ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОГО ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ (ВЕСЭМПГ-2015)



Москва, 21-22 апреля 2015 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Российская академия наук Отделение наук о Земле

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского (ГЕОХИ РАН)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ РАН)

Российский фонд фундаментальных исследований

ТРУДЫ

ВСЕРОССИЙСКОГО ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ (ВЕСЭМПГ-2015)

Москва, 21-22 апреля 2015 г.



УДК 550.4:550.4.02:550.426:550.3:552.6:523.3:502.1 ББК 26.30 26.31 Т782

Ответственный редактор проф. дгмн А.А.Кадик

ответственного редактора проф. дгмн А.В. Бобров	Ответственный секретарь Т.И.Цехоня				
Редакционная коллегия					
академик Л.Н.Когарко	дгмн О.А.Луканин				
члкорр. дхн О.Л.Кусков	дхн Е.Г.Осадчий				

чл.-корр. дхн О.Л.Кусков чл.-корр. дгмн Ю.Б.Шаповалов проф., дгмн А.А.Арискин дгмн А.Р. Котельников проф. дхн Ю.А.Литвин

Заместитель

дгмн О.А.Луканин дхн Е.Г.Осадчий дгмн Ю.Н.Пальянов дхн Б.Н.Рыженко дгмн.О.Г.Сафонов кгмн О.И.Яковлев

Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Москва, 21–22 апреля 2015 года. /Отв. редактор А.А.Кадик, - М: ГЕОХИ РАН, 2015, 426 с. ISBN 978-5-905049-11-8.

Представлены краткие статьи по материалам докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2015 года с описанием результатов оригинальных научных исследований, новых методов и идей, ориентированных на практическое решение широкого спектра проблем современной экспериментальной геохимии.

Editor-in-Chief prof. Dr of GeolMin. Sci. A.A.Kadik						
Editor-in-Chief	Secretary					
Prof. Dr of GeolMin. Sci. A.V. Bobrov	T.I.Tsekhonya					
Editorial Board						
Academician, Dr of GeolMin.Sci. L.N. Kogarko	Dr of Chem.Sci. Eu.G.Osadchii					
Corr.memb, Dr of Chem.Sci. O.L. Kuskov	Dr of GeolMin.Sci. Yu.N.Pal'yanov					
Corr.memb, Dr of GeolMin.Sci. Yu.B.Shapovalov	Dr of Chem.Sci. B.N.Ryzhenko					
Prof., Dr of GeolMin.Sci. A.A.Ariskin	Dr of GeolMin.Sci. O.G.Safonov					
Prof., Dr of GeolMin.Sci. A.R.Kotel'nikov	Cand.of GeolMin.Sci. O.I.Yakovlev					
Prof., Dr of Chem.Sci. Yu.A.Litvin						

Proceedings of Russian Anual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Moscow, 2015 April 21–22. / Ed. A.A.Kadik, M.: GEOKHI RAS, 2015, 426 p. ISBN 978-5-905049-11-8.

The results of original research, new methods and idea focused on practiciable decides of wide specra of problems of modern experimental geochemistry are presented in short papers on materials of Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology, and Geochemistry 2015.

ISBN 978-5-905049-11-8

Dr of Geol.-Min.Sci. O.A.Lukanin

© Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), 2015

УДК 546.185

Синтез и изучение La-содержащих цирконийфосфатов лангбейнитового типа в гидротермальных условиях

К.В. Мартынов¹, Г.М. Ахмеджанова², А.Н. Некрасов², А.Р. Котельников²

¹Институт физической химии и электроники им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва ²Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

Аннотация. В гидротермальных условиях при температуре 200°С и автоклавном давлении 1.55 МПа синтезированы цирконийфосфаты структурного типа лангбейнита: $({}^{XII}MI)({}^{IX}M2)_3\{({}^{VI}L1)({}^{VI}L2)({}^{IV}PO_4)_3\}$, кубическая ячейка, пространственная группа $P2_13$, Z=4, содержащие щелочные металлы (Me=Na, K, Cs) и La в качестве катионов-компенсаторов заряда каркаса. Показано, что La распределялся между каркасными (L) и внекаркасными (M) структурными позициями в соотношении 1:2/3. Определены коэффициенты распределения компонентов между цирконийфосфатными лангбейнитами и нитратными водными растворами. Установлено, что для пар щелочных металлов коэффициенты распределения уменьшаются в ряду Kd_{Na/Cs}>Kd_{Na/K}>Kd_{K/Cs}>1, а в парах Me/La – в ряду Kd_{Na/La}>Kd_{K/La}>Kd_{Cs/La}>1, что соответствует уменьшению разницы эффективных ионных радиусов катионных пар.

Ключевые слова: цирконийфосфаты, структурный тип лангбейнита, изоморфные замещения, гидротермальный синтез, катионный обмен, коэффициент распределения.

Ранее мы сообщали о результатах синтеза и изучения свойств цирконийфосфатов структурного типа коснарита, как потенциального матричного материала для иммобилизации радионуклидов [Мартынов, 2014₁]. Другим типом структуры, в котором могут кристаллизоваться сложные ортофосфаты, является структура лангбейнита. Минерал лангбейнит относится к классу сульфатов – $K_2Mg_2(SO_4)_3$ и кристаллизуется в кубической сингонии (пр. гр. $P2_13$, Z=4). Как и у коснарита, основой каркаса лангбейнитовой структуры служат элементы, состоящие из двух октаэдров LO_6 соединенные через вершинные атомы кислорода тремя тетраэдрами TO_4 . Группы $[L_2(TO_4)_3]^{n-}$ образуют трехмерный каркас с зарядом *n*-, при этом в отличие от коснарита колонки октаэдров LO_6 ориентированы не вдоль оси третьего порядка *c*, а вдоль четырех непересекающихся направлений параллельных пространственным диагоналям куба (рис. 1). Другим отличием от коснарита является наличие в лангбейните двух чередующихся неэквивалентных октаэдрических позиций, которые занимают, обычно, два разных катиона [Орлова, 2005].

Кристаллохимическую формулу ортофосфатов изоструктурных лангбейниту можно представить как

$(^{XII}M1)(^{IX}M2)_{3}\{(^{VI}L1)(^{VI}L2)(^{IV}PO_{4})_{3}\},\$

где ^{VI}L – октаэдрически координированные катионы с зарядом n = +2 - +5: Mg, Co, Ni, Al, Fe, Cr, Ti³⁺, Rh, P3Э, Ti⁴⁺, Zr, Nb и др. Полости каркаса ^{XII}M1 и ^{IX}M2 могут быть частично вакантны (\Box) или заняты катионами с зарядом n = +1 - +3, например: Na, K, Cs, NH₄, Sr, Ba, P3Э и др. Изоморфные замещения в лангбейнитовой структуре осуществляются в основном по тому же принципу, что и в коснаритах [Мартынов, 2014₂], но есть и отличия. Каркас лангбейнита, как правило, имеет больший заряд, чем каркас коснарита. «Нормой» для этих структур являются заряды каркаса -2 и -1 соответственно. При изоморфных замещениях каркасообразующих катионов они могут уменьшаться вплоть до -1 и 0, или увеличиваться до -4 и -3. Этот факт определяет более полное заполнение внекаркасных позиций в лангбейните, которых также две, как и у коснарита. Отсутствие либо небольшое количество вакансий в лангбейните диктует более жесткие условия для изоморфных замещений. Для сохранения структуры становится обязательным соблюдение разницы эффективных ионных радиусов каркасообразующих и внекаркасных катионов в диапазоне 0.56-1.11 Å [Орлова, 2011]. Размеры полостей структуры лангбейнита больше, чем у коснарита, что коррелирует с более высокими координационными числами катионов в позициях *M1* и *M2* лангбейнита: 12 и 9 соответственно. Следовательно,

формально их легче могут занимать более крупные катионы, например цезий или РЗЭ. Однако, окна, соединяющие структурные полости в лангбейните намного меньше, чем в коснарите. Это объясняет более низкую электропроводность фосфатов одновалентных элементов со структурой лангбейнита по сравнению с соединениями NaSICon имеющими коснаритовую структуру [Isasi, 2000].



Рис. 1. Фрагмент структуры соединения $Cs_2Mg_{0.5}Zr_{1.5}(PO_4)_3$ с лангбейнитовой ячейкой по данным [Орлова, 2005].



Рис. 2. Экспериментально изученные (жирные линии) и рассчитанные (тонкие линии) сечения Na-K-Cs-La-цирконийфосфатов.

Отмеченные специфические особенности лангбейнитовой структуры теоретически должны ограничивать для ее носителей способность к изоморфным замещениям, особенно посредством катионного обмена. Цель нашей работы заключалась в экспериментальной проверке того, насколько существенны эти ограничения, и в какой мере можно использовать цирконийфосфатов с лангбейнитовой структурой для изоморфизм иммобилизации радионуклидов. Для этого гидротермальным методом были синтезированы цирконийфосфаты лангбейнитового типа содержащие щелочные металлы (Me=Na, K, Cs) и La в качестве катионов-компенсаторов заряда каркаса и определены коэффициенты распределения компонентов между кристаллическими фазами и нитратными водными растворами. Гидротермальные эксперименты проводили при температуре 200°С и автоклавном давлении 1.55 МПа. Методики синтеза лангбейнитовых цирконийфосфатов, изучения катионообменных равновесий (распределения компонентов) с водными растворами и исследования продуктов опытов были аналогичны тем, которые мы использовали для коснарита [Мартынов, 2014₁]. Отличие при подготовке исходных ксерогелей заключалось в том, что золь перед упариванием нейтрализовали 25% аммиачной водой до значения pH=7-8. Для катионообменных опытов использовали смеси 1 моль/л азотнокислых растворов щелочных металлов и 0.33 моль/л раствора La(NO₃)₃. Содержание элементов в закалочных растворах после опытов определяли методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Perkin Elmer Elan-6100) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Perkin-Elmer Optima-4300 DV), а содержание щелочных металлов - также атомно-эмиссионной спектрометрии с пламенной атомизацией (КОРТЭК КВАНТ-2А).

компонентов Распределение изучали бинарных сечениях В краевых четырехкомпонентной системы Na-K-Cs-La (рис. 2). В тексте и на рисунках сечения и соответствующие им твердые растворы обозначены символами, где первые два химических элемента означают пару внекаркасных катионов. Для изовалентных сечений межфазовое распределение катионов описывается аналогично обмену водных растворов с коснаритом [Мартынов, 2014₁]. Для гетеровалентных сечений Ме/La катионный обмен внекаркасными компонентами дополняется замещением части Zr на La в позиции L каркаса. Для того чтобы понять, как распределяется между структурными позициями La, занимающий позицию M совместно со щелочными катионами, а позицию L – совместно с Zr, необходимо проанализировать соотношение содержаний этих элементов в синтезированных лангбейнитах (рис. 3). Предельное содержание La близко к 1²/₃ ф.е. При этом происходит замещение 1 ф.е. Na и 1 ф.е. Zr. Постепенное изменение содержания La и замещаемых им Na и Zr свидетельствует о неупорядоченном характере распределения катионов (La/Me, La/Zr) в пределах одной позиции.

Такое соотношение катионов при замещении хорошо описывается бинарным твердым раствором

$$Me_{1-x}La_{5x/3}Zr_{2-x}(PO_4)_{3,3}$$

где X=0-1, и суммой реакций катионного обмена и замещения:

$$Me_M^+ + Zr_L^{4+} = 2/3 La_M^+ + La_L^+ + 1/3 \Box_M$$

или в терминах химических реакций:

$$MeZr_2(PO_4)_3 + 5/3 La^{3+} = La_{5/3}Zr(PO_4)_3 + Me^+ + Zr^{4+}.$$

Мольные доли La в твердой фазе (X_{ss}) и водном растворе (X_{fl}) выражаются как

 $X_{ss/fl}=3\cdot[La]/(3\cdot[La]+5\cdot[Me]),$

где [La] и [Me] – атомные концентрации лантана и щелочного металла в соответствующей фазе. Коэффициенты межфазового распределения определяются как

$$Kd = [X_{ss} \cdot (1 - X_{fl})] / [(1 - X_{ss}) \cdot (X_{fl})^{5/3}].$$



Рис. 3. Содержание элементов в синтезированных (Na,K)-La-цирконийфосфатных лангбейнитах по результатам РСМА (СЭМ Tescan Vega II XMU с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments INCAx-sight); ф.е. – формульные единицы.

Экспериментальные данные были получены для двух изовалентных (NaCsZP и KCsZP) и двух гетеровалентных (NaLaZP и KLaZP) сечений (рис. 4). Для обработки экспериментальных данных был применен метод анализа зависимости lnKd от составов сосуществующих фаз описанный в [Мартынов, 2014₁]. Для расчета термодинамических параметров смешения твердых растворов использовали соотношения:

$$\Delta G^0 = -R \cdot T \cdot (2 C_0 + C_1)/2$$
 и W = R · T · C_1/2,

где С₀ и С₁ – коэффициенты полинома

$$\ln Kd = C_0 + C_1 \cdot X$$
,

W – параметр модели смешения, ΔG^0 – свободная энергия Гиббса (изотермо-изобарический потенциал) соответствующей реакции, R – универсальная газовая постоянная, T – температура в К. Для сложных гетеровалентных реакций обмена и замещения в парах Me/La параметр ΔG^0 носит формальный характер, так как запись суммы этих реакций сама по себе формализована. Его значения приводятся для понимания направления смещения результирующих равновесий, описывающих межфазовое распределение компонентов. Коэффициенты полиномов для зависимостей lnKd от состава твердых фаз, определяли из экспериментальных данных методом линейной регрессии. Значения найденных термодинамических параметров представлены в табл. 1, а кривые аппроксимирующие экспериментальные данные – на рис. 4.

Термодинамические параметры для сечений, не изучавшихся экспериментально (NaKZP и CsLaZP), рассчитывали исходя из соотношений:

$$\begin{split} & lnKd_{NaKZP} = lnKd_{NaCsZP} - lnKd_{KCsZP}, \\ & lnKd_{NaKZP} = lnKd_{NaLaZP} - lnKd_{KLaZP}, \\ & lnKd_{CsLaZP} = lnKd_{NaLaZP} - lnKd_{NaCsZP}, \\ & lnKd_{CsLaZP} = lnKd_{KLaZP} - lnKd_{KCsZP}. \end{split}$$

По каждой паре уравнений полученные значения усредняли. Результаты этих расчетов также приведены в табл. 1, а расчетные кривые межфазового распределения катионов и зависимости lnKd от составов лангбейнита показаны на рис. 4.



Рис. 4. Диаграммы межфазового распределения (вверху) и зависимости lnKd от состава твердых растворов (внизу) для распределения элементов между цирконийфосфатами структурного типа лангбейнита и 0.33-1М нитратными водными растворами при температуре 200°С. Символы – экспериментальные, линии – аппроксимирующие и расчетные данные.

Таблица 1. Значения свободной энергии Гиббса реакций обмена и замещения и параметры модели энергии смешения твердых растворов цирконийфосфатов лангбейнитовой структуры при температуре 200°С. ^{*} – сечения, изученные экспериментально

Сечение	NaCsZP*	KCsZP*	NaKZP	NaLaZP [*]	KLaZP [*]	CsLaZP
ΔG^0 , кДж/моль	-14.11	-2.98	-10.28	-25.14	-15.71	-11.89
W, кДж/моль	-2.06	-7.26	3.26	-9.06	-10.37	-5.06

Из анализа рассчитанных термодинамических параметров (табл. 1) следуют два вывода. Во-первых, отрицательные значения величин ΔG^0 свидетельствуют о смещении равновесий во всех бинарных сечениях изученной системы в сторону обогащения твердой фазы более тяжелым катионом по сравнению с водным раствором (Kd>1). Во-вторых, судя по параметрам

модели смешения, все твердые растворы, кроме NaKZP, имеют отрицательное отклонение от идеальности, то есть проявляют высокую устойчивость к распаду и фазовым переходам. Твердый раствор NaKZP, несмотря на положительное отклонение от идеальности, при температуре 200°C также сохраняет отрицательные значения свободной энергии смешения и устойчивость во всем диапазоне составов. Наши эксперименты показали, что, несмотря на особенности лангбейнитовой структуры, ограничивающие для ее носителей способность к изоморфным замещениям, на практике даже при гетеровалентных замещениях в цирконийфосфатах, принципиальных препятствий не наблюдалось. Вероятно, это объясняется тем, что такие замещения происходили не в результате катионного обмена, а в результате перекристаллизации твердых фаз, сопровождавшейся перераспределением катионов между каркасными и внекаркасными позициями. Более жестко детерминированная структура лангбейнитовых цирконийфосфатов приводит к тому, что для них более явно, чем для коснаритовых аналогов, выражены связи величин Kd с кристаллохимическими параметрами, в частности, с разницей эффективных ионных радиусов катионов в обменных парах. Ряд понижения Kd для пар щелочных металлов: Kd_{Na/Cs}≥Kd_{Na/K}>Kd_{K/Cs}≥1 и для пар Me/La: $Kd_{Na/La} > Kd_{K/La} > Kd_{Cs/La} > 1$, строго соответствует уменьшению этой разницы.

Как и предполагалось, исходя из размеров внекаркасных полостей, лангбейнитовые цирконийфосфаты имеют склонность к извлечению крупных катионов из водных растворов, в рассматриваемом случае – это катионы Cs^+ и La^{3+} . Это свойство может быть использовано для селективного извлечения этих нуклидов на фоне Na. Для характеристики степени извлечения обычно используют коэффициент разделения (α), который равен отношению коэффициентов распределения в двух однокомпонентных системах с катионами N и M:

$$\alpha^{N/M} = [N_{ss}]/[N_{fl}] \times [M_{fl}]/[M_{ss}].$$

Для двухкомпонентной системы с изовалентными катионами (щелочными металлами) это соотношение можно записать в виде:

$$\alpha^{\text{Me2/Me1}} = X^{\text{Me2}}_{\text{ss}}/X^{\text{Me2}}_{\text{fl}} \times (1 - X^{\text{Me2}}_{\text{fl}})/(1 - X^{\text{Me2}}_{\text{ss}}) = \text{Kd}.$$

Для гетеровалентного катионного обмена с замещением в парах Me/La оно преобразуется в следующее:

$$\alpha^{La/Me} = X_{ss}^{La} / X_{fl}^{La} \times (1 - X_{fl}^{La}) / (1 - X_{ss}^{La}) = Kd \times (X_{fl}^{La})^{2/3}.$$

В соответствии с этими определениями и полученными экспериментальными результатами лангбейнитовые цирконийфосфаты могут извлекать Cs из Na-Cs водных растворов в диапазоне составов X^{Cs}_{fl} =0.02-0.04 в твердую фазу, имеющую X^{Cs}_{ss} =0.4-0.6 с коэффициентом разделения $\alpha^{Cs/Na}$ =40-32, и La – из Na-La водных растворов в диапазоне составов X^{La}_{nf} =0.01-0.03 в твердую фазу, имеющую X^{La}_{ss} =0.4-0.6 с коэффициентом разделения $\alpha^{La/Na}$ =52-41. Такие коэффициенты разделения и содержания извлекаемых элементов в сорбентах недостаточны для эффективной химической технологии разделения, но вполне приемлемы для извлечения радионуклидов с целью их иммобилизации в кристаллические матричные материалы.

Таким образом, полученные результаты показали, что цирконийфосфаты лангбейнитового типа могут быть использованы для извлечения элементов РАО, особенно крупных катионов, из водных растворов, и их иммобилизации в форме изоморфных компонентов кристаллической матрицы.

Литература

Мартынов К.В., Ахмеджанова Г.М., Котельников А.Р. и др. 2014₁. Влияние замещения фосфора на кремний в коснарите на его кристаллохимические и катионообменные свойства. Экспериментальная геохимия. Т. 2. № 4. С. 460-465.

http://exp-geochem.ru/JPdf/2014/04/Martynov01_rus.pdf

- Орлова А.И., Орлова В.А., Бескровный А.И. и др. 2005. Синтез и структурное исследование фосфатов K₂Mg_{0.5}Zr_{1.5}(PO₄)₃, Rb₂Mg_{0.5}Zr_{1.5}(PO₄)₃, Cs₂Mg_{0.5}Zr_{1.5}(PO₄)₃ со структурой минерала лангбейнита. *Кристаллография*. Т. 50. № 5. С. 820-826.
- Мартынов К.В., Лапицкая Т.С., Тананаев И.Г. 2014₂. Влияние гетеровалентных замещений на параметры и объем кристаллической ячейки синтетических аналогов коснарита.

Кристаллохимия, рентгенография и спектроскопия минералов – 2014. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. С. 111-113.

- Орлова А.И., Корытцева А.К., Логинова Е.Е. 2011. Семейство фосфатов со структурой лангбейнита. Кристаллохимический аспект иммобилизации радиоактивных отходов. *Радиохимия.* Т. 53. № 1. С. 48-57.
- Isasi J., Daidouh A. 2000. Synthesis, structure and conductivity study of new monovalent phosphates with the langbeinite structure. *Solid State Ionics*. Vol. 133. P. 303–313.

Synthesis and studying of La-containing langbeinite-type zirconium phosphates under hydrothermal conditions

K.V. Martynov¹, G.M. Akhmedjanova², A.N. Nekrasov², A.R. Kotelnikov² ¹*A.N. Frumkin Institutee of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow* ²*Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka Moscow district*

Abstract. The zirconium phosphates of langbeinite structural type: $(^{XII}M1)(^{IX}M2)_3\{(^{VI}L1)(^{VI}L2)(^{IV}PO_4)_3\}$, cubic cell, space group $P2_13$, Z=4, containing alkaline metals (Me=Na, K, Cs) and La as charge-compensating cations, were synthesized under hydrothermal conditions at a temperature 200°C and autoclave pressure of 1.55 MPa. It was shown that La was distributed between frame (L) and extra frame (M) structural positions in the ratio 1:2/3. The distribution coefficients of the components between zirconium phosphate langbeinites and nitrate water solutions were defined. It was established that for couples of alkaline metals the distribution coefficients decrease among Kd_{Na/Cs}≥Kd_{Na/K}>Kd_{K/Cs}≥1. It corresponds to reduction of an effective ionic radii difference of the cationic couples.

Keywords: zirconium phosphates, langbeinite structural type, isomorphic replacements, hydrothermal synthesis, cationic exchange, distribution coefficient.

Сведения об авторах

Мартынов Константин Валентинович; канд. геол.-мин. наук; Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН; 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, 31, корп. 4; 8(495) 335 20 30; mark0s@mail.ru

Ахмеджанова Галина Мамаджановна; Институт экспериментальной минералогии РАН; 142432 г. Черноголовка, Ул. Ак. Осипьяна, д.4; 8(496) 522 58 57; akhm@iem.ac.ru

Некрасов Алексей Николаевич; Институт экспериментальной минералогии РАН; 142432 г. Черноголовка, Ул. Ак. Осипьяна, д.4; 8(496) 522 54 45; alex@iem.ac.ru

Котельников Алексей Рэдович; док. геол.-мин. наук; Институт экспериментальной минералогии РАН; 142432 г. Черноголовка, Ул. Ак. Осипьяна , д.4; 8(496) 522 58 57; kotelnik@iem.ac.ru