



# Физические методы исследования минерального сырья

Рудмин Максим Андреевич  
к.г.-м.н., доцент каф. ГРПИ

# Цели и задачи лабораторных методов исследования минерального сырья (мс)

## Цель

Решение проблемы рационального и комплексного их использования в промышленности и народном хозяйстве

## Задачи

Выяснение генетических вопросов  
Промышленная оценка месторождений  
Специальные прикладные и научные вопросы



# Классификация методов исследования

## **Физические**

- РФА
- Рентгенодифракционный (рентгеноструктурный) -РДА (РСА)
- ИСП-МС
- Атомно-эмиссионный - АЭС
- Атомно-абсорбционный - ААС
- Нейтронно-активационный (НАА)
- Электронно-зондовый (РМА)
- Электронная микроскопия (СЭМ, РЭМ)
- ИК-спектроскопия
- Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)
- Электронный парамагнитный резонанс - ЭПР
- Мёссбауэровская спектроскопия

## **Химические**

- «Мокрая химия»
- Пробирный
- Силикатный анализ
- Рациональный химический анализ (фазовый)

## **Физико-химические**

- Полярографический
- Термический
- Термобарогеохимия

## **Оптические**

- Петрографический
- Минераграфический
- Иммерсионный

## Стадии ГРР → методы исследования мс

**Стадия эксплуатационных работ**

Полный комплекс методов. Постоянный учет качества извлечения полезного компонента.

**Стадия разведочных работ**

Химический: «мокрая химия»  
Физический: нейтронно-активационный

**Стадия оценочных работ**

Химический: пробирный

**Стадия поисковых работ**

Физические: АЭС, ААС, ИСП-МС, РФА

**Стадия региональных работ (съёмка)**

Оптические: петрографический, минералогический, минераграфический;  
Химические: силикатный анализ;  
Физические и физико-химические: определение абсолютного возраста, ПКСА (КСА), ААС (Аи,ЭПГ)

# Пробы для лабораторных исследований

## **Химических концентратов**

Химический состав руды, содержание полезных компонентов

### Анализы:

спектральный химический

Вес пробы не более 1 кг, обычно 0,4-0,5 кг.

Размер материала 0,2-0,4 мм

## **Минералогические**

Качественная и количественная характеристика руды: текст.-структурные особенности, минеральные ассоциации, вторичные изменения, формы проявления ценных компонентов, распределение их по крупности (по классам)

### Анализы:

Оптические (минералогический петрографический, минераграфический)  
Вес пробы от 1 кг и выше.

Штуфы и пробы (м.б. групповые).

## **Технологические**

Технологические свойства ПИ, качественные и количественные показатели процесса обогащения руд и переработки концентратов

### Анализы:

Комплексные  
Вес пробы от сотни кг до 4-5т.

для полужаводского (полупромышленного) испытания составляет десятки (сотни) тонн.

## **Продукты обогащения и доводки**

Контроль процессов технологии и качества получаемых продуктов: *концентратов*, промежуточных продуктов (*промпродуктов*) и *хвостов*

(отвальных продуктов).

### Анализы:

Оптические, минералогический, физически, химические

## Минералогические и химические пробы



## Отбор литогеохимических проб



## Технологическая проба



Фото: Синкина Е.А.

## Исходный вес представительной пробы

Исходный вес пробы варьирует от сотен гр. до тысяч кг.  
Зависит от задачи и вещественного состава объекта опробования

В первую очередь вес зависит от максимального размера составляющих ее фрагментов и рассчитывается по формуле Г. О. Чечотта

$$Q=K \times d^2$$

где Q – исходный вес пробы (кг); d – диаметр наибольших частиц пробы (зерен минералов) (мм); K – коэффициент однородности пробы, зависящий от равномерности распределения полезного компонента в пробе.

Краткая характеристика однородности проб	K
Равномерное (руды черных металлов)	0,05
Неравномерные (разнообразное минеральное сырье и горные породы)	0,10
Весьма неравномерное (руды цветных металлов)	0,20...0,30
Крайне неравномерное (руды редких металлов)	0,4...0,5
Крайне неравномерные золотые руды с крупным (больше 0,6 мм) золотом	0,8...1,0



## Этапы изучения природных и техногенных образований

1. четкая, конкретная постановка задачи исследования;
2. выбор метода анализа или сочетания методов, выполняемых в определенной очередности;
3. тщательная подготовка проб в соответствии с требованиями выбранных методов;
4. проведение анализов;
5. интерпретация результатов и получение выводов с учетом ограничений возможностей методов

# Обогащение проб и выделение минеральных концентратов

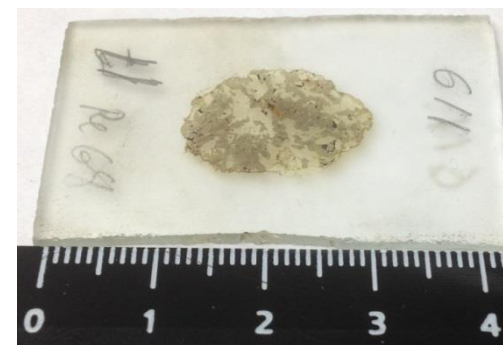
Первичная проба – штуф или рыхлая масса

Штуфные пробы в первую очередь изучают визуально.

В минералогических лабораториях проводят исследования в покрытых и прозрачно-полированных **шлифах** и **аншлифах** под микроскопом.



Петрографический кабинет каф.  
ГРПИ ТПУ  
Источник:  
<http://tpu.ru/f/1773/1404232.jpg>



Фотография шлифа

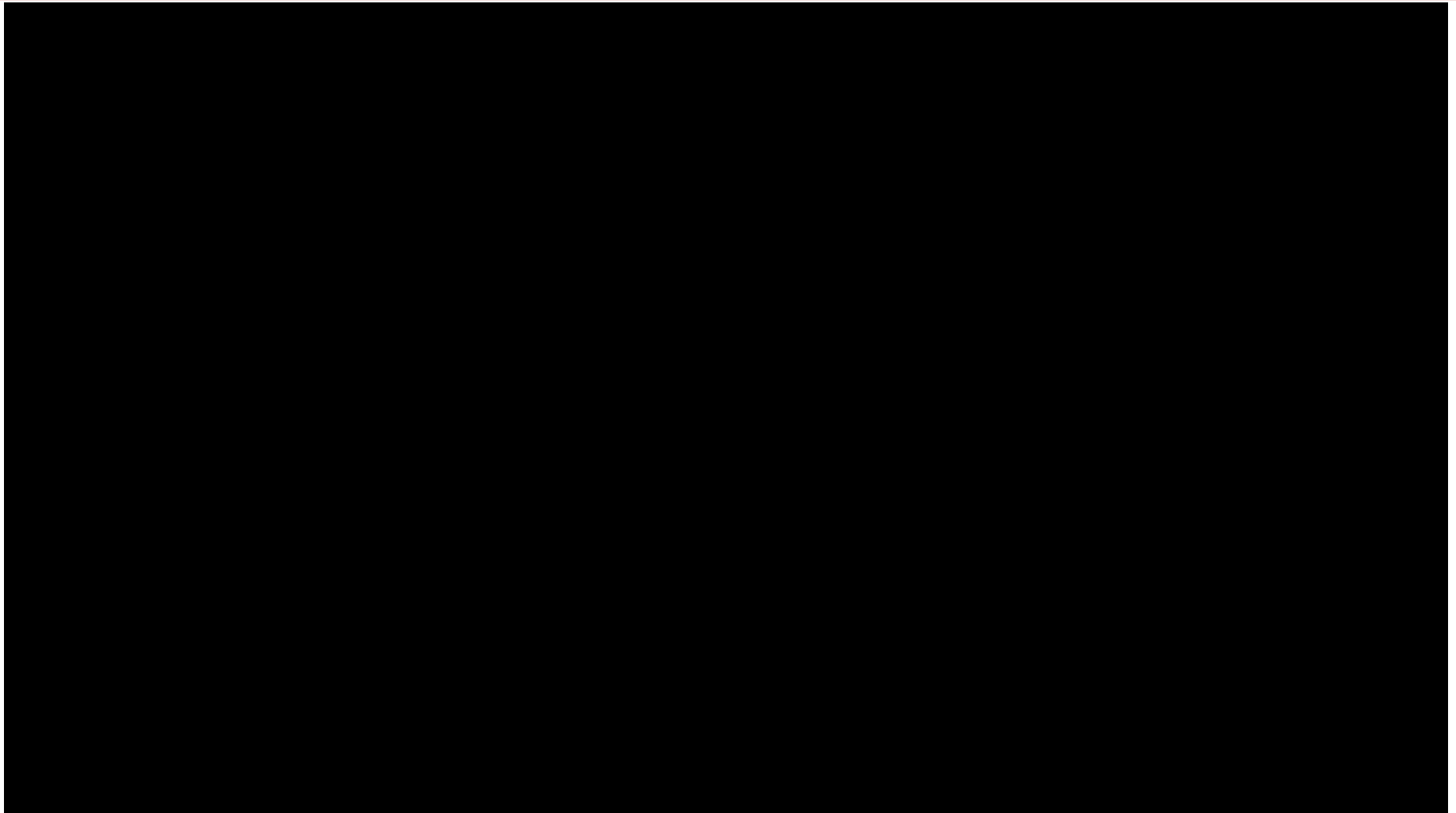
Поляризационный микроскоп МП-201

Источник:

[http://www.akvilon.su/system/rich/rich\\_files/rich\\_files/000/002/249/original/mp201.gif](http://www.akvilon.su/system/rich/rich_files/rich_files/000/002/249/original/mp201.gif)

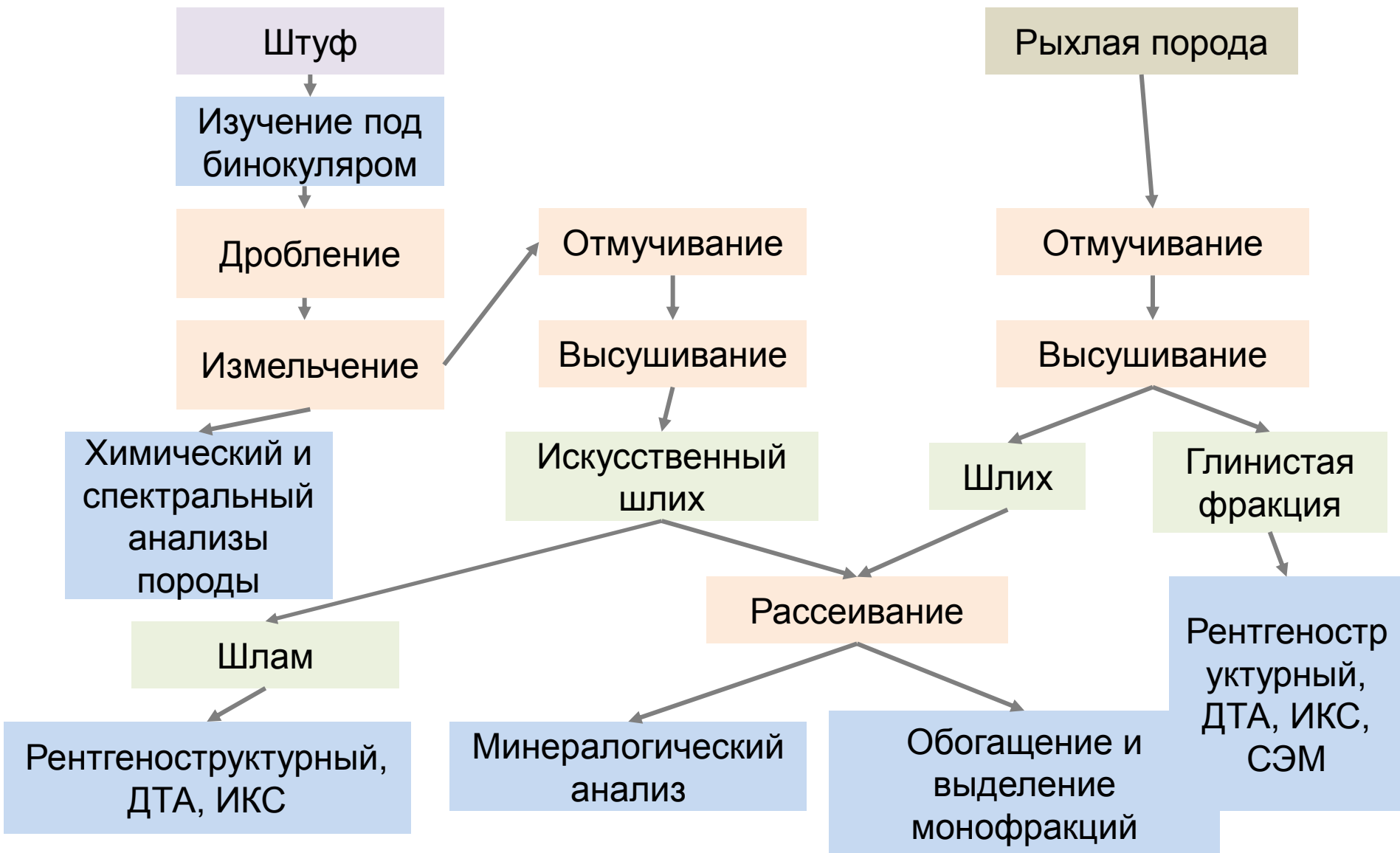
## Изготовление полированных шлифов

Видеоматериал «Изготовление шлифов» от компании Brot, производителя полного спектра оборудования и расходных материалов для изготовления геологических образцов



Источник: <https://youtu.be/0StQjcy1SEs>

# Схема подготовки проб



## Дробление, измельчение



Дробилка щековая ЛДЩ-60/100  
**Крупность исходного материала не более 50 мм**

Щековая дробилка выдает материал крупностью 2–15 мм и мельче. Поэтому пробу следует пропускать через дробилку многократно, постепенно уменьшая зазор щек до минимума, и просеивать после каждой операции.



Истиратель дисковый ИД-175  
**Крупность исходного материала не более 15 мм**

*Источник фотографии: Михайлов В.В., Гордиенко В.В. Простейшие ..., 2012*

После работы дискового истирателя получается материал размером до 0,1 мм и мельче. Пробу также необходимо просеивать, чтобы избежать ее перетирания.

# Квартование

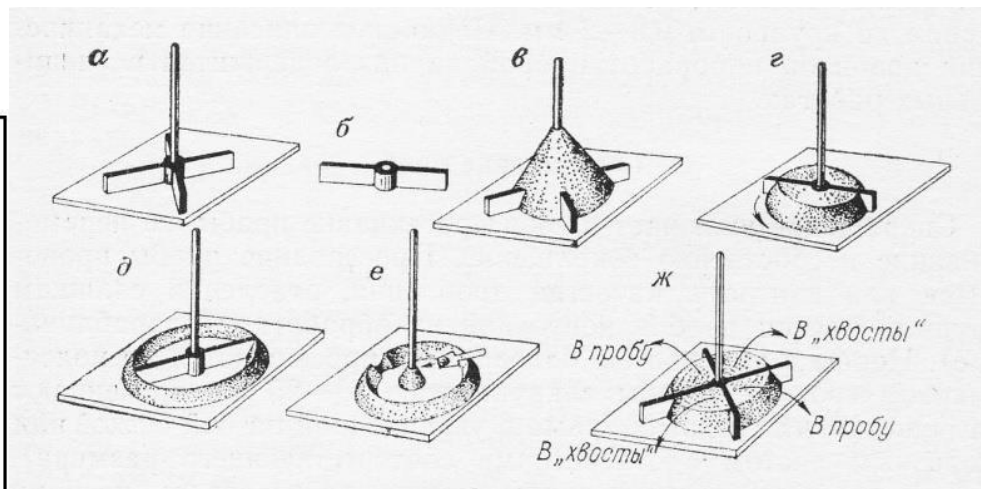
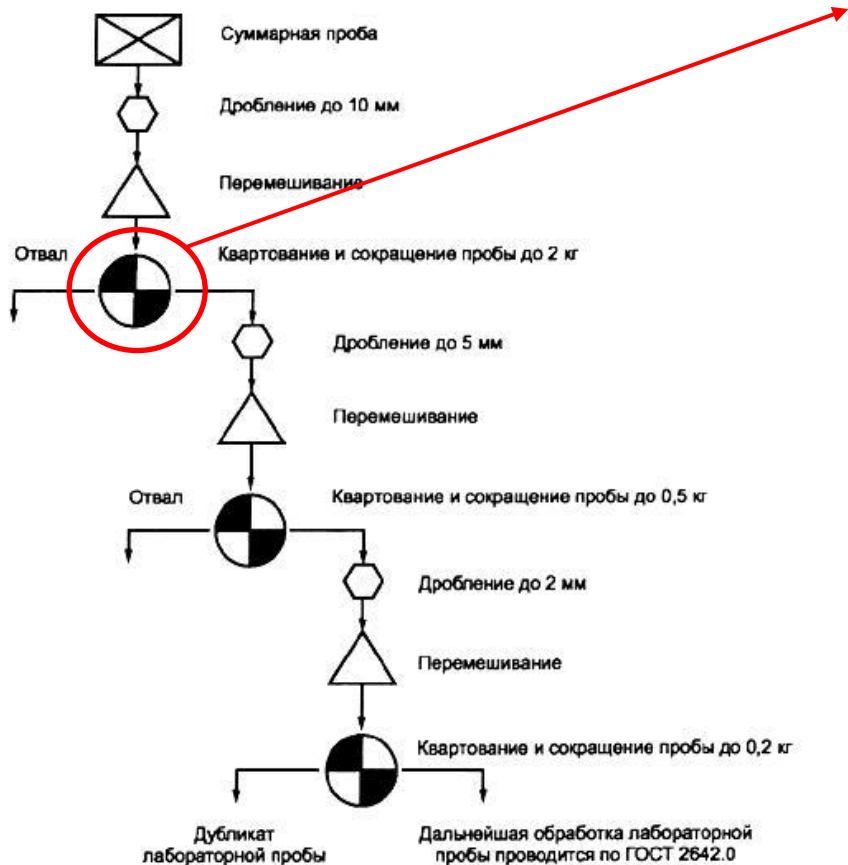
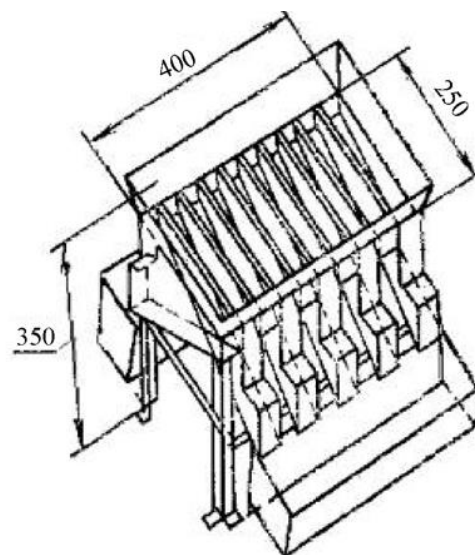


Схема квартования методом «кольца и конуса»  
Источник: <http://ok-t.ru/studopediaru/baza14/1007865167747.files/image137.jpg>



## Делитель Джонса

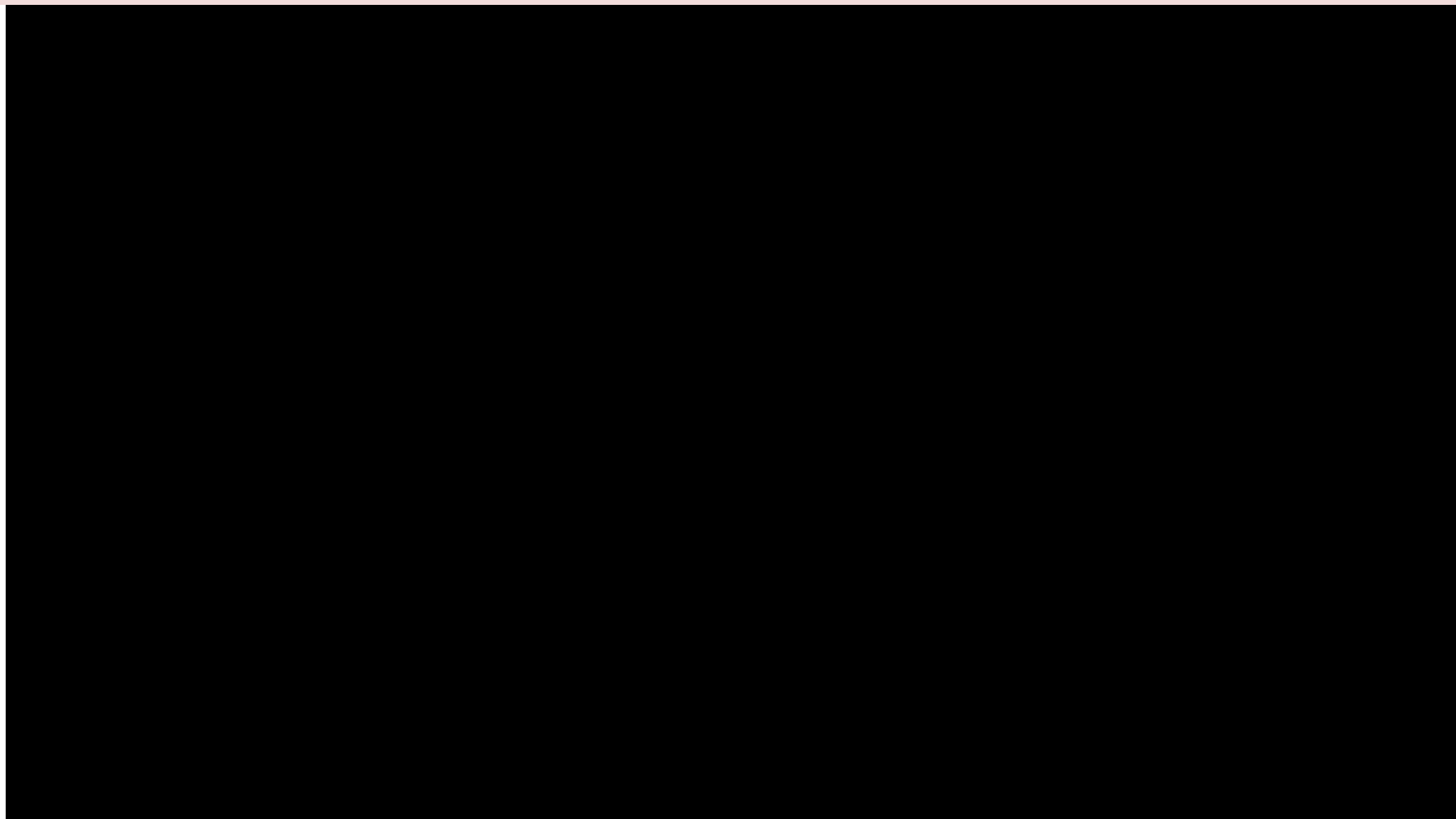
Источник:  
Михайлов В.В.,  
Гордиенко В.В.  
Простейшие ...,  
2012

Пример схемы обогащения

Источник: ГОСТ Р 52540-2006

[http://docs.cntd.ru/picture/get?id=P00E7&doc\\_id=1200044761&size=small](http://docs.cntd.ru/picture/get?id=P00E7&doc_id=1200044761&size=small)

Фрагмент документального фильма «Чукотское золото»



## Подготовка проб к выделению мономинеральных фракций

Просмотр шлифов, установление наличия тех или иных минералов, характер вкрапленности минералов и степень их взаимного срастания.

Определение схемы подготовки пробы к обогащению (в общих чертах).

Признаки **невозможности** выделения чистого минерала:

- эмульсионная вкрапленность минерала, исключающая его раскрытие в ходе дробления и измельчения;
- взаимное тонкое прораствание минералов, например сульфидов друг в друге (в этом случае речь может идти о получении коллективного сульфидного концентрата, а не отдельных минералов или же о применении избирательного растворения в кислотах или щелочах);
- широкое развитие вторичных процессов, изменивших первоначальный характер строения и состава минерала: выветрелость, глубоко прошедшее поверхностное окисление и т. д.



## Последовательность предварительной пробоподготовки

*А. определение минерального состава визуальным и микроскопическим наблюдением образцов;*

*В. дробление и измельчение пробы до максимальной крупности 0,5 и 0,25 мм с учетом свойств твердости, хрупкости и ковкости минералов;*

*С. расситовка пробы на отдельные фракции по крупности;*

*Д. просмотр под биноклем полученных фракций, точная диагностика минералов и выявление их характерных свойств, способствующих выделению в мономинеральные фракции;*

*Е. разработка схемы выделения минералов*

## Виды сепарации

Универсальной схемы обогащения не существует. Выбор схемы зависит от минерального состава горных пород и руд, особенностей состава и структуры минералов, состоянии поверхности их зёрен, трещиноватости, степени окисленности, размеров кусков и т.д.

**Гравитационная сепарация.** Разделение минералам по их плотности, размерам частиц и механическим свойствам. Разделение в тяжелых средах, отсадка, концентрация на сотрясательных столах, разделение на активных поверхностях и винтовых сепараторах.

**Магнитная сепарация.** Различные магнитные свойства минералов, т.е. их способность взаимодействовать с магнитным полем.

**Электрическая сепарация.** Различные электрические свойства минералов (электропроводность, диэлектрическая проницаемость).

**Флотация.** Это процесс обогащения тонкоизмельченного материала в водной среде. Основан на различиях физико-химических свойств поверхностей разделяемых минералов (главным образом смачиваемости водой) и взаимодействии зерен с находящимся в воде диспергированным воздухом.

# Магнитная сепарация

## Минералы:

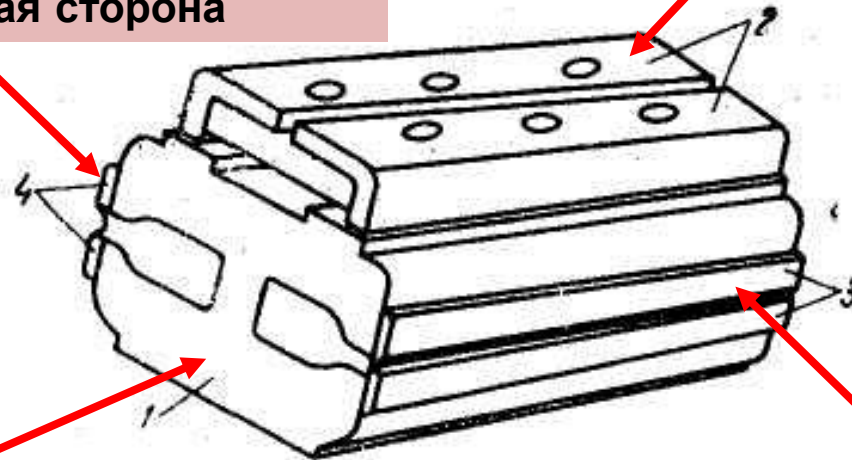
### немагнитные:

*касситерит, флюорит, барит, кварц, полевые шпаты, кальцит, циркон.*

### Очень слабомагнитная сторона

### сильномагнитные

(притягивающиеся обычным постоянным магнитом): *магнетит, пирротин*



*Ручной магнит А. Я. Соичева*

### среднемагнитные

(отделяющиеся на электромагните при небольшой силе тока): *ильменит, альмандин, хлорит, биотит, гиперстен, амфибол, диопсид, ксенотим*

### слабомагнитные

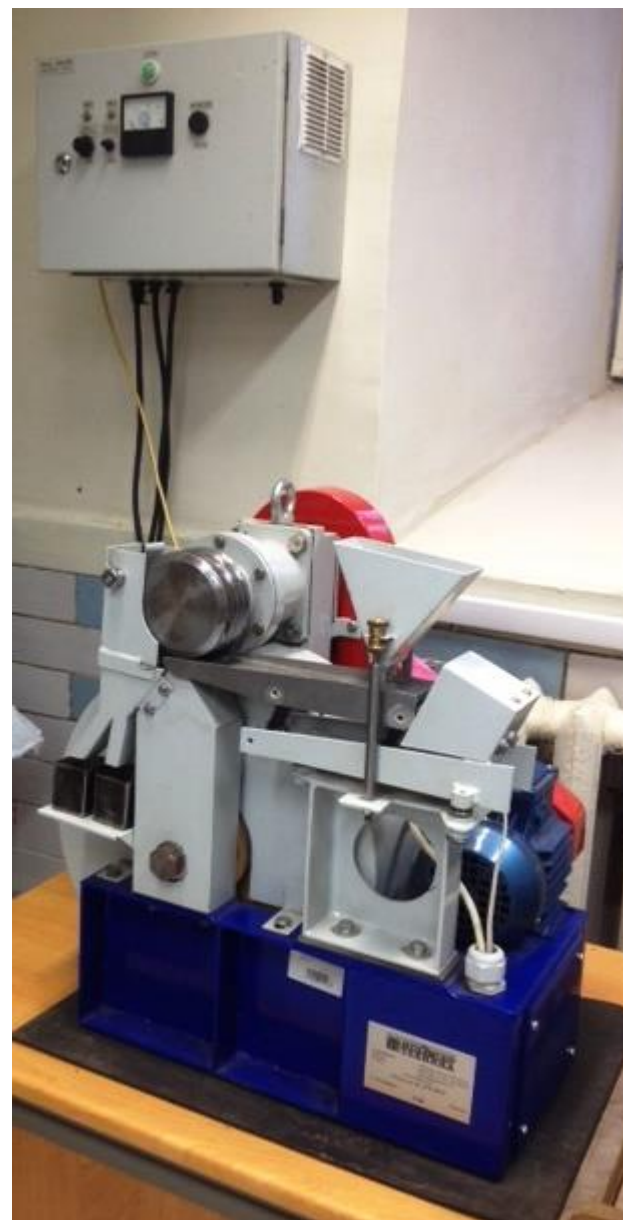
(отделяющиеся на электромагните при большой силе тока): *халькопирит, монацит, рутил, пирит (после прокаливания)*

## Магнитная сепарация

Изодинамический магнитный сепаратор СИМ-1. Предназначен для «тонкой» чистки



ЭМС ЭВС  
10/5

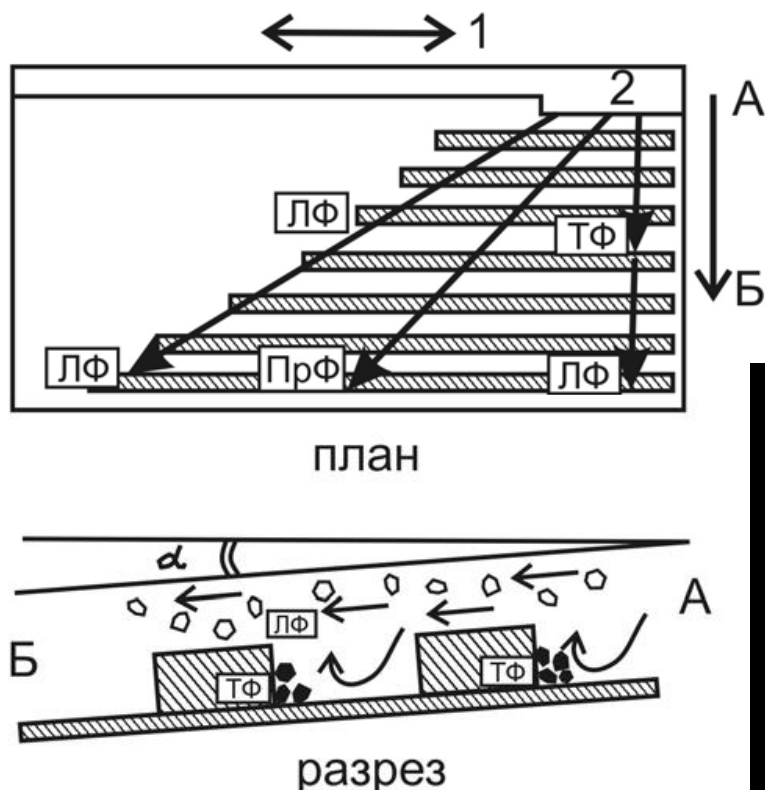


### **Жидкости:**

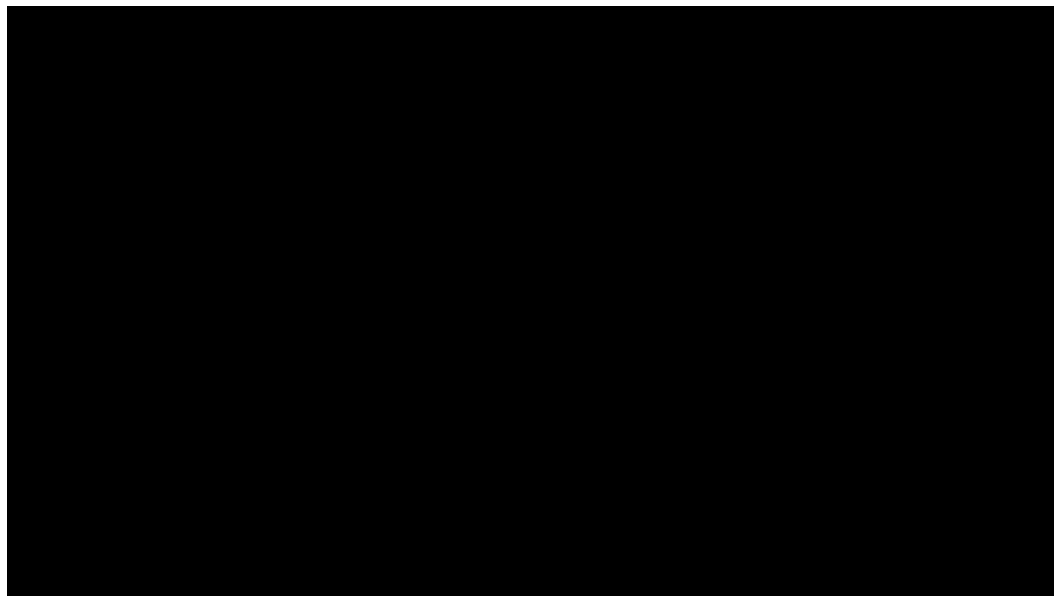
1. Бромформ  $\text{CHBr}_3$ , плотность 2,89, разбавляется спиртом.
2. Йодистый метилен  $\text{CH}_2\text{I}_2$ , плотность 3,32, разбавляется диметилформамидом.
3. Жидкость Клеричи – водный раствор малоновокислого таллия  $\text{CH}_2(\text{COOTl})_2$  и муравьинокислого таллия  $\text{HCOOTl}$ , плотность 4,25, разбавляется водой. Эта жидкость особенно ядовита и требует предельной осторожности.
4. Жидкость Туле (раствор  $\text{HgI}_2\text{-2KI}$ ), плотность 3,19, разбавляется водой.

# Разделение минералов на концентрационно-сотрясательных столах

## Схема работы сотрясательного стола



План: 1 – возвратно-поступательное движение деки, 2 – приемник пульпы, стрелки показывают движение пульпы по наклонной плоскости в направлении А–Б и сепарацию фракций: ТФ – тяжелой, ЛФ – легкой и ПрФ – промежуточной. Разрез А–Б: стрелки показывают движение пульпы: ЛФ – ламинарное с легкой фракцией; ТФ – турбулентное, между рифеями, где концентрируется тяжелая фракция;  $\alpha$  – угол наклона стола.



Источник схемы: Михайлов В.В.,  
Гордиенко В.В. Простейшие ..., 2012

Источник: <https://youtu.be/9hC0p7UbHxk>

## Пример работы концентрационно-сотрясательного стола



Shaker table J.Farmer Mining

Источник: <https://youtu.be/vZPuf-feiqc>

# Флотация

**Флотация (от англ. to float – плавать на поверхности)** – процесс, основанный на различии в смачиваемости поверхности разделяемых минералов водой, в котором плохо смачиваемые частицы рудного минерала (гидрофобные) прилипают к вводимым в пульпу пузырькам воздуха и поднимаются с ними на поверхность, образуя пену, а хорошо смачиваемые водой частицы (гидрофильные) остаются в объеме пульпы.

Флотация является основным методом, используемым при обогащении руд. В настоящее время более **95 % руд цветных и редких металлов** подвергается флотации.

## Минералы:

### **сильногидрофобные**

(расположенные ниже по убывающей гидрофобности):

*каменный уголь, сера, графит, молибденит, реальгит, висмут, тальк, слоистые силикаты с совершенной спайностью (слюды), алмаз*

### **слабогидрофобные,**

минералы-полупроводники с ковалентно-металлическими связями, преимущественно сульфиды: *энаргит –  $Cu_3(AsS_4)$ , халькозин –  $Cu_2S$ , кавелин –  $CuS$ , аргентит –  $Ag_2S$ , халькопирит –  $CuFeS_2$ , марказит и пирит –  $FeS_2$ , арсенопирит –  $FeAsS$ , пирротин, сфалерит, некоторые фосфаты (апатит и др.)*

### **гидрофильные –**

большинство минералов-диэлектриков с некомпенсированными на поверхности зерен ионными и ионно-ковалентными связями – *барит, кальцит, кварц, полевые шпаты, которые в рудах играют роль безрудных минералов, разубоживающих рудную массу*



«Технологическая схема переработки сульфидной и окисленной медной руды»

# Лабораторная база кафедры ГРПИ

## Рентгенофлуоресцентный анализ



**HORIBA XGT-7200**

*Источник: [http://tpu.ru/f/1773/rfmxgt-7200\(big\)\\_650x624.jpg](http://tpu.ru/f/1773/rfmxgt-7200(big)_650x624.jpg)*



**Innov X-50**

*Источник:*

*[http://tpu.ru/i/content/1773/12092116\\_650x554.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/12092116_650x554.jpg)*

## Электронная микроскопия



TESCAN VEGA 3 SBU

Источник:

[http://tpu.ru/f/1773/img\\_0999\\_541x800.jpg](http://tpu.ru/f/1773/img_0999_541x800.jpg)

## Термобарогеохимия



Поляризационный микроскоп Axio Scope.A1 с термокамерой Lincam для изучения флюидных включений

Источник:

[http://tpu.ru/i/content/1773/12092105\\_650x476.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/12092105_650x476.jpg)

# Лабораторная база кафедры ГРПИ

## Минераграфический анализ



Микроскоп спектрофотометр МСФУ-К  
Источник:  
[http://tpu.ru/f/1773/pa230001\(big\)\\_488x650.jpg](http://tpu.ru/f/1773/pa230001(big)_488x650.jpg)



Микротвердомер ПМТ-3М  
Источник:  
[http://tpu.ru/i/content/1773/pa230002+\(big\)\\_476x650.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/pa230002+(big)_476x650.jpg)

## Инфракрасная спектроскопия



Спектрофотометр ИК-Фурье IR Prestige-21

*Источник:*

*[http://tpu.ru/i/content/1773/12092108\\_650x392.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/12092108_650x392.jpg)*

## Атомно-абсорбционный анализ



Комплекс атомно-абсорбционных спектрометров фирмы Varian

Источник:

[http://tpu.ru/f/1773/atomno\\_abs.\\_spektrometr\\_650x350.jpg](http://tpu.ru/f/1773/atomno_abs._spektrometr_650x350.jpg)

Спектрометр дуговой атомно-эмиссионный DEMO PRODIGY DC

[http://tpu.ru/f/1773/img\\_1588\\_800x658.jpg](http://tpu.ru/f/1773/img_1588_800x658.jpg)

## Атомно-эмиссионный анализ



# Лабораторная база кафедры ГРПИ

## Оборудование для пробоподготовки



Щековая дробилка «Rocklabs»

Источник:

[http://tpu.ru/i/content/1773/1558234\\_450x475.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/1558234_450x475.jpg)



Валковая дробилка

Источник:

[http://tpu.ru/i/content/1773/img\\_0979\(big\)\\_644x800.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/img_0979(big)_644x800.jpg)

Оборудование для пробоподготовки



Настольная кольцевая мельница  
Rocklabs LTD

Источник:

[http://tpu.ru/i/content/1773/img\\_0983\(big\)\\_534x800.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/img_0983(big)_534x800.jpg)



Вибрационный измельчитель

Источник:

[http://tpu.ru/i/content/1773/img\\_0982\(big\)\\_650x793.jpg](http://tpu.ru/i/content/1773/img_0982(big)_650x793.jpg)



# Лабораторная база кафедры ГРПИ

## Как найти информацию?

Зайти на сайт кафедры через сайт [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)

The screenshot shows the main page of Tomsk Polytechnic University. The header includes the university logo and name in Russian and English, along with a search bar and a link to an English version. The main navigation bar contains links for 'О ТПУ', 'ОБРАЗОВАНИЕ', 'НАУКА И ИННОВАЦИИ', 'МЕЖДНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО', and 'ЖИЗНЬ В ТПУ'. On the left, a 'СОДЕРЖАНИЕ' sidebar lists various university departments. The main content area is titled 'Структура ТПУ' and lists 'Учебные подразделения'. A list of departments is shown, with 'Кафедра геологии и разведки полезных ископаемых (ГРПИ)' highlighted in red. A 'Нам важно Ваше мнение' pop-up window is also visible.

## Вкладка «лабораторная база»

The screenshot shows the website page for the Department of Geology and Exploration of Mineral Resources (GRPI). The header is similar to the main page. The main content area is titled 'Кафедра геологии и разведки полезных ископаемых (ГРПИ)'. It features a profile of Roman Gavrilov, the department head, with his photo and contact information. A red box highlights the 'Лабораторная база' link in the 'СОДЕРЖАНИЕ' sidebar. Below the profile, a green banner states 'Кафедра ведет набор' (The department is recruiting). Underneath, it lists 'Дипломированных специалистов по специальности: 21.05.02 Прикладная геология' and provides details about the specialization, including the accreditation by ABET.

## Литература

1. Михайлов В.В. , Гордиенко В.В. Простейшие лабораторные методы выделения мономинеральных фракций: учеб.-метод. пособие / В. В. Михайлов, В. В. Гордиенко. – СПб.: С.-Петербур. гос. ун-т, 2012. – 48 с.
2. Гурвич М.Ю. Современные методы исследования минералов, горных пород и руд (учебное пособие). – М.: РГГРУ. – 2009. – 143 с.
3. Изюитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. – СПб.: Наука, 1997. – 577 с.

## Интернет-ресурсы:

4. <http://www.youtube.com/>
5. <http://tpu.ru/>

Благодарю за внимание