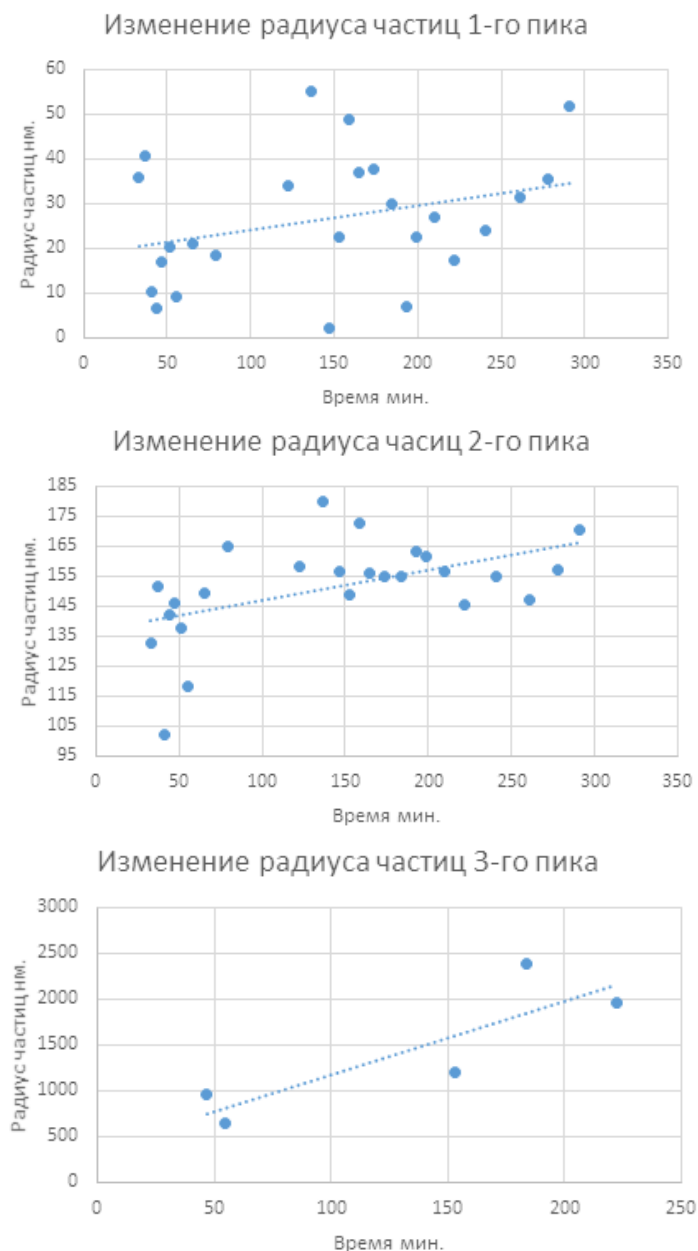


Рис. 3. Изменение радиуса частиц 2-го образца WO

Полученные экспериментальным путем радиусы частиц WO и их зависимость от времени с момента приготовления приведены на рис. 3.

Полная интенсивность рассеянного в том же образце света в зависимости от времени показана на рис. 4.

Программой DinaLS в каждом отдельном измерении была определена для каждого полученного радиуса соответствующая ему интенсивность рассеяния. По этим данным, воспользовавшись сравнением с интенсивностью рассеяния

в толуоле и приближением РГД, мы рассчитали концентрации частиц каждого полученного радиуса и объемную концентрацию C_v оксида, содержащегося в частицах соответствующего радиуса в каждый измеренный момент времени. Все зафиксированные частицы мы разделили на 3 группы: 1-я – до 60 нм, 2-я – от 95 до 185 нм, 3-я – свыше 500 нм. В результате мы имеем представленные на рис. 5 временные зависимости C_v для каждой группы частиц.

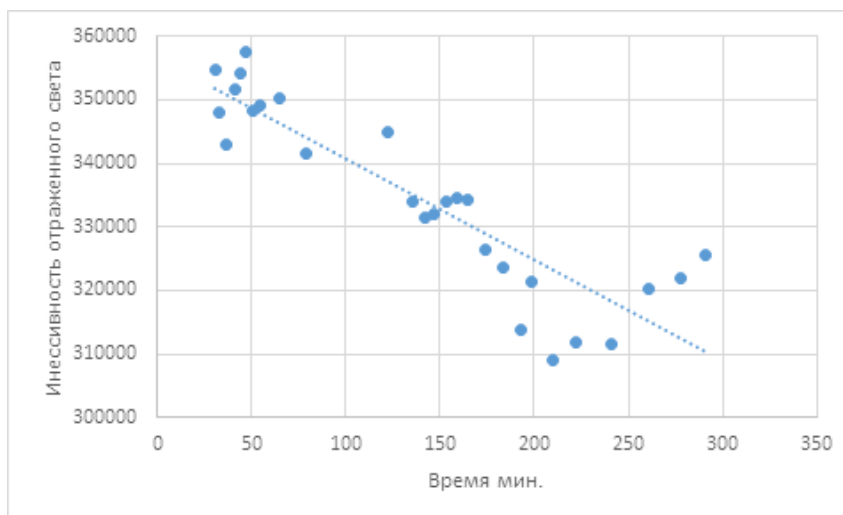


Рис. 4. Изменение интенсивности отраженного света 2-го образца WO

Происходит постепенный спад концентрации оксида в частицах малого и среднего размера и увеличение концентрации оксида в частицах большого размера.

Из полученных графиков мы можем рассчитать скорость коагуляции, то есть скорость, с которой вещество переходит из частиц средних размеров в частицы большего размера:

$$V_{2c} = \frac{dC_2}{dt} = -1,7 \cdot 10^{-13}, \quad (8)$$

$$V_{3c} = \frac{dC_3}{dt} = 4,3 \cdot 10^{-12},$$

где V_{2c} , C_2 и V_{3c} и C_3 – это скорость коагуляции и объемная концентрация оксида в частицах размером от 95 до 185 нм и свыше 500 нм соответственно.

Если это выразить в частицах, то

$$V_2 = \frac{3V_{2c}}{4\pi r_{cp2}^3} = -1,19 \cdot 10^7, \quad (9)$$

$$V_3 = \frac{3V_{3c}}{4\pi r_{cp3}^3} = 8,22 \cdot 10^6,$$

где V_2 и V_3 – это скорость, с которой частицы среднего радиуса 2-го пика r_{cp2} и 3-го пика r_{cp3} покидают объем рассеяния.

Увеличение концентрации оксида в больших частицах меньше, чем уменьшение концентрации в средних частицах, по-видимому, из-за того, что большие частицы начинают выпадать в осадок [23]. Таким образом, под скоростью коагуляции мы будем понимать изменение во времени концентрации вещества, содержащегося в частицах того размера, при котором начинается быстрая, в течение нескольких секунд, седиментация. В нашем случае этот радиус равен 500 нм.

Скорость коагуляции в газе, По Смолуховскому [16], $\sim T/\eta$, тогда:

$$V_{sгаз} = \frac{T_{газ} \eta_{жид}}{T_{жид} \eta_{газ}} V_{sжид} = 700 V_{sжид}. \quad (10)$$

По теории седиментации [15]:

$$V_s = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta}, \quad (11)$$

где V_s – скорость оседания частиц, r – радиус частиц, ρ – плотность вещества, ρ_0 – плотность среды, g – ускорение свободного падения, η – вязкость среды. Подставляя константы для газа [25], получаем $V_{газ} = 1,14 \cdot 10^{-4}$.



Рис. 5. Объемная концентрация оксида WO 2-го образца по радиусам во времени

Из сказанного выше видно, что частицы, достигнув радиуса седиментации, начинают выпадать в осадок со скоростью $\sim 0,1$ мм в секунду. Из рис. 3 можно видеть, что за период времени с 70-й минуты по 200-ю средний радиус частиц 3-го пика вырос вдвое. В пересчете на газ получается, что радиус частиц будет увеличиваться вдвое

каждые 11 с ($t_{2r_{\text{газ}}} = \frac{t_{2r_{\text{жид}}}}{700} = 11,14$), а следовательно, V_s увеличится вчетверо.

Минимальная скорость газа, выходящего из фумарол – 0,2 м/с. Учитывая, что уже через 10 мин после приготовления раствора оксида вольфрама в воде (время первого измерения) мы видели частицы радиуса седиментации, и принимая во внимание формулу (10), мы можем говорить, что менее чем через се-



кунду после подачи в соединительный рукав в газе начнется процесс выпадения в осадок. Радиус соединительного рукава равен 450 мм, следовательно, можно говорить о том, что уже через минуту первые частицы рения выпадут в осадок [24]. Эти данные ограничивают нам расстояние появления первого осадка 12 метрами.

С помощью формулы (8) и полученных данных о начальной концентрации оксида WO в объеме рассеяния мы можем рассчитать время, за которое все частицы скоагулируют до радиуса седиментации в жидкости

$$t_k = \frac{C_0}{V_{2c}} = 88235 .$$

Учитывая формулу (10), нетрудно подсчитать, что время полной коагуляции всех частиц в газе будет 126 с. Это означает, что уже через 3 мин после вылета из вулкана все целевые элементы выпадут в осадок.

Выводы

В данной работе были изучены процессы коагуляции частиц соединений тяжелых металлов. Показаны возможности изучения поведения частиц в газе с помощью модельной системы с растворами тяжелых металлов в жидкости.

Описаны экспериментальные данные, полученные в ходе работы с взвесьми металлов в жидкости. Продемонстрированы изменения основных параметров частиц с течением времени: увеличение характерного радиуса частиц, падение интенсивности рассеянного света, поведение объемной концентрации оксида в объеме рассеяния.

Произведен пересчет модельной системы на вулканический газ. Полученные результаты были интерпретированы для ФМУ. Вычислены критические размеры элементов системы такие как: размер купола, длина соединительных рукавов.

Данную работу необходимо продолжить с целью изучения особенностей процесса осаждения вулканического газа на ионообменных смолах.

Библиографический список

1. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М. *Металлургия рения*. – М.: Наука, 2007.
2. Борисова Л.В., Ермаков А.Н. *Аналитическая химия рения*, 1974.
3. Родзаевский В.В. *Рений: сырьевые ресурсы и технология производства*. – М.: Цветметинформация, 1970.
4. Бочарников Р.Е. *Физико-химические аспекты магматической дегазации на вулкане Кудрявый*. – М.: 2002.
5. *Zeolites in Sedimentary Rocks*. Ch. in *United States Mineral Resources, Professional Paper 820*, 1973.
6. Рябчиков Д., Цитович И. *Ионообменные смолы и их применение*. – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1962.
7. Короновский Н.В., Якушова А.Ф. *Курс лекций «Основы Геологии»: 11.3.4. Поствулканические явления*. М.: Высшая школа, 1991.
8. Коржинский М. А. *Один на один с действующим вулканом*. М.: Наука, 2005.
9. Горшков Г.С. *Вулканизм Курильской островной дуги*. – М., 1967.
10. Коржинский М.А., Бочарников Р.Е., Ткаченко С.И., Жданов Н.Н., Штейнберг Г.С. *Фумарольная активность вулкана Кудрявый в период 1990-1999 гг. Фреатическое извержение 1999 г.* – Т.2. – С. 65-92.
11. Абдурахманов А.И., Пономарев Г.П., Рашидов В.А., Чубурков Ю.Т., Рыбин А.В., Чаплыгин И.В., Асадулин Э.Э. *Перспективы обнаружения новых элементов и фракционирования изотопов в высокотемпературных фумаролах Курило-Камчатской дуги // Тез. 3-ей межд. науч. конф. «Вулканизм и Биосфера»*. Туапсе. – 2003.
12. Чаплыгин А.В. *Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый*. Дисс. ... канд. наук. – М.:, 2009.
13. Pecora R. *Doppler Shifts in Light Scattering from Pure Liquids and Polymer Solutions*, *J. Chem. Phys.*, vol. 40, no. 6, p. 1604, 1964.
14. Камминс Г., Пайк Э. *Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов*. – М.: Мир, 1978, 584 p.
15. Palberg T., Holger R., Koller T., Medebach M., and Gerhard N. *Super-heterodyne light scattering on interacting colloidal suspensions: theory and experiment*, 2008.
16. Горелик Г.С. *О возможности малоинерционного фотометрирования и демодуляционного анализа света*. – ДАН СССР, vol. 57, no. 1, pp. 45–47, 1947.



17. Forrester A.T., Gumundsen R.A. Photoelectric mixing of incoherent light. *Phys. Rev.*, vol. 90, no. 6, pp. 1961–1700, 1995.
18. Clark N.A., Lunachek J.H., Benedek G.B., *American Journal of Physics*, 38(4), 575-585 (1970).
19. Boren P.R., Hafmen K.F., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley. New York, 1983.
20. Van de Hulst H.C. *Light Scattering by Small Particles*. Dover. New York.
21. Фабелинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. – М.: Наука, 1965.
22. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. *Коллоидная химия*. – М.: Издательство Московского Университета, 1982.
23. ZS f phys chem 92 129 1917 «Брауновское движение Эйнштейн Смолуховский список статей» ОНТИ главная редакция общетехнической литературы Ленинград 1936 296стр.
24. Коваленко К. В., Кривохижа С. В., Масалов А. В., Чайков Л. Л. «Краткие сообщения по физике. – М.: ФИАН. – 36(4). – 3 2009.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2017, No. 4, pp. 3-11	
Title:	ADVANCED METHODS FOR THE EXTRACTION OF USEFUL COMPONENTS FROM VOLCANIC GASES
Author 1	<i>Name & Surname:</i> Ruslan R. Bitskiy <i>Company:</i> Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences; LLC "Lassard" <i>Address:</i> 119991, Moscow, Vavilov Str., 38; 249032, Obninsk, Kievskoye Highway, 74
DOI:	10.17073/2500-0632-2017-4-3-11
Abstract:	Technical progress is impossible without the creation of new devices, the quantitative and qualitative indicators of which radically differ from the known ones, which in turn requires new technologies and materials. In the creation of new materials, rare and rare-earth metals are increasingly used, the reserves of which are very limited. Therefore, the development and implementation of new methods of mining such metals are a timely and urgent task. Prospective methods of mining mineral deposits from volcanic gases are considered. The proposed model makes it possible to reveal the composition of volcanic gas, to experimentally prove its dynamic properties, to develop a model that allows one to trace the behavior of gas, on its basis to develop a principle scheme for extracting rare-earth elements (REE) and to present the hardware-technological scheme for obtaining REE from fumaroles (types of gas) in the form fumarolic metallurgical plant. On the basis of a model system with heavy metal solutions in a liquid, the possibility of studying the behavior of gas particles is shown. Such a model system is converted to volcanic gas and allows interpretation of the results for a fumarolic metallurgical unit (FMU) by determining the critical dimensions of the elements of such an installation (dome sizes, parameters of connecting hoses).
Keywords:	<i>fumaroles, fumarolic metallurgical unit (FMU), dynamic light scattering, rare-earth elements, volcanic gas, Raman anti-Stokes scattering, ion-exchange resin</i>
References:	1. Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M. <i>Metallurgija renija [Metallurgy of rhenium]</i> . Moscow, Nauka, 2007. 2. Borisova L.V., Ermakov A.N. <i>Analiticheskaja himija renija [Analytical chemistry of rhenium]</i> . 1974. 3. Rodzaevskij V.V. <i>Renij: syr'evye resursy i tehnologija proizvodstva [Rhenium: raw materials and production technology]</i> . Moscow, Cvetmetinformacija, 1970. 4. Bocharnikov R.E. <i>Fiziko-himicheskie aspekty magmaticheskoy degazacii na vulkane Kudrjavij [Physicochemical aspects of magmatic degassing on Kudryavy volcano]</i> . Moscow. 2002. 5. <i>Zeolites in Sedimentary Rocks. Ch. in United States Mineral Resources</i> , Professional Paper 820, 1973.



6. Rjabchikov D., Citovich I. Ionoobmennye smoly i ih primenenie [*Ion exchange resins and their application*]. Publ. of the Academy of Sciences of the USSR, 1962.
7. Koronovskij N.V., Jakushova A.F.. Kurs lekcij «Osnovy Geologii»: 11.3.4. Postvulkanicheskie javlenija. [*The course of lectures "Fundamentals of Geology": 11.3.4. Post-volcanic phenomena*]. Moscow, Vysshaja shkola, 1991.
8. Korzhinskij M.A. Odin na odin s dejstvujushhim vulkanom [*One on one with an active volcano*]. Moskva, Nauka, 2005.
9. Gorshkov G.S. Vulkanizm Kuril'skoj ostrovnoj dugi [*Volcanism of the Kuril Islands Arc*]. Moscow, 1967.
10. Korzhinskij M.A., Bocharnikov R.E., Tkachenko S.I., Zhdanov N.N., Shtejnberg G.S. Fumarol'naja aktivnost' vulkana Kudrjavij v period 1990-1999 gg. Freaticheskoe izverzhenie 1999g [*The fumarolic activity of Kudryavy volcano in the period 1990-1999. The phreatic eruption of 1999*]. Vol. 2, pp. 65-92.
11. Abdurahmanov A.I., Ponomarev G.P., Rashidov V.A., Chuburkov Ju.T., Rybin A.V., Chaplygin I.V., Asadulin Je.Je. Perspektivy obnaruzhenija novyh jelementov i frakcionirovanija izotopov v vysokotemperaturnyh fumarolah Kurilo-Kamchatskoj dugi [*Prospects for the discovery of new elements and fractionation of isotopes in high-temperature fumaroles of the Kurile-Kamchatka arc*]. Tez. 3-ej mezhd. nauch. konf. "Vulkanizm i Biosfera" [Theses of the Int. 3rd Sci. Conf. "Volcanism and the Biosphere"]. Tuapse, 2003.
12. Chaplygin A.V. Rudnaja mineralizacija vysokotemperaturnyh fumarol vulkana Kudrjavij [*Ore mineralization of high-temperature fumaroles of Kudryavy volcano*] Cand. Tech. Sci. diss., Moscow, 2009.
13. Pecora R. *Doppler Shifts in Light Scattering from Pure Liquids and Polymer Solutions*, J. Chem. Phys., vol. 40, no. 6, p. 1604, 1964.
14. Kammins G., Pajk Je. Spektroskopija opticheskogo smeshenija i korrelyacija fotonov [*Optical mixing spectroscopy and photon correlation*]. Moscow, Mir, 1978, p. 584.
15. Palberg T., Holger R., Koller T., Medebach M., Gerhard N. *Superheterodyne light scattering on interacting colloidal suspensions: theory and experiment*, 2008.
16. Gorelik G.S. O vozmozhnosti maloinercionnogo fotometrirovaniya i demoduljacionnogo analiza sveta [*On the possibility of low-inertia photometry and demodulation analysis of light*]. DAN USSR, 1947, vol. 57, no. 1, pp. 45–47.
17. Forrester A.T., Gumundsen R.A. *Photoelectric mixing of incoherent light*, Phys. Rev., vol. 90, no. 6, pp. 1961–1700, 1995.
18. Clark N.A., Lunachek J.H., Benedek G.B. *American Journal of Physics*, no. 38(4), 575-585 (1970).
19. Boren P.R., Hafmen K.F. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley. New York, 1983.
20. Van de Hulst H.C. *Light Scattering by Small Particles*, Dover. New York.
21. Fabelinskij I.L. Molekuljarnoe rassejanie sveta [*Molecular light scattering*]. Moscow, Nauka, 1965.
22. Shhukin E.D., Percov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaja himija [*Colloid chemistry*]. Moscow, Publ. Moskovskogo Universiteta, 1982.
23. ZS f phys chem 92 129 1917 Braunovskoe dvizhenie Jejnshtejn Smoluhovskij spisok statej [] ONTI glavnaja redakcija obshhetehničeskij literatury Leningrad 1936 296str.
24. Kovalenko K.V., Krivohizha S.V., Masalov A.V., Chajkov L.L. Kratkie soobshhenija po fizike [*Brief communications on physics*]. Moscow, FIAN, 36(4), 3, 2009.