

ҚР ҰҒА-ның Хабарлары. Геологиялық сериясы. Известия НАН РК.  
Серия геологическая. 2010. №3. С. 115–121

УДК 549

Г.К. БЕКЕНОВА<sup>1</sup>

## ОТ МАКРО- И МИКРО- К НАНОМИНЕРАЛОГИИ

Тәжірибе жынтығы, зертханалық инфрақұрлым мен кәсіби мамандар К.И. Сәтбаев атындағы Геологиялық ғылымдар институтына табиғи микро- және нанозаттектер саласын зерттеудегі Қазақстандағы жетекші ғылыми мекеме болып қалуына мүмкіндік береді.

Накопленный опыт, лабораторная инфраструктура и квалифицированные кадры позволяют Институту геологических наук им. К.И. Сатпаева оставаться ведущим научным учреждением Казахстана в области исследований природного микро- и нановещества.

To due the experience, laboratory infrastructure and professional specialists the Satpaev Institute of Geological Sciences is leading scientific centre of the Republic of Kazakhstan in micro- and nanomineralogy.

Лаборатория микро- и наноминералогии унаследовала лучшие традиции, заложенные К.И. Сатпаевым и её корни уходят в 50-60-е годы прошлого века, когда в Институте сформировались сильные металлогеническая, стратиграфическая и минералогическая школы. У истоков последней стояли Б.И. Вейц и Т.А. Сатпаева. В то время инструментами минералога были оптическая микроскопия, микрохимия и спектральный анализ, что позволяло диагностировать и изучать зёрна минералов и микровключения размером, в лучшем случае, в несколько микрометров. Этого было явно недостаточно для точной диагностики и определения парагенезиса минералов. На ряд актуальных вопросов, касающихся генезиса отдельных месторождений, а также форм нахождения в них полезных компонентов, ответ не мог быть получен на существовавшем уровне.

В конце 50-х годов у руководства Института сформировалось понимание того, что для минералогических исследований на современном уровне необходимо создание мощной аналитической базы. В результате усилий, предпринятых в те годы директором Института академиком К.И. Сатпаевым, началось приобретение из различных источников современного, самого лучшего на то время, лабораторного оборудования, в том числе и импортного. Это совпало с окончанием строи-

тельства нынешнего здания Института (1961 г.), в проекте которого уже были предусмотрены помещения со всей лабораторной инфраструктурой, полностью оснащённые и готовые для установки крупных прецизионных приборов. Одновременно для грамотной эксплуатации оборудования осуществлялся приём в Институт на работу лучших выпускников вузов республики различных специальностей, в основном физиков.

На первоначальном этапе оборудование концентрировалось в секторе литологии (рук. П.Т. Тажибаева). Были приобретены в конце 50-х годов рентгеновские установки УРС 60, УРС 70 и ДРОН 0,5, просвечивающий электронный микроскоп УЭМБ 100, позднее, в 1964-м году уникальный в то время японский электронно-зондовый микронализатор JXA-3A, английский рентгенфлюоресцентный спектрометр Sollartron, а также мощные австрийские универсальные оптические микроскопы Reichert. В 1970-м был приобретён японский просвечивающий электронный микроскоп JEM 7A и отечественный ЭМ 100Л, а в 1972-м - электронограф ЭР 100.

В 80-ые годы было осуществлено практический полное обновление оборудования. Были приобретены: японский электронно-зондовый микронализатор Superprobe 733, просвечивающие электронные микроскопы: японский - JEM 100CX и отечественный - ЭМ-125K, растровый

<sup>1</sup> Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69<sup>а</sup>, Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева.

электронный микроскоп РЭМ-100У, электронограф ЭМР-100М, рентгеновские дифрактометры ДРОН-2 и ДРОН-4, дериватографы Q-1500D, Q-1000 и другие приборы.

В 1969 году после ряда реорганизаций из сектора литологии была выделена и вошла в состав сектора спектрскопических исследований (рук. С.К. Калинин) лаборатория оптических методов исследования (рук. Марзуванов В.Л.), в которую были переданы JXA-3A, JEM 7A, оптические микроскопы и установка микроспектрального анализа. Лаборатория была ориентирована на исследование руд, в то время как за сектором литологии осталось изучение осадочных пород. В 1976-м году лаборатория была переименована в лабораторию электронно-оптических методов исследования руд и руководителем была назначена М.К. Сатпаева, в 1977-м году руководителем стал Е.А. Косяк, а в 1982-м - А.Д. Каипов. С 1982-го по 1985-й руководил В.Л. Левин, а затем его сменил А.Т. Тельгузиев. В 1987-м лаборатория вошла в состав лаборатории благородных металлов (рук. В.Н. Матвиенко), которая просуществовала до 1992 года.

После сокращения в 90-е годы оставшиеся сотрудники лаборатории литологии и группы электронно-оптических методов исследований руд были введены в состав лаборатории физических и химических методов исследований. В 2008 г. в рамках этой лаборатории из переведенных сотрудников была создана группа микро- и наноминералогии, а в 2010 году ей был придан статус лаборатории.

Основной задачей аналитических подразделений являлось обеспечение тематики Института достаточным количеством анализов. Кроме того большинство сотрудников постоянно занимались методическими разработками, направленными на усовершенствование имеющихся методик анализа применительно к конкретным объектам. Так, например, М.К. Сатпаевой удалось изучить методом просвечивающей электронной микроскопии уникальный рениевый минерал джезказганит, установить наноразмерность его выделений и указать причины его потерь в технологическом процессе. А.П. Слюсарев разработал методику анализа легкотравящихся минералов серебра. Е.А. Косяк разработал методики измерения микротвердости анизотропных минералов и определения термоаналитических характеристи-

тик микроминералов. Им установлена природа аномального борнита и определён химический состав джезказганита. А.Г. Каймирасовой удалось изучить тонкодисперсные выделения золота на месторождении Бакырчик; В.Н. Матвиенко по результатам изучения форм нахождения золота разработана методика извлечения металла на золоторудных месторождениях Казахстана. Ф.А. Курмакаева и Г.К. Бекенова изучили дисперсные водные ванадаты из черносланцевых толщ Каратау комплексом методов, что привело к открытию ряда новых минералов. В.Л. Левин, изучив минералы системы медь-серы и ассоциирующий с ними розовый борнит, установил причины их неверной диагностики. Сотрудники лаборатории литологии занимались изучением кристаллохимических особенностей глинистых минералов.

Новое время выдвигает новые задачи. Представления о формах организации природного вещества наnanoуровне радикально отличаются от известных ранее, основанных на макроуровне. Изучение морфоструктурных и физико-химических особенностей нановещества носит фундаментальный мультидисциплинарный характер, что определяется последними достижениями отраслей науки и требует разработки новых подходов к анализу нановещества.

В Институте исследованиям природного вещества на микро- и наноразмерном уровне всегда уделялось особое внимание. Наиболее полно соответствуют современному уровню представлений и терминологии о кластерах и нановеществе работы и публикации В.Н. Матвиенко с коллегами о наноминеральных формах золота, а также результаты исследований А.Н. Эсминцева по фуллеренам и тубуленам района Текели. В других работах, проведенных во второй половине прошлого века, были получены основные данные для идентификации наноминеральных форм вещества. В рудах – это работы М.К. Сатпаевой, Н.М. Митряевой, З.Н. Павловой, А.В. Степанова, Н.Л. Раденко и др.; в углеродистом веществе – Г.Б. Паталахи, Л.Г. Марченко; в глинах – работы сотрудников лаборатории литологии под руководством П.Т. Тажибаевой и др. Результаты предыдущих работ сотрудников лаборатории представлены в свидетельствах на открытия новых минеральных видов, многочисленных отчетах (Матвиенко, Паталаха), актах внедрения и



Научные сотрудники лаборатории Левин В.Л. и Котельников П.Е.  
за работой на микрозонде

рекомендациях (Раденко), публикуемых статьях и монографиях.

Ввиду важности проблем приоритетного научного направления в Казахстане «Развитие науки и нанотехнологий в Республике Казахстан» и объема предстоящих работ в исследовании природного микро- и нановещества в структуре Института в 2010-м году была создана лаборатория микро- и наноминералогии. Изучением минерального состава пород и руд месторождений Казахстана в ней занимаются специалисты различных направлений: к.ф.-м.н. Слюсарев А.П. (рентгеновский анализ), д.г.-м.н. Бекенова Г.К. (микроминералогия, электронография) и к.г.-м.н. Саматов И.Б. (термический анализ). К.г.-м.н. В.Л. Левин и П.Е. Котельников определяют состав минералов методом рентгеноспектрального микроанализа, а к.х.н. Т.А. Шабанова изучает морфологию и структуру минералов методами просвечивающей электронной микроскопии. В.А. Глаголев (геология, металлогения) изучает анишлифы и осуществляет макро- и микрофотосъемку образцов. В лаборатории во главе с д.т.н. Ю.П. Ерёминым создана технологическая группа, разрабатывающая теоретические основы

и пионерные технологии псевдокавитационной селективной флотации природных и образующихся в процессе рудоподготовки микро- и нанодисперсий минералов на примере глобулярно- и эмульсионноврапленных руд свинцово-цинковых месторождений Акжал и Шалкия.

В настоящее время сотрудниками лаборатории проводятся работы по Программе фундаментальных исследований (ПФИ) (2009-2011 гг.) комитета науки Министерства образования и науки РК по двум темам: «Изучить на микро- иnanoуровне формы нахождения в рудах редких, благородных и рассеянных элементов» и «Исследование особенностей технологической минералогии, термодинамических свойств и квантово-химический расчет структурных характеристик сульфидных и окисленных минералов». Конечной задачей исследовательской работы является разработка научных основ новых технологических процессов в целях повышения извлечения полезных компонентов из «неизвлекаемой» части тонкодисперсной минеральной составляющей руд. Исследования позволят создать базу данных по слабоизученным или пока неизвестным микро- и наноминеральным компонентам руд, пород,

промежуточных продуктов обогащения и переработки. Фрагменты базы данных по синтезированным наночастицам, имеющим природные аналоги, приведены в таблице 1.

Объектом минералогического изучения стала тонкодисперсная минеральная составляющая руд комплексных месторождений: Верхнеэспинское (Восточный Казахстан), Баласаускандык, Шалкия (Каратай, Южный Казахстан), Акжал (Центральный Казахстан), а в двух последних из указанных промежуточные и конечные продукты обогащения. Не последнюю роль в выборе месторождений (Баласаускандык, Шалкия, Акжал) сыграло сотрудничество с технологами-обогатителями, занимающимися их разработкой, а также наличие предварительно хорошо проработанных минералогами на макроуровне коллекций каменного материала. В качестве первоочередных перспективных для поисков природных наноминеральных форм вещества выделены геологические объекты: месторождения Новоднепровское, Жезказган и объекты Таскоринского золоторудного района.

Результатами минералогических исследований на месторождениях Казахстана, проводимых сотрудниками лаборатории, в сотрудничестве с коллегами из Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана и С.-Петербургского гос. университета (Россия), университета Манитобы (Канада) за последние годы явились открытия с изучением и описанием более 10 новых минеральных видов, утвержденных Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации, среди которых

казахстанит  $\text{Fe}^{3+}\text{V}^{4+}_5\text{V}^{5+}_3\text{O}_{39}(\text{OH})_9\cdot8,55\text{H}_2\text{O}$  [1, 2],  
митряевит  $\text{Al}_5(\text{PO}_4)_2[(\text{P},\text{S})\text{O}_3(\text{OH}),\text{O}]_2\text{F}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8\cdot6,48\text{H}_2\text{O}$  [3, 4],  
никсергивит  $(\text{Ba},\text{Ca})_2(\text{Al},\text{Si})_7\text{O}_{10}(\text{CO}_3)(\text{OH})_6\cdot n\text{H}_2\text{O}$  [5, 6],  
анкиновичит  $(\text{Ni},\text{Zn},\text{Cu})\text{Al}_4(\text{VO}_3)_2(\text{OH})_{12}\cdot2\text{H}_2\text{O}$  [7],  
чухровит-(Nd)  $\text{Ca}_3(\text{Nd},\text{Y})\text{Al}_2(\text{SO}_4)_2\text{F}_{13}\cdot12\text{H}_2\text{O}$  [8],  
кыргызстанит  $\text{ZnAl}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12}\cdot3\text{H}_2\text{O}$  [9],  
соколовит  $\text{CsLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$  [10],  
новоднеприт  $\text{AuPb}_3$  [11],  
камарант  $\text{Ba}_3\text{NaTi}_4(\text{Fe}^{2+},\text{Mn})_8(\text{Si}_2\text{O}_7)_4\text{O}_4(\text{OH},\text{F})_7$  [12],  
флюоролейкит  $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Li})\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$  (в печати) и др.

Данные по новым минералам являются вкладом в фундаментальные знания о веществе. Они пополнили мировую справочную минералогическую литературу, а дифракционные данные – Международную базу дифракционных данных (International Centre for Diffraction Data). По



Научный сотрудник Шабанова Т.А.  
за просвечивающим электронным микроскопом

инициативе ИАЦ геологии и минеральных ресурсов РК сотрудники лаборатории стали создателями электронной базы данных по новым минералам, открытых в Казахстане.

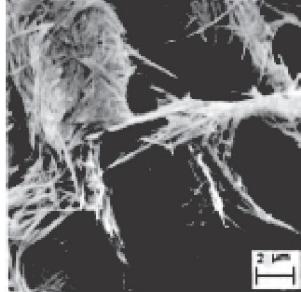
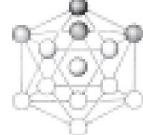
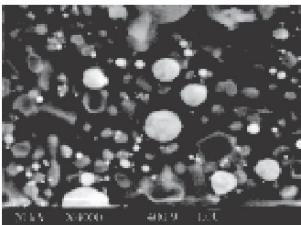
В области наноминералогии сотрудниками лаборатории:

- установлено широкое развитие наноминеральных форм в природных объектах, далеко не всегда учтенных традиционными методами анализов [13, 14];

- на примере шаровидных образований золота, самородного железа из Новоднепровского месторождения, нанокристаллического опала из месторождения Текели показана одна из возможностей наследования форм от зародышевых nanoструктур через микро- до макрообразований [15];

- отмечено, что кремнийсодержащие (опаловые) природные структуры соответствуют почти всем видам синтезируемых фотонных кристаллов. Природные аналоги синтезируемых наноча-

Таблица 1. Примеры синтезированных наночастиц с условиями формирования и морфоструктурными особенностями (составлено В.А. Глаголевым)

Синтезированные наночастицы	Условия синтеза	Физико-химические характеристики	Структура и морфология
Натриевая ванадиевая бронза (отдельные кристаллы с лентовидной морфологией)	Гидротермальный		
Отдельные нитевидные кристаллы кадмия ванадата CdV <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Гидротермальный 140°C в течение 12 ч	Средний диаметр – 100 нм, длина более 20 мкм	
Сульфид свинца PbS Дендритовый трехмерный наноструктурированный материал наносфероиды золота Au из золоторудных месторождений Приамурья	Гидротермальный		
	Извлечено пирогидрометаллургическим методом моделирующим природные процессы		

стици и наноструктурных материалов могут иметь высокую стоимость [16];

-установлено, что белые сажи могут являться одной из стадий формирования кремнезолей. Показано, что морфологические особенности наноразмерных частиц (плёнок) оксидов титана и циркония влияют на реакционную способность оксидов ванадия [17, 18];

-по результатам исследований влияния механохимической активации на распространённые в природе углерод- и кремнесодержащие соединения показано, что они являются аналогами текtonометаморфических изменений в породах соответствующего состава [19];

-показано, что морфоструктура наночастиц является индикатором изменений термодинамической среды. Предложен способ использования отдельных фрагментов структуры углеродсодержащих веществ для визуализации и измерения некоторых параметров термодинамических природных процессов, способных стать основой новых технологий [20, 21];

-визуализировано явление капсуляции металлических фаз. Показана возможность образования капсул ценных металловсодержащих компонентов углеродистым и кремнистым материалами [22].

Все вышеперечисленные результаты исследований были доложены на различных международных конференциях: HighMatTech 2007 (2007 г., Киев, Украина); "Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies" (2008 г., Новосибирск, Россия); Carbon-2009 (Biarritz, Франция); Nanotech Europe (2009 г., Берлин, Германия); FLUCOME-10 (2010 г., Москва, Россия), а также на ежегодных конференциях «Сатпаевские чтения», организованных ИГН им. К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан) и опубликованы более, чем в 40 статьях в различных изданиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анкинович Е.А., Бекенова Г.К., Подлипаева Н.И. Новый водный ферро-ванадиевый минерал казахстанит  $\text{Fe}^{3+}_5 \text{V}^{4+}_5 \text{V}^{5+}_3 \text{O}_{39}(\text{OH})_9 \cdot 8,55\text{H}_2\text{O}$  из углеродисто-кремнистой формации СЗ Карагатай (Южный Казахстан)

2. Ankinovich E.A., Bekenova G.K., Podlipaeva N.I. Kazakhstanite, a hydrated ferrovanadate from Cambrian black shales of Northwest Karatau, South Kazakhstan// "Contributions to Eurasian Geology. Aspects of the Geology of Kazakhstan" Occasional Publications ESRI. New series. University of South Carolina, University of Utah. 1994. №12B. P.155-167 (англ.).

3. Ankinovich E.A., Bekenova G.K., Shabanova T.A., Zazubina I.S., Sandomirskaya S.M. Mitryaevaite,  $\text{Al}_{10}[(\text{PO}_4)_{8,7}(\text{SO}_3\text{OH})_{1,3}] \text{S}_{10}\text{AlF}_3 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$ , a new mineral species from a Cambrian carbonaceous chert formation, Karatau range and Zhabagly mountains, Southern Kazakhstan// Canadian Mineralogist. 1997. Vol.35. P.1415-1419 (англ.).

4. Cahill C.L., Krivovichev S.V., Burns P.C., Bekenova G.K., Shabanova T.A. The crystal structure of mitryaevaite,  $\text{Al}_5(\text{PO}_4)_2[(\text{P},\text{S})\text{O}_3(\text{OH},\text{O})]_2\text{F}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8 \cdot 6,48\text{H}_2\text{O}$ , determined from a microcrystal using synchrotron radiation// Canadian Mineralogist. 2001. Vol.39. P.179-186 (англ.).

5. Saburov S.P., Britvin S.N., Bekenova G.K., Sergieva M.N., Kotelnikov P.E. et al Niksergielite,  $[\text{Ba}_{1,33}\text{Ca}_{0,67}\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_4][\text{Al}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2] n\text{H}_2\text{O}$ , a new phyllosilicate related to the surite-ferrisurite series// American Mineralogist. 2005, 90. 1163-1166 (англ.).

6. Бекенова Г.К. Результаты дифракционного изучения нового минерала никсергиевита// Доклады Академии наук РК. 2003 № 5. С.89-92.

7. Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Соколова Е.В., Хавторн Ф., Агаханов А.А., Дикая Т.В., Бекенова Г.К. Анкиновичит – никелевый аналог альванита – новый минерал из Курумсака (Казахстан) и Кара-Чагыра (Киргизия)// Записки Всероссийского минералогического общества. 2004. № 2. С.59-70.

8. Паутов Л.А., Бекенова Г.К., Карпенко В.Ю., Агаханов А.А. Чухровит -(Nd)  $\text{Ca}_3(\text{Nd},\text{Y})\text{Al}_2(\text{SO}_4)\text{F}_{13} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  – новый минерал// Новые данные о минералах. 2005. Вып.40. С.5-10.

9. Агаханов А.А., Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Бекенова Г.К., Уварова Ю.А.; Соколова Е.В., Хавторн Ф. Кыргызстанит,  $\text{ZnAl}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  – новый минерал с месторождения Кара-Танги, Киргизия //Новые данные о минералах. 2005. В.40. С.23-28.

10. Паутов Л.А., Агаханов А.А., Бекенова Г.К. Соколовит  $\text{CsLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$  – новый минерал из группы сплюд// Новые данные о минералах. 2006. Вып.41. С. 5-13.

11. Дюсембаева К.П., Левин В.Л., Котельников П.Е., Бекенова Г.К. Новоднеприт  $\text{AuPb}_3$  – новый минерал из месторождения Новоднепровское (Северный Казахстан)/ / Доклады НАН РК. 2006. №5. С.46-50.

12. Sokolova E., Abdu Y., Hawthorne F.C., Stepanov A.V., Bekenova G.K., Kotelnikov P.E.

Camarataite,  $\text{Ba}_3\text{NaTi}_4(\text{Fe}^{2+},\text{Mn})_8(\text{Si}_2\text{O}_7)_4\text{O}_4(\text{OH},\text{F})_7$ , 1. A new Ti-silicate mineral from the Verkhnee Espe Deposit, Akjailyautas Mountains, Kazakhstan// Mineralogical Magazine. 2009. October Vol. 73(5). P.521-528 (англ.).

13. Глаголев, В.Л. Левин, Т.А. Шабанова, П.Е. Котельников, Г.К. Бекенова. Перспективы и парадоксы казахстанской наноминералогии. //Доклады национальной академии РК. №4. 2006. С. 36 – 39.

14. Глаголев В.А., Котельников П.Е., Левин В.Л., Шабанова Т.А., Бекенова Г.К. Природное нановещество, изученность и перспективы использования /Изв. НАН РК сер. геологич. 2007. 5 (409). С.79 – 80.

15. Дюсембаева К.П., Бирюлин В.Л., Левин В.Л., Котельников П.Е., Бекенова Г.К. Шаровидные образования

золота из зоны окисления Новоднепровского месторождения //Геология Казахстана. 2002. №2. С.57-67.

16. Глаголев В.А., Шабанова Т.А. Опал и опаловые структуры для фотоники// Материалы Междунар. Конференции «Геология, минерагения и перспективы развития мин.-сырьевых ресурсов» («Сатпаевские чтения»). 2009. Алматы. С.311-317.

17. Шабанова Т.А., Глаголев В.А., Каршигина З.Б., Бочевская Е.Г., Абшишева З.С. Электронно-микроскопическое исследование некоторых разновидностей дисперсных кремнеземов//Доклады НАН РК. 2009. №1. С.26-32.

18. Сембаев Д.Х., Ивановская Ф.А., Михайловская Т.П., Чухно Н.И., Шабанова Т.А. Влияние размера частиц TiO<sub>2</sub> на каталитическое действие V-Ti-Zr-O – катализаторов в окислительных превращениях 3-пиноклина //Известия НАН РК. Сер.химическая. 2009. №6. С.62-70.

19. Мансурова Р.М., Шабанова Т.А., Глаголев В.А., Мофа Н.Н., Мансуров З.А. Структуры углеродных нано-

частиц // Международная конференция HighMatTech 2007. С. 283.

20. Shabanova T.A., Mofa N.N., Nuzhnov J.V., Mansurov Z.A. Visualisation of nanosize heterogeneties of media and a hidrodinamic model of formanion of tubular nanostructures./ / 10<sup>th</sup> International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, FLUCOME 2009, August 14 -21, Moscow, 2009,CD (англ.).

21. Мансуров З.А., Шабанова Т.А., Нужнов Ю.В., Мофа Н.Н.. Модели образования некоторых углеродных структур. // Материалы 5 Международного симпозиума «Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия», Алматы. 2008. С. 69 - 73.

22. Глаголев В.А., Мофа Н.Н., Левин В.Л., Котельников П.Е., Шабанова Т.А. Капсулированные частицы в природе и эксперименте. // Сб. трудов научно-практической конференции «Сатпаевские чтения» Проблемы геологии и минералогии в развитии минерально-сырьевых ресурсов. Алматы. 2010. С.441-448.