

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ПРОБЛЕМАМ ОБОГАЩЕНИЯ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ОБОГАЩЕНИЯ И ГЛУБОКОЙ  
ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД  
СТРАТЕГИЧЕСКОГО  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**Курков А.В., Ануфриева С.И.**



Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья  
им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

18 апреля 2024 года

г. Москва

# СТРАТЕГИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛЫ – РОЛЬ В РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА СТРАНЫ

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ДЕФИЦИТНЫЕ ВИДЫ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ,  
НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ  
ВАЖНЫХ СЕКТОРОВ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ

5 критически зависимых от импорта



## Итоги импортозависимости\*

Продукция	Суммарная стоимость импорта, млн долл.			Импорт из Китая
	2021	2022	2023	
Ниобий	78	135	95	Незначительный
Литий	70	128	103	Средний (24%)
РЗМ	43	29	29	Высокий (92%)
Тантал	10	43	42	Средний (40%)
Бериллий	12	11	15	Высокий по Be бронзе
Цирконий	4	8	7	Высокий (почти 100% по соединениям)
Стронций	3	4	2	Высокий (почти 100%)

\* По данным ООО «Исследовательская группа «Инфолайн»

# ГЛОБАЛЬНЫЕ ТРЕНДЫ БУДУЩЕГО ОПРЕДЕЛЯЮТ ЗАПРОСЫ РЫНКА



## Роботизация и дронизация

### Мировой рынок робототехники в 2022 году:

**42,4** млрд долларов США (ООО «Кэпт Налоги и Консультирование»)

**553 052** новых промышленных роботов на предприятиях по всему миру (отчет World Robotics)

**+5%** - количественный рост в сравнении с 2021 (отчет World Robotics)

### Примеры сфер применения дронов, включая потенциальные:

Сельское хозяйство

Съемки, в том числе в экстремальных условиях

ВПК

Доставка

Исследования, картография

Охрана правопорядка

Мониторинг производственных процессов



**+129%** — рост российского рынка беспилотников в 2023 г. по выручке

\*\* По данным Ассоциации РМ и РЗМ

# РАСШИРЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА И ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

**В мире (2023 г.):**

Более **13,6 млн** плагин-гибридов и электрокаров продано

**+31%** — годовой рост продаж

**16%** глобального авторынка

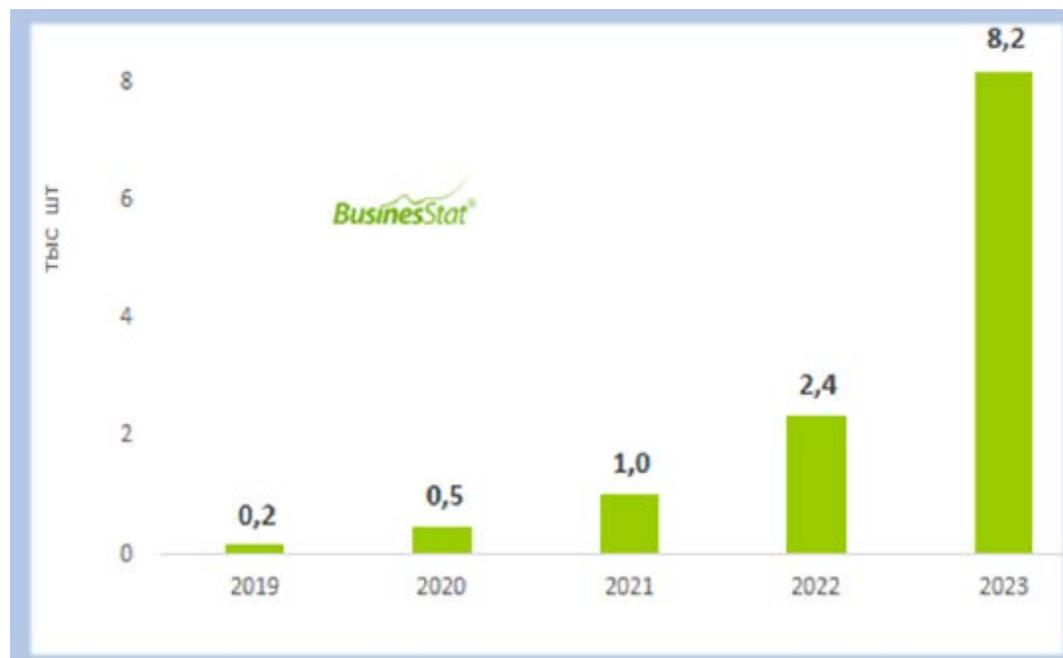
**Лидеры рынка:**

Tesla и BYD (суммарно — **35%** продаж)



**Продажи электромобилей (без ДВС) в России за 2019–2023 гг.**

**≈40 тыс.** — всего электромобилей в России



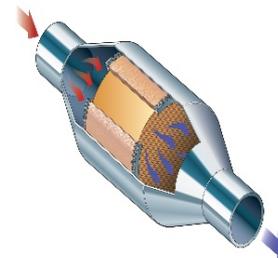
\*\* По данным Ассоциации РМ и РЗМ

# РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ

**Основными** области применения: производства магнитов, катализаторов для нефтепереработки и нефтехимии, каталитических блоков для нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей, полировальных порошков, стекла, люминофоров и керамики.



**Быстрорастущие** области применения РЗМ связаны с производством гибридных автомобилей, ветроэнергетических турбин, оборонной техники, телекоммуникационной, компьютерной и телевизионной техники, лазеров, сверхпроводников и топливных элементов.



21  
**Sc**  
Scandium  
44.956

39  
**Y**  
Yttrium  
88.906



57  
**La**  
Lanthanum  
138.905

58  
**Ce**  
Cerium  
140.116

59  
**Pr**  
Praseodymium  
140.908

60  
**Nd**  
Neodymium  
144.242

61  
**Pm**  
Promethium  
[145]

62  
**Sm**  
Samarium  
150.36

63  
**Eu**  
Europium  
151.964

64  
**Gd**  
Gadolinium  
157.25

65  
**Tb**  
Terbium  
158.925

66  
**Dy**  
Dysprosium  
162.500

67  
**Ho**  
Holmium  
164.930

68  
**Er**  
Erbium  
167.259

69  
**Tm**  
Thulium  
168.934

70  
**Yb**  
Ytterbium  
173.045

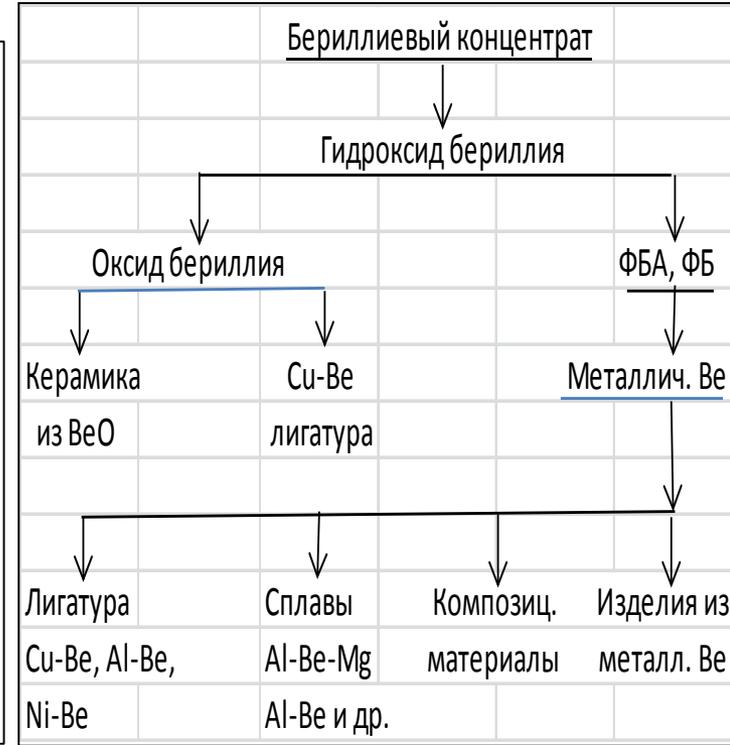
71  
**Lu**  
Lutetium  
174.967

**РЗМ** — ГЛАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ И НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

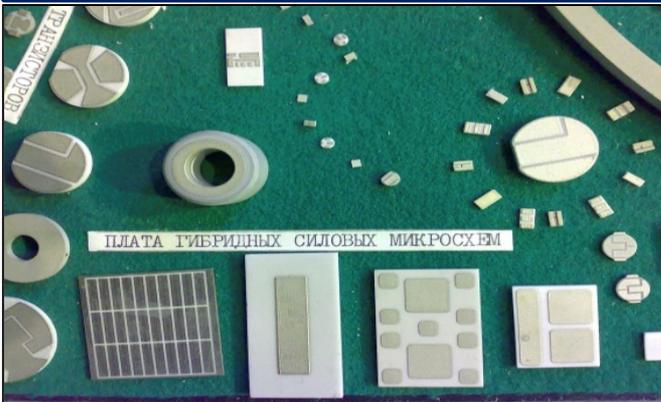


## ОКСИД БЕРИЛЛИЯ:

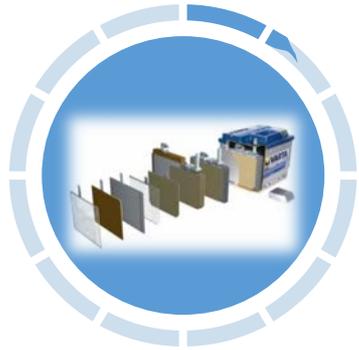
- основной компонент в производстве Cu-Be лигатуры;
- эффективный замедлитель и отражатель нейтронов в атомных энергетических установках (реакторах);
- элемент СВЧ-транзисторов высокой частоты;
- важнейший элемент радаров, радиостанций, высоко-температурный огнеупор.



## Номенклатура изделий более 600 видов



## Основные области мирового потребления сурьмы



10%

АККУМУЛЯТОРНЫЕ  
БАТАРЕИ



72%

АНТИПИРЕНЫ



10%

ХИМИКАТЫ



4%

КЕРАМИКА И СТЕКЛО

### НАСУЩНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАСЛИ

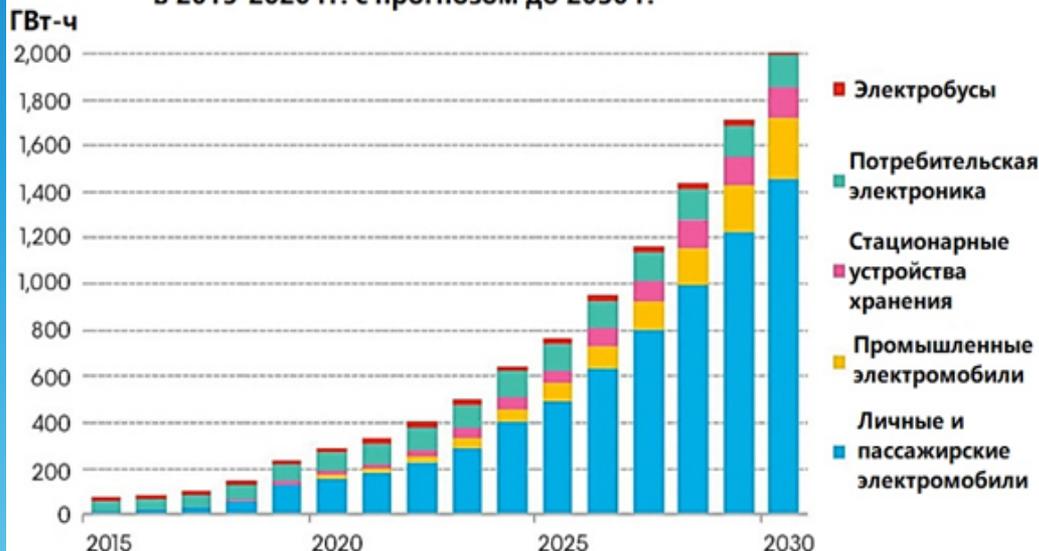
- 
- ✓ Отсутствие действующих предприятий по переработке различных типов сурьмяных концентратов.
  - ✓ Экспорт всего объема золото-сурьмяных концентратов.
  - ✓ Зависимость от импорта товарных соединений сурьмы (сульфид, триоксид, металлическая сурьма).

# КЛЮЧЕВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЛИТИЯ: ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

## Основные параметры различных типов литий-ионных аккумуляторов

Материал анода	Е, Вт-ч/кг	Плотность мощности, Вт/кг	Ресурс (количество циклов зарядки-разрядки)	Удельная стоимость материала аккумулятора, долл.США/кВт-ч	Степень безопасности	Степень коммерциализации
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	160	200	≥ 2 000	~ 360	хорошая	Выпускается
LiFePO <sub>4</sub>	120	200	≥ 2 500	~ 360	хорошая	Выпускается
Li-Ni-Mn-Co-O	200	200	≥ 2 000	~ 360	хорошая	Выпускается
Li-Ti-O	70	1000	≥ 10 000	~ 850	хорошая	Опытные экземпляры
Li-S	500	нет данных	≥ 100	нет данных	хорошая	На стадии разработки

Динамика мирового объема спроса на литий-ионные аккумуляторы и основные области их использования в 2015-2020 гг. с прогнозом до 2030 г.



- АНОД: соли лития (LiCoO<sub>2</sub>, LiFePO<sub>4</sub>, LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), Li<sub>мет</sub>
- КАТОД: графит или кремний
- ЭЛЕКТРОЛИТ: соли Li (LiPF<sub>6</sub>, LiTFSi, C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>)
- Существует несколько десятков типов аккумуляторов
- Для хранения 1 кВт-ч электроэнергии необходимо ~ 0,15 кг Li
- Стандартный электромобильный аккумулятор содержит ~ 4 кг Li

### САМАЯ КРУПНАЯ В МИРЕ БАТАРЕЙНАЯ СИСТЕМА: Li-ion батарейная система Hornsdale Power Reserve (Австралия)

- энергетическая мощность – 150 МВт
- емкость – 193 500 кВт-ч
- обладает самыми высокими показателями удельной емкости
- надежности, срока службы, удельной плотности энергии и КПД
- наименьшими значениями скорости саморазряда

# ОБОГАЩЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СПОДУМЕНОВЫХ РУД (ЛИТИЙ, БЕРИЛЛИЙ, ТАНТАЛ И НИОБИЙ)

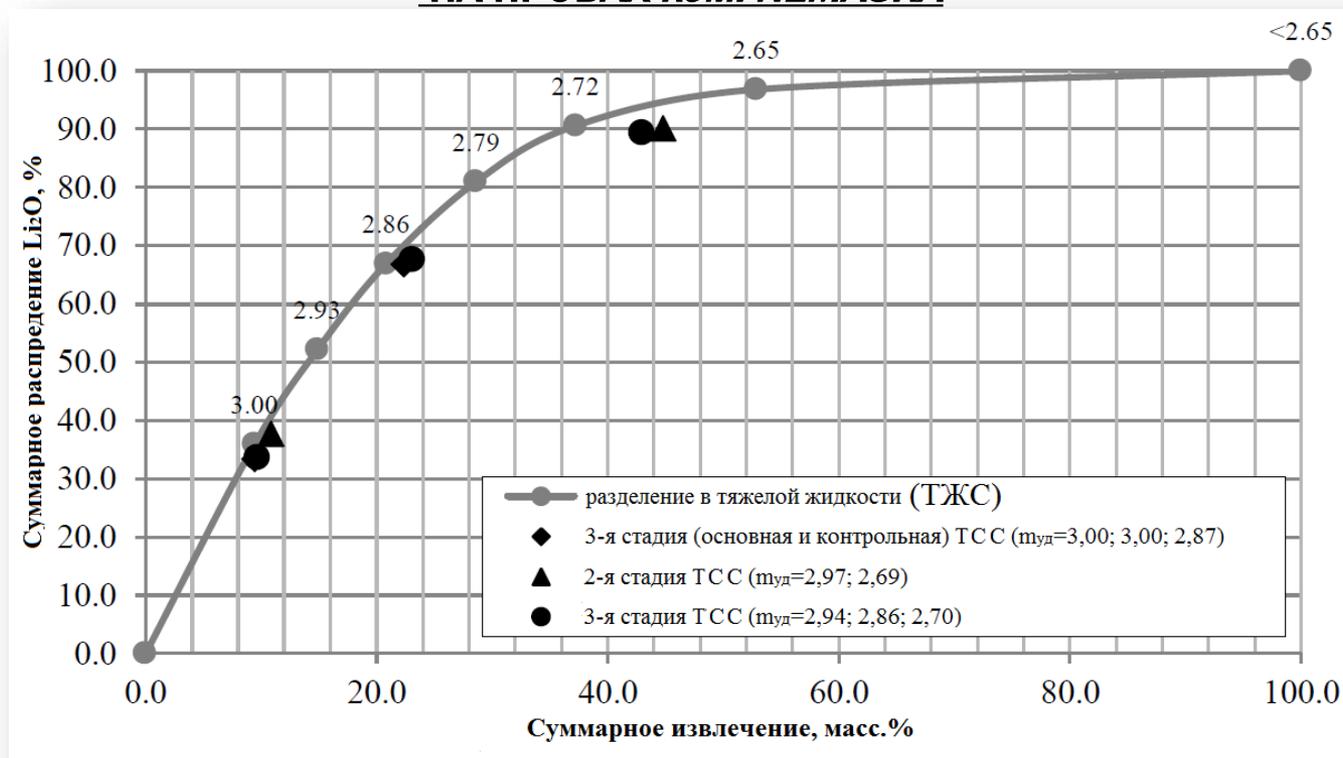
## ОСНОВНЫЕ СПОДУМЕНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РОССИИ

Наименование	Доля в запасах РФ, %	Содержание $\text{Li}_2\text{O}$ , %	Попутные компоненты	Продукты переработки (потенциальные)
<b>Рудные (пегматиты)</b>				
<b>Колмозерское</b> <i>Мурманская обл.</i>	23,8	1,34	Be Ta	$\text{Li}_2\text{CO}_3$ LiOH $\text{Be}(\text{OH})_2$ $\text{Ta}_2\text{O}_5$
<b>Полмостундровское</b> <i>Мурманская обл.</i>	9,9	1,25	Be Ta Nb	$\text{Li}_2\text{CO}_3$ LiOH $\text{Be}(\text{OH})_2$ $\text{Ta}_2\text{O}_5$ $\text{Nb}_2\text{O}_5$
<b>Тастыгское</b> <i>Республика Тыва</i>	17,0	1,46	Ta Nb	$\text{Li}_2\text{CO}_3$ LiOH $\text{Ta}_2\text{O}_5$ $\text{Nb}_2\text{O}_5$
<b>Завитинское</b> <i>Читинская обл.</i>	5,8	0,69	Be Ta Nb Sn	Законсервировано 5% BeO концентрат Ta-химконцентрат: 50-55% Ta Nb-химконцентрат: 70% Nb Sn – концентрат: 20% Sn

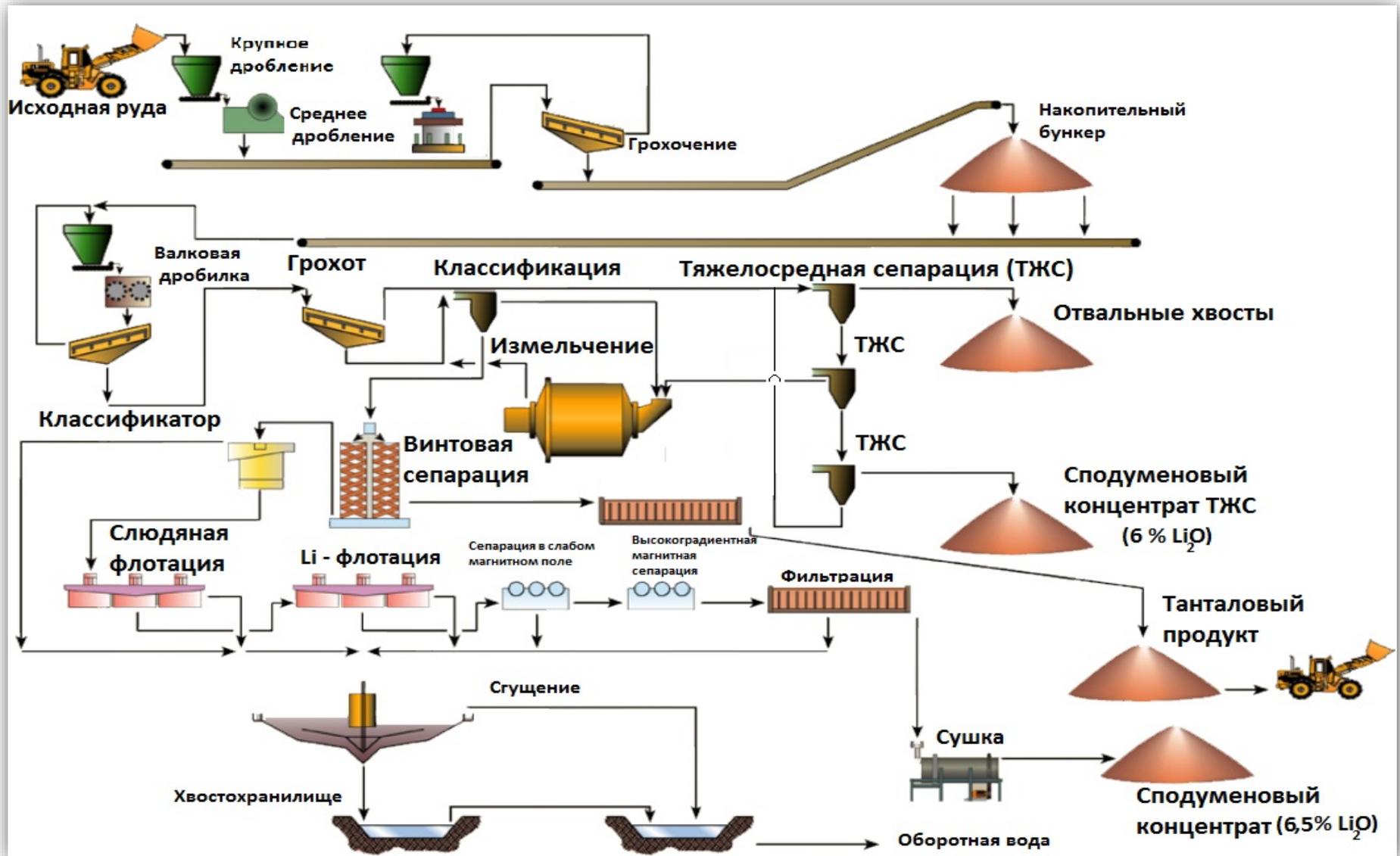
# ПОКАЗАТЕЛИ ТЯЖЕЛОСРЕДНОЙ СЕПАРАЦИИ (ТСС) СПОДУМЕНОВОЙ РУДЫ (Nemaska Lithium Inc)

2-я стадия ТСС	МАССА	СОДЕРЖАНИЕ	РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
	(%)	(% Li <sub>2</sub> O)	(% Li <sub>2</sub> O)
тяжелая фракция 1 (шуд=2,97)	10.9	5.9	37.6
тяжелая фракция 2 (шуд=2,69)	33.9	2.6	52.4
<b>суммарная тяжелая фракция</b>	<b>44.8</b>	<b>3.4</b>	<b>90.0</b>
легкая фракция	55.2	0.3	10.0
<b>ИТОГО</b>	<b>100.0</b>	<b>1.7</b>	<b>100.0</b>

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИТИЯ В ТСС И ПРОЦЕССЕ РАЗДЕЛЕНИЯ В ТЯЖЕЛОЙ ЖИДКОСТИ (ТЖС) НА ПРОБАХ *КОМ. NEMASKA*



# СХЕМА ЦЕПИ АППАРАТОВ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ЛИТИЙ-ТАНТАЛОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ PILGANGOORA (АВСТРАЛИЯ)

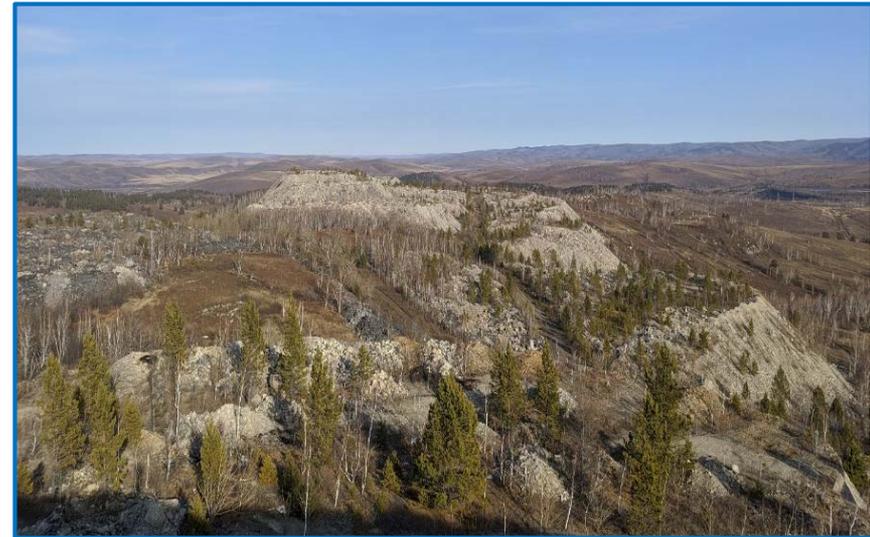


# ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИЕ ОТВАЛЫ ЗАВИТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

- ✓ Разработка Завитинского месторождения началась в 1937 г., на котором помимо основного литиевого извлекались бериллиевый, танталовый, ниобиевый, оловянный и кварц-полевошпатовый концентраты.
- ✓ На Завитинском месторождении на данный момент отработано 52% числящихся балансовых запасов его комплексных руд, однако сложившиеся сложные горно-геологические и гидрологические условия делают невозможным дальнейшую отработку запасов.
- ✓ На протяжении 40 лет с 1951г. формировались отвалы забалансовой руды, которые насчитывают 19 млн т (содержание  $\text{Li}_2\text{O} \sim 0,3\%$ ).



Общий вид затопленного карьера  
с борта отвалов



Общий вид отвалов

# ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ОТВАЛОВ ЗАВИТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

- ✓ Отвалы представляют собой измененные в различной степени пегматиты и сподуменсодержащие аплиты
- ✓ Литий образует собственную минеральную форму – сподумен, в качестве примеси он может присутствовать в слюдах, полевых шпатах, гранате, реже турмалине
- ✓ Сподумен присутствует как в сохранном виде, так и практически полностью разрушенном, замещенном глинистыми минералами

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ИСХОДНОЙ РУДЫ

МИНЕРАЛ	СОДЕРЖАНИЕ, %
Плагиоклаз	43
Кварц	32
Калиевый полевой шпат	12
Слюды (биотит, мусковит, иллит)	9
Сподумен	2,5
Хлорит	1
Прочие: турмалин, глинистые минералы, гранат, апатит, пирит	0,5

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИСХОДНОЙ РУДЫ

КОМПОНЕНТ	СОДЕРЖАНИЕ, %	КОМПОНЕНТ	СОДЕРЖАНИЕ, %
Li <sub>2</sub> O	0,14	K <sub>2</sub> O	2,95
BeO	0,048	CaO	0,68
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0077	TiO <sub>2</sub>	0,12
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0027	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,057
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	1,80	MnO	0,15
Na <sub>2</sub> O	2,90	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,58
MgO	0,29	CuO	0,011
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,40	ZnO	0,013
SiO <sub>2</sub>	68,90	Rb <sub>2</sub> O	0,063
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	SrO	0,016
SO <sub>3</sub>	0,36	BaO	0,054

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТВАЛОВ ЗАВИТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Тяжелосредняя сепарация

Концентрат  
( $\rho > 2,8 \text{ г/см}^3$ )

Промпродукт  
( $2,7 < \rho < 2,8 \text{ г/см}^3$ )

Хвосты  
( $\rho < 2,7 \text{ г/см}^3$ )

Магнитная сепарация

Концентрат:  
немагнитная фракция  
при разделении 1,1 Тл

Декрипитация

$t - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau - 1 \text{ ч}$

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

ПРОДУКТ	Выход, %	Содержание $\text{Li}_2\text{O}$ , %	Извлечение $\text{Li}_2\text{O}$ , %
Концентрат ТСС	1,5	3,17	26,5
Промпродукт ТСС	48,5	0,16	50,5
Хвосты ТСС	50,0	0,08	23,0
Концентрат СМС	0,8	5,02	22,6
Концентрат декрипитации	0,37	6,27	13,5
Исходные отвалы	100,0	0,16	100,0

- ✓ Из отвалов Завитинского месторождения с исходным содержанием оксида лития менее 0,2% **ВОЗМОЖНО** получение 5-6% сподуменового концентрата, пригодного для дальнейшей химико-металлургической переработки;
- ✓ При переработке **1 млн тонн отвалов** по принципиальной схеме годовые затраты составят около **300 млн руб/год** или **35,5 тыс. руб на 1 тонну концентрата** с содержанием  $\text{Li}_2\text{O}$  5%, при выходе концентрата **8 тыс. тонн**

# ПОЛМОСТУНДРОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ	Северо-восточная часть Кольского полуострова Мурманская область, Ловозерский район
СТЕПЕНЬ ОСВОЕНИЯ	Разведанное
ГЕОЛОГО-ПОИСКОВЫЕ И РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ	1954г.; 1956-1960 гг.
КАТЕГОРИЯ ЗАПАСОВ И РЕСУРСОВ	B, C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>
СТАТУС УЧЕТА ЗАПАСОВ	Госрезерв (Протокол ГКЗ №3281 от 09.02.1961г.)
УТВЕРЖДЕННЫЕ ЗАПАСЫ (БАЛАНС+ЗАБАЛАНС)	Запасы руды (баланс) – 28 767 тыс. т; Запасы Li <sub>2</sub> O – 351 747, 8 т. <b>Среднее содержание Li<sub>2</sub>O – 1,22 %</b>
ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТИП	Редкометалльные пегматиты
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТИП РУДЫ	Сподуменовые руды
ПОПУТНЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ КОМПОНЕНТЫ	1119.6 т Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> кат. C <sub>2</sub> (0.004% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 8486.0 т Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> кат. C <sub>2</sub> (0.007% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 8486.0 тыс.т <b>керамическое сырьё</b> (кат. C <sub>2</sub> )



# ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД ПОЛМОСТУНДРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Материал неоднороден представлен в основном фрагментами обломков пород (кварц-сподуменовый пегматит, кварц-полевошпатовый пегматит, гранит-пегматит) и свободными минералами (кварцем, полевыми шпатами, турмалином) в меньшем количестве присутствует слюда, гранат, апатит

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ИСХОДНОЙ РУДЫ

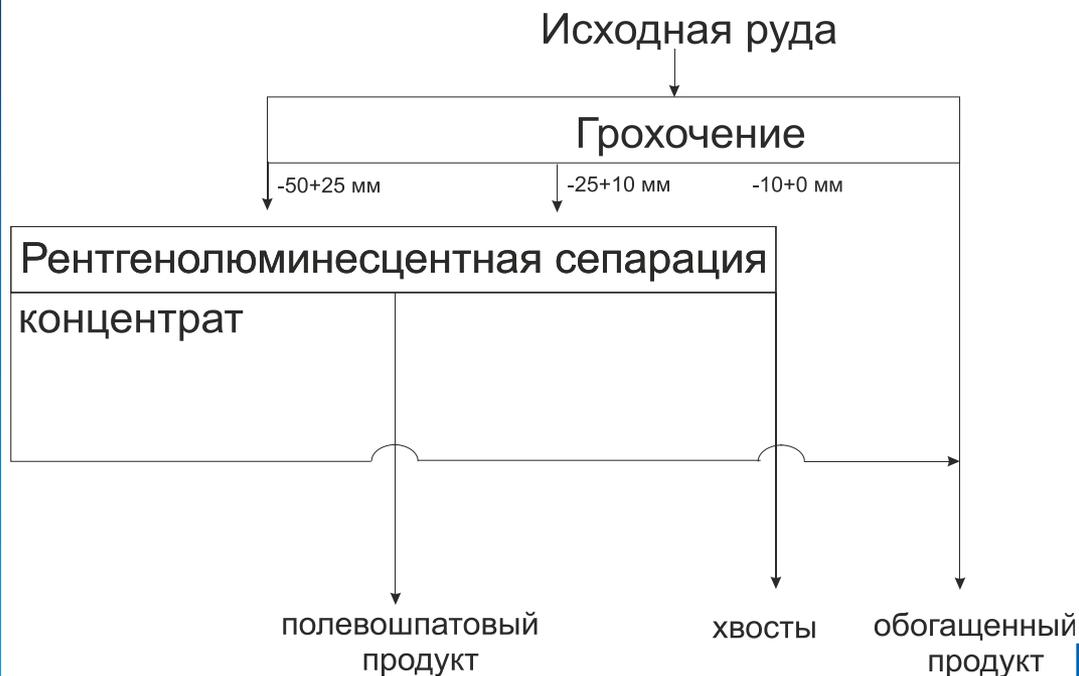
МИНЕРАЛ	СОДЕРЖАНИЕ, %
Кварц	45
Плагиоклаз	22,5
Калиевый полевой шпат	11,5
Сподумен	10
Турмалин	4
Гранат	2,5
Мусковит	2
Апатит	1

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИСХОДНОЙ РУДЫ

КОМПОНЕНТ	СОДЕРЖАНИЕ, %	КОМПОНЕНТ	СОДЕРЖАНИЕ, %
Li <sub>2</sub> O	1,59	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,082
BeO	0,0021	K <sub>2</sub> O	3,86
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0033	CaO	0,27
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0070	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,079
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ	1,02	MnO	0,084
Na <sub>2</sub> O	1,76	ZnO	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,34	Rb <sub>2</sub> O	0,13
SiO <sub>2</sub>	77,67	Сумма	99,9

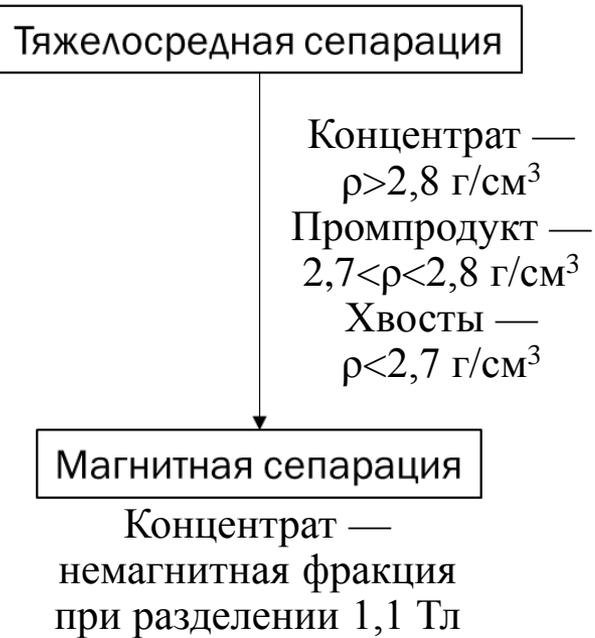
# ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РУД М.ПОЛМОСТУНДРОВСКОЕ

## МЕТОДОМ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ



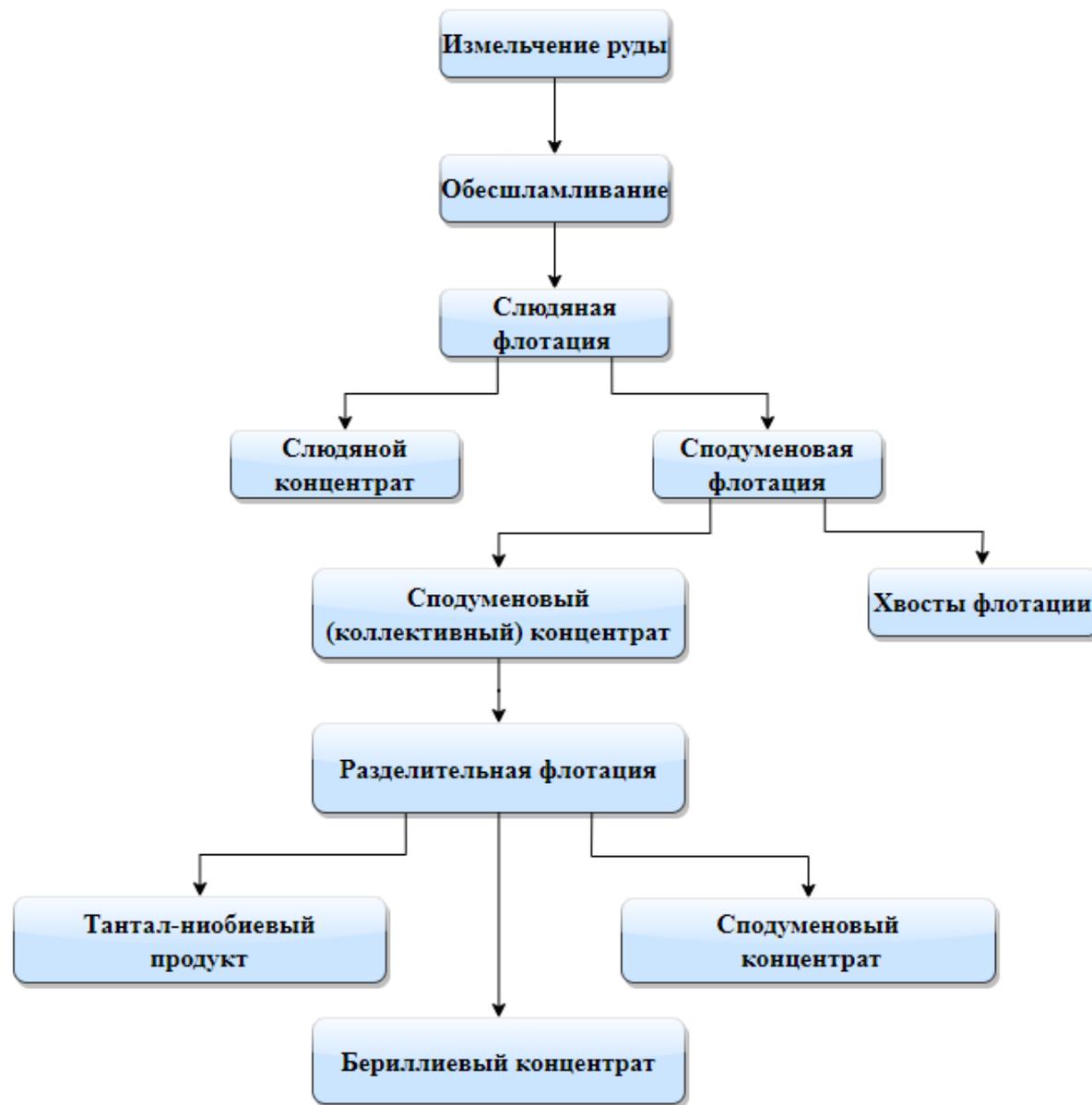
ПРОДУКТ	Выход, %	Содержание Li <sub>2</sub> O, %	Извлечение Li <sub>2</sub> O, %
Обогащенный продукт РЛС	50,96	2,19	92,23
Полевोшпатовый продукт	33,24	0,24	6,59
Хвосты РЛС	15,80	0,09	1,18
Исходная руда	100,0	1,21	100,0

## ГРАВИТАЦИОННО-МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ



ПРОДУКТ	Выход, %	Содержание Li <sub>2</sub> O, %	Извлечение Li <sub>2</sub> O, %
Концентрат ТСС	14,69	6,40	58,1
Промпродукт ТСС	22,73	1,89	26,5
Хвосты ТСС	62,58	0,40	15,4
Концентрат СМС	12,41	6,66*	51,1
Исходная руда	100,0	1,62	100,0

\* в отдельных продуктах до 7,24%



Технологическая схема флотационного обогащения (прямая флотация)

# ПРОВЕРКА АЛЬТЕРНАТИВНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТОДА ВСКРЫТИЯ СПОДУМЕННОГО КОНЦЕНТРАТА

## Химический состав сподуменового концентрата

Содержится, масс. %						
Li <sub>2</sub> O	Rb <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
6,19	0,003	75,20	0,47	0,54	0,42	22,53

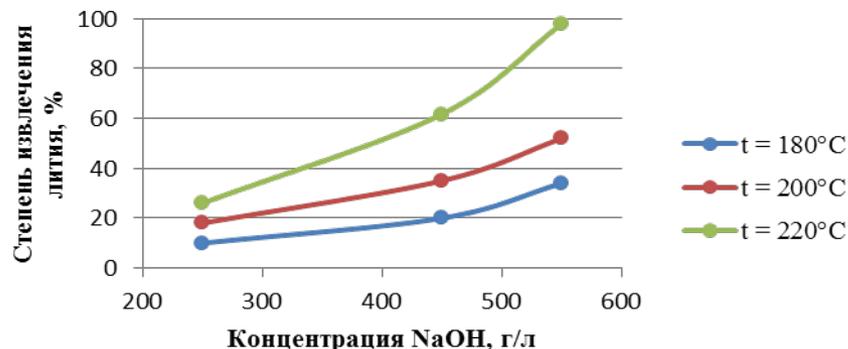


Рисунок 1 Зависимость степени извлечения лития в раствор от концентрации и температуры выщелачивания

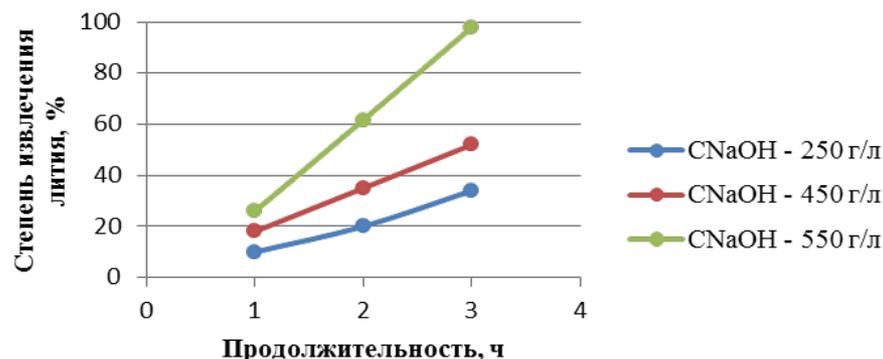


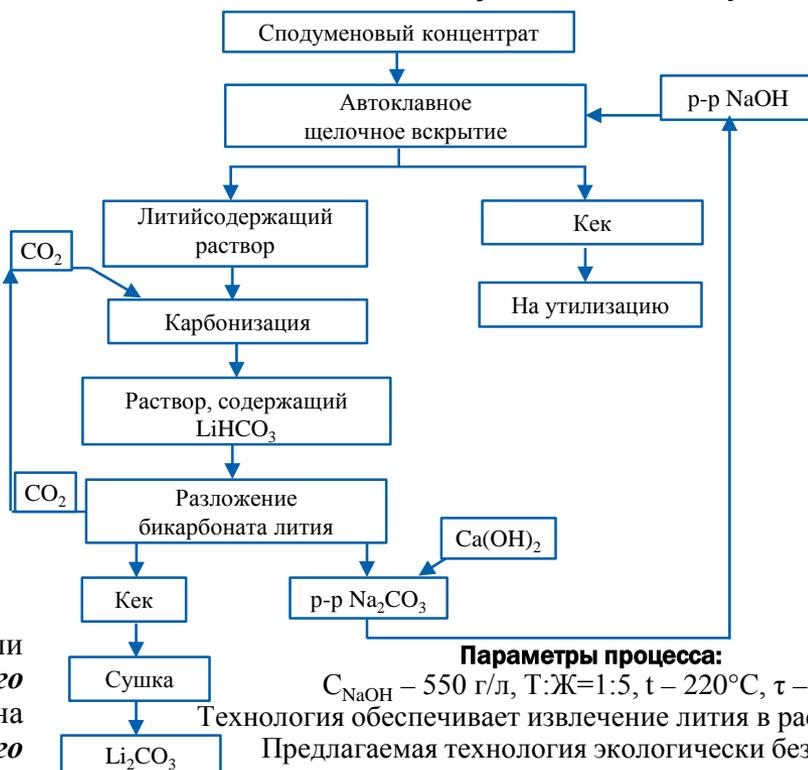
Рисунок 2 Зависимость степени извлечения лития в раствор от концентрации и продолжительности выщелачивания

Проведенные экспериментальные исследования показали перспективность использования низкотемпературного метода вскрытия сподуменового концентрата, основанного на щелочном автоклавном выщелачивании и исключаящего предварительную декрипитацию сподуменового концентрата.

## Минеральный состав сподуменового концентрата и кека от вскрытия

Минерал	Содержание, мас. %	
	Исходный концентрат	Кек от вскрытия
Сподумен	78	2
Содалит	–	98
Кварц	11	–
Микроклин	2,5	–
Альбит	2,5	–
Хлорит	5	–

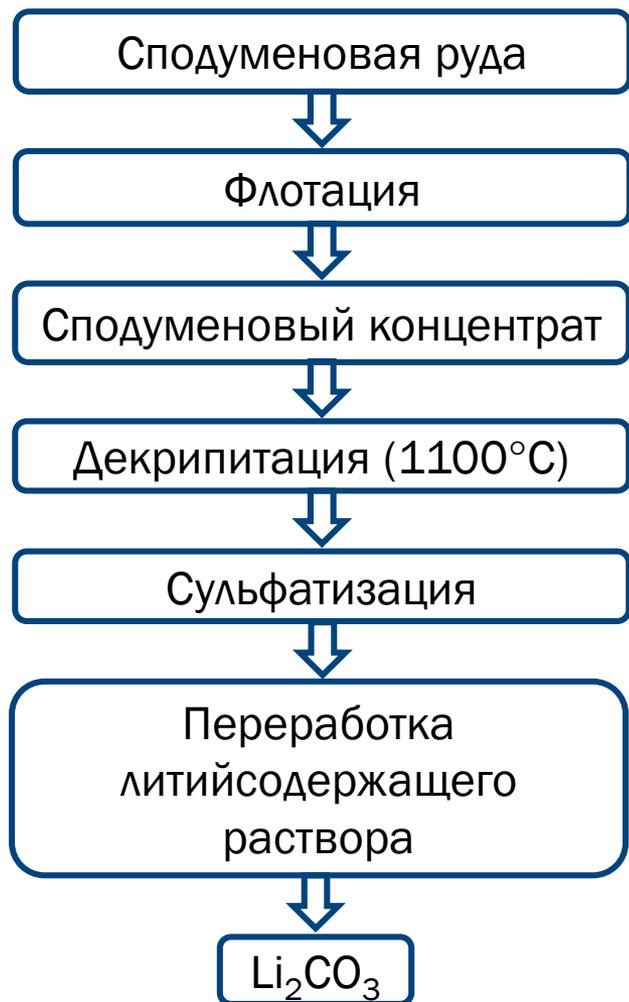
## Принципиальная технологическая схема автоклавного щелочного выщелачивания сподуменового концентрата



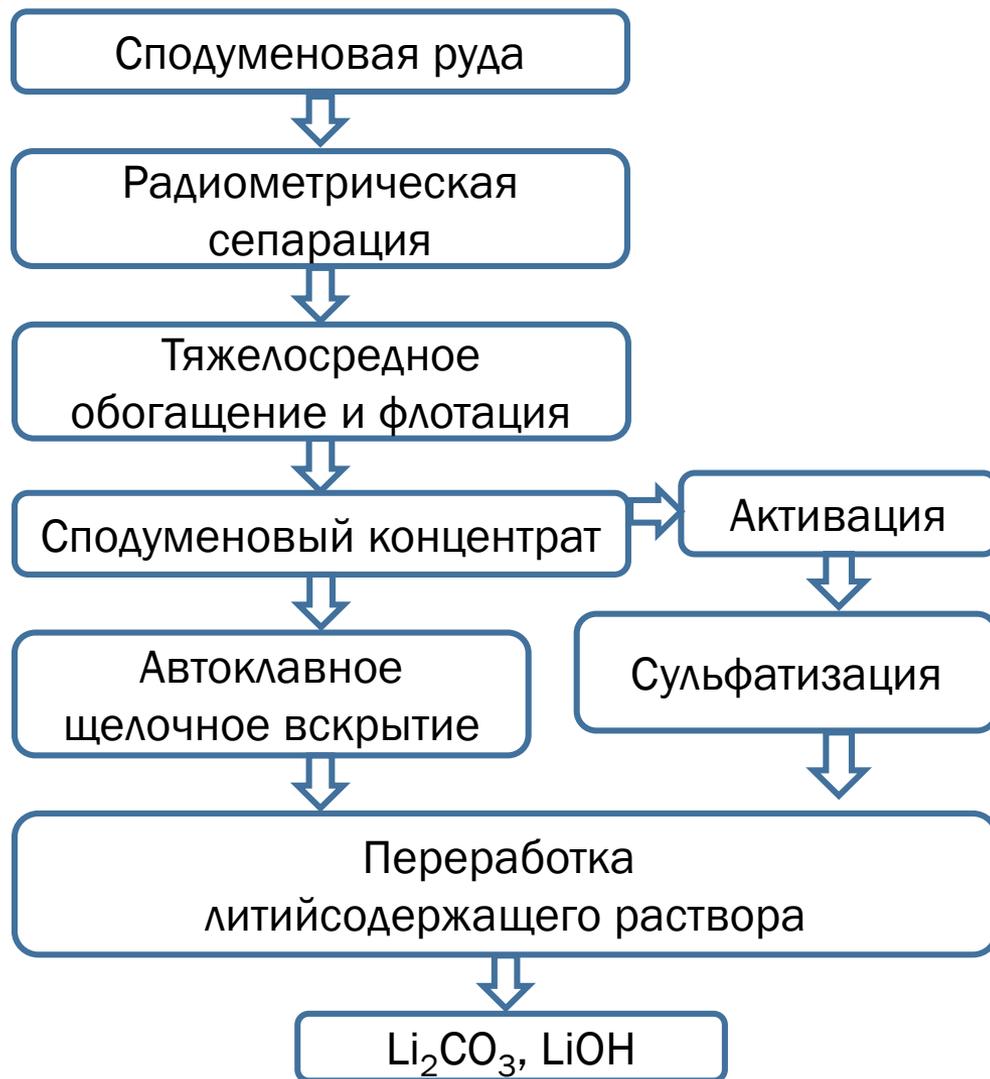
Технология обеспечивает извлечение лития в раствор на **98%**. Предлагаемая технология экологически безопасна и предусматривает регенерацию вскрывающего реагента.

# ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТИЕВЫХ СПОДУМЕНОВЫХ РУД

Традиционная технологическая схема переработки литиевой руды



Принципиальная технологическая схема переработки литиевой руды (ФГБУ «ВИМС»)



# ОБОГАЩЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ БЕРИЛЛИЕВЫХ РУД (БЕРИЛЛИЙ-ФЛЮОРИТ, РЗМ-БЕРИЛЛИЙ-ЛИТИЙ)

- ✓ Для создания собственного бериллиевого производства в России из отечественного рудного сырья необходимо вовлечение в переработку наиболее сложных в технологическом отношении руд, требующих решения проблемы селективного флотационного разделения слагающих их специфических минеральных комплексов.
- ✓ Наиболее перспективными являются **бериллий-флюоритовые руды в апокарбонатных метасоматитах**. Они представлены рудами фенакит-бертрандитового типа, отличающимися высоким содержанием бериллия и наличием сопутствующего ценного компонента — флюорита.
- ✓ Определенный интерес также представляют **руды редкоземельно-бериллиевого типа в полевошпатовых метасоматитах**. Руды содержат наряду с редкоземельными металлами бериллий и литий и расширяют сырьевую базу для производства критических металлов.



# ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ПРОБ БЕРИЛЛИЕВО-ФЛЮОРИТОВОЙ РУДЫ

Химический компонент	Содержание, масс. %		Минерал	Содержание, масс. %	
	Проба 1	Проба 2		Проба 1	Проба 2
BeO	1,22	0,72	Флюорит	32,5	20,6
SiO <sub>2</sub>	39,42	40,15	Фенакит / Берtrandит	2,5	1,6
K <sub>2</sub> O	2,9	2,90	Полевые шпаты	31,6	38,0
Na <sub>2</sub> O	1,61	2,17	Кварц	8,4	10,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,56	10,84	Карбонаты (кальцит, доломит)	8,5	12,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,29	4,23	Везувиан	9,3	10,4
FeO	1,18	1,59	Сульфиды	2,9	2,0
MgO	1,99	2,32	Слюда	0,8	1,0
MnO	0,24	0,22	Апатит	0,5	0,4
CaO	28,64	24,24	Гидроксиды Fe	2,2	3,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,16	Прочие	0,8	1,0
п.п.п.	5,1	6,57	<b>ИТОГО</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
CaF <sub>2</sub>	32,99	20,61			
CaCO <sub>3</sub>	8,28	11,59			
Собщ.	1,68	1,10			
<b>ИТОГО</b>	<b>97,34</b>	<b>96,11</b>			

При отнесении руд к собственно флюоритовым их можно классифицировать на:  
 рядовая флюоритовая руда (КМ\* 3,9) – ПРОБА 1  
 труднообогатимая карбонатно-флюоритовая руда (КМ\* 1,8) – ПРОБА 2

\* карбонатный модуль:  $CaF_2/CaCO_3$

# ТРУДНОРАЗДЕЛЯЕМЫЙ КОМПЛЕКС МИНЕРАЛОВ



Исходное сырье для получения бериллиевого и флюоритового концентратов (крупность -100 мм)

**изученные пробы:**  
0,72–1,22% BeO, 20–33,0% CaF<sub>2</sub>

**по месторождению:**  
1,19% BeO , 24,6% β(CaF<sub>2</sub> )



Дробленая руда для флотационных исследований (-2,0 мм)

**Главные рудные минералы:** фенакит — Be<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>] содержит 43,67 % BeO (~96% BeO)  
берtrandит — Be<sub>4</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>](OH)<sub>2</sub> содержит 42,02% BeO  
**Попутный минерал:** флюорит — CaF<sub>2</sub>

**Породообразующие минералы:**



карбонаты (кальцит — CaCO<sub>3</sub>, доломит — CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)  
натриевые полевые шпаты — Na[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>]  
кальциевые полевые шпаты — Ca[Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]  
калиевые полевые шпаты — K[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>].  
кварц — SiO<sub>2</sub>  
везувиан\* (сложный островной силикат кальция и алюминия): Ca<sub>10</sub>(Mg,Fe)<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>[OH<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>5</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>2</sub>]  
\*технологические свойства недостаточно изучены

## ОСНОВНЫЕ РЕАГЕНТЫ

**ТРАДИЦИОННЫЕ РЕАГЕНТЫ:**  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ , стекло натриевое жидкое (ЖС), триполифосфат натрия (ТПФ); собиратели — бутиловый ксантогенат калия (БКХ) и кислоты жирные талловые (ЖКТМ); пенообразователь — оксанол Т-92 (этоксилат алифатических спиртов фракции  $\text{C}_8 - \text{C}_{10}$ ). На операциях сгущения использован: Praestol 2530.

**НОВЫЙ СОБИРАТЕЛЬ:** реагент ФН6Б из класса диалкилфенилполиэтиленгликолевых эфиров фосфорной кислоты. С применением собирателей этого класса разработаны эффективные технологические режимы обогащения флюоритовых, редкометальных, и железных руд.

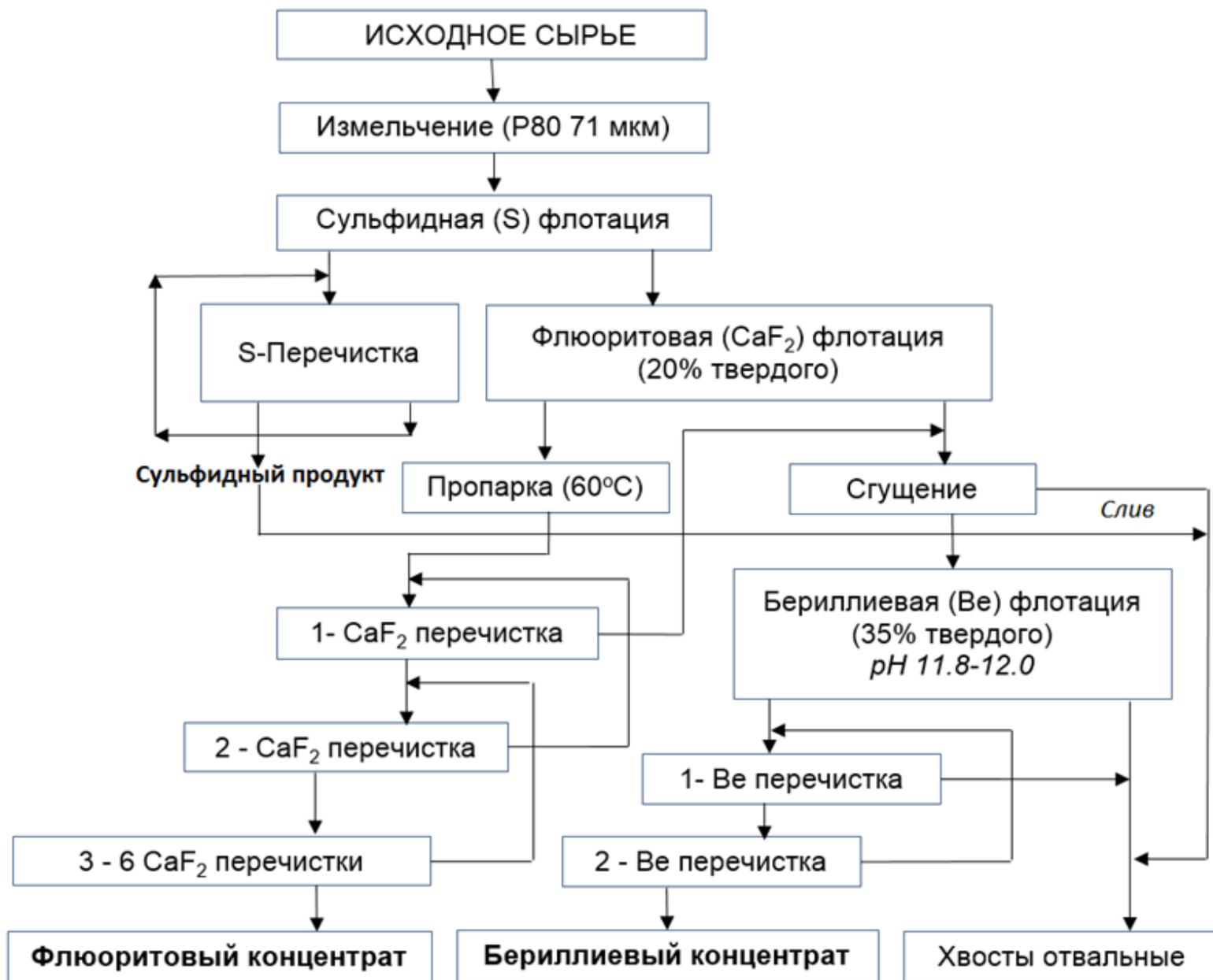
## ТРИ ЦИКЛА ФЛОТАЦИИ

**СУЛЬФИДНАЯ ФЛОТАЦИЯ** — традиционный режим с использованием  $\text{Na}_2\text{S}$ , БКХ и Т-92;

**ФЛЮОРИТОВЫЙ ЦИКЛ** — основная флотация флюорита с использованием ЖС и ФН6Б, пропарка при  $60^\circ\text{C}$  пенного продукта основной флотации и 5–6 его перечисток

**БЕРИЛЛИЕВЫЙ ЦИКЛ** — жирнокислотный собиратель, связывание кальция и магния во флотационной пульпе комплексом регуляторов  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  и ТПФ при рН пульпы  $\sim 11-12,0$

# СХЕМА ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВО-ФЛЮОРИТОВЫХ РУД



# ПОКАЗАТЕЛИ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВО-ФЛЮОРИТОВЫХ РУД, %

ПРОДУКТЫ	Выход	CaF <sub>2</sub>		BeO		CaCO <sub>3</sub>		S <sub>общ.</sub>	
		Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение	Содержание	Извлечение
<b>Проба 1</b>									
Сульфидный продукт	4,4	12,66	1,7	0,318	1,2	3,32	1,80	32,500	85,1
CaF <sub>2</sub> -концентрат (5 перечисток)	28,3	97,50	84,9	0,080	1,5	0,80	2,85	0,09	1,5
Питание флотации Be	67,3	6,44	13,4	1,670	97,3	11,25	95,35	0,334	13,4
Be- концентрат	9,3	15,66	4,5	11,060	88,9	13,04	15,30	0,080	0,5
Отвальные хвосты	58,0	4,96	8,9	0,167	8,4	10,97	80,05	0,374	12,9
Исходная руда	100,0	32,48	100,0	1,160	100,0	7,95	100,0	1,680	100,0
<b>Проба 2</b>									
Сульфидный продукт	3,8	9,9	1,8	0,234	1,2	5,75	2,1	24,200	83,6
CaF <sub>2</sub> -концентрат (6 перечисток)	15,2	96,8	72,0	0,070	1,5	1,50	2,2	0,080	1,1
Питание флотации Be	81,0	6,6	26,2	0,875	97,3	12,18	95,7	0,203	15,3
Be -концентрат	6,0	24,7	7,2	10,250	84,45	10,13	5,9	0,070	0,4
Отвальные хвосты	75,0	5,2	19,0	0,125	12,85	12,34	89,8	0,219	14,9
Исходная руда	100,0	20,47	100,0	0,728	100,0	10,31	100,0	1,100	100,0

## БЕРИЛЛИЕВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

КБФ ТУ 07.29.19.292-012-07625358-2017



Полученные концентраты пригодны для переработки по *автоклавно-мембранной технологии* с получением гидроксида бериллия, разработанной ВНИИХТом: автоклавное вскрытие; разделение технологической суспензии; очистка растворов от примесей; мембранный электродиализ щелочных растворов; гидролиз бериллата натрия с выделением гидроксида бериллия

## ФЛЮОРИТОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

ФФ-95А, ФФ-97А по ГОСТ 29219-91



Пригоден для использования в производстве электролитического алюминия, плавиковой кислоты, фтористых солей (в т.ч. особо чистых), безводного фтористого водорода, стеклянных термостойких труб, стеклошариков, стекловолокна и высококачественных силикатных эмалей

# ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ПРОБ РЕДКОЗЕМЕЛЬНО-БЕРИЛЛИЕВОЙ РУДЫ

Химический компонент	Содержание, масс. %	Минерал	Содержание, масс. %
ΣP3O	1,50	Бастнезит	2,0
BeO	0,34	Ортит	0,4
Li <sub>2</sub> O	0,25	Гadolлит	0,1
SiO <sub>2</sub>	59,65	Лейкофан	1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,26	Берtrandит	0,5
Na <sub>2</sub> O	6,92	Фенакит	0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,81	Плагноклаз	45,2
MgO	5,48	Амфибол	16,0
CaO	4,35	Монтмориллонит	5,2
MnO	1,19	Пироксен (диопсид)	7,0
F	0,79	Калиевый полевой шпат	4,0
TiO <sub>2</sub>	0,66	Кварц	10,0
K <sub>2</sub> O	0,52	Слюда	2,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	Флюорит	0,7
Y	0,094	Кальцит	1,0
U	0,010	Апатит	0,3
Th	0,0042	Сидерит	3,0
Sc	0,0012	Гетит	1,0
S <sub>общ.</sub>	< 0,02	<b>ИТОГО</b>	<b>100,0</b>
п.п.п.	4,11		
<b>ИТОГО</b>	<b>100,00</b>		

# ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ

Новый промышленно-генетический тип редкометального оруденения, связанный с щелочным метасоматозом пород-диабазов, технология переработки не разработана

## Распределение BeO по минералам руды

МИНЕРАЛ	BeO в минерале, %	Распределение BeO, %
Берtrandит-бериллит	40,0	42,96
Лейкофан	10,4	37,98
Фенакит	42,0	7,03
Гельвин	12,0	1,43
Гадолинит	7,4	1,19
Бастнезит	0,10	0,50
Кварц	0,010	0,58
Полевые шпаты	0,07	7,25
Амфиболы	0,020	0,69
Пироксены	0,035	0,35
Слюды	0,009	0,03

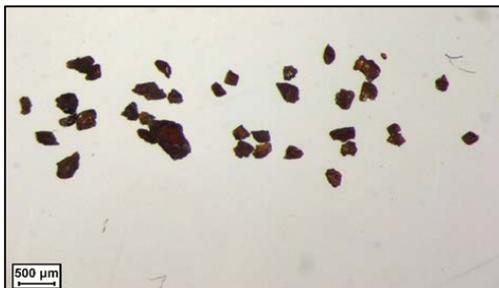
## Распределение $\Sigma PZO$ по минералам руды

МИНЕРАЛЫ	$\Sigma PZO$ в Минерале, %	Распределение по минералам, %
Бастнезит	52,0	57,37
Бритолит	48,2	11,58
Гадолинит	49,0	1,05
Ортит	20,0	1,58
Породообразующие	-	28,42

- ✓ **ЛЕЙКОФАН** ( $NaCaBeSi_2O_6F$ ): редкий минерал из группы силикатов, содержащий Be; кристаллизуется в ромбической системе, в бисфеноидальном классе; технологические свойства не изучены
- ✓ **ГЕЛЬВИН** ( $Mn_4(Be_3Si_3O_{12})S$ ): минерал подкласса каркасных силикатов; технологические свойства не достаточно изучены
- ✓ **БАСТНЕСИТ**: один из семейства трех карбонатно-фторидных минералов, которое включает бастнесит-(Ce) с формулой  $(Ce,La)CO_3F$ , бастнесит-(La) с формулой  $(La,Ce)CO_3F$  и бастнесит-(Y) с формулой  $(Y,Ce)CO_3F$
- ✓ **ОРТИТ** ( $Ca, Ce, La, )_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$ : островной силикат редкоземельных элементов
- ✓ **ГАДОЛИНИТ** ( $Ce, La, Nd, Y)_2FeBe_2Si_2O_{10}$  ) состоит из силикатов церия, лантана, неодима, иттрия, бериллия и железа
- ✓ **ЛИТИЙ** связан с амфиболом, его селективное концентрирование невозможно

# ОПТИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ

## БАСТНЕЗИТ



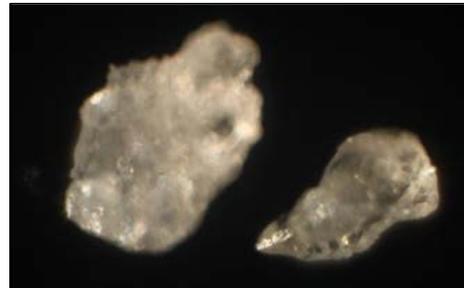
присутствует в виде отдельных уплощённых кристаллов или зернистых масс в виде агрегатов размером до 0,5 мм, сформированные зернами от 0,005 до 0,03 мм

## ОРТИТ



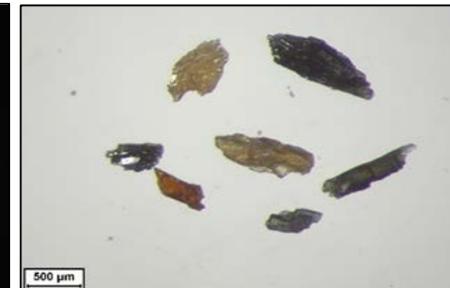
встречается в виде самостоятельных выделений неправильной формы, черного цвета размером от 0,04 до 0,3 мм

## ЛЕЙКОФАН



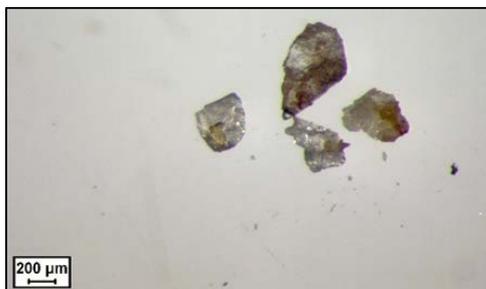
неравномерная рассеянная вкрапленность в кварце, полево шпате, иногда амфиболе; размер зерен не превышает 0,04 мм

## АМФИБОЛ



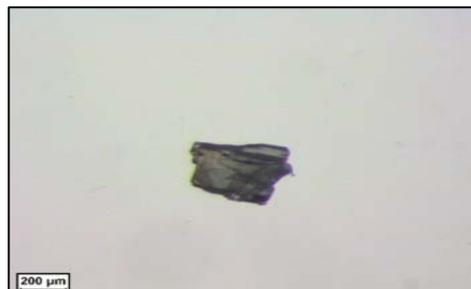
представлен различными формами, часть можно отнести к ликеиту  $(Ca_{0,04}Fe_2H_2Li_{0,83}Mg_{2,17}Na_{2,96}O_{24}Si_8)$ , в состав которого входит литий; образует агрегаты из кристаллов удлиненно призматической, пластинчатой, шестоватой, иногда таблитчатой и ксеноморфной формы

## ПЛАГИОКЛАЗ



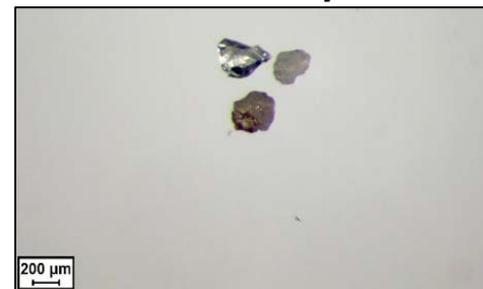
является главным породообразующим минералом, представлен альбитом; размер зёрен от 0,02 до 1 мм

## ПИРОКСЕН



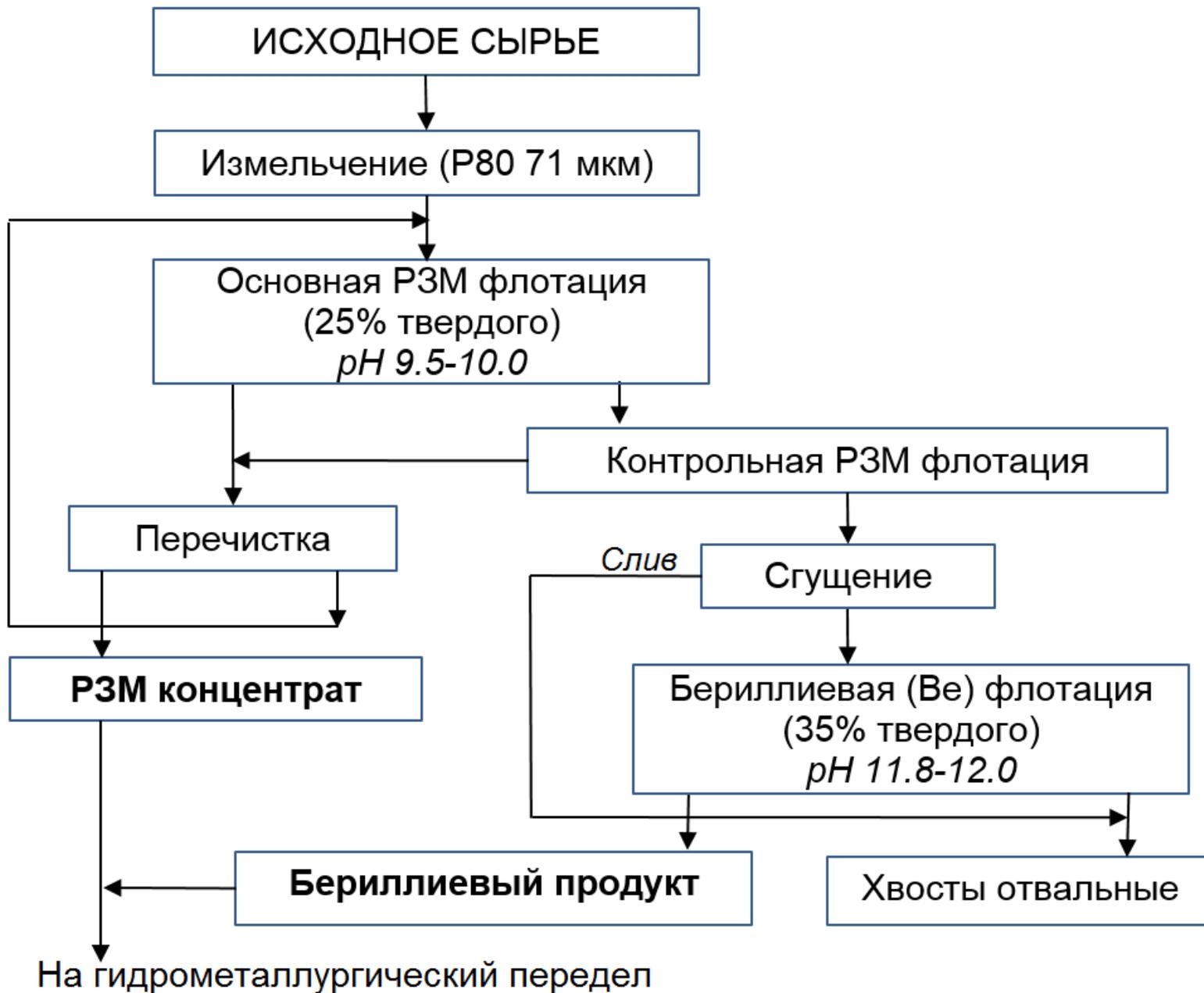
отмечается в виде призматических кристаллов светло-зелёного цвета; размер зерен изменяется от 0,04 до 0,5 мм

## КВАРЦ



встречается в виде прозрачных изометричных зёрен размером от 0,04 до 1,5 мм

# СХЕМА ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНО-БЕРИЛЛИЕВОЙ РУДЫ



# ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**РЗМ-ЦИКЛ:** основная флотация - реагенты:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , ЖС, комбинированный собиратель (КС) на основе ФНББ и ЖКТМ - 0.2;

контрольная флотация: КС - 0.1; в РЗМ перерешивку - ЖС.

**БЕРИЛЛИЕВЫЙ ЦИКЛ:** NaOH; ТПФ; ЖКТМ.

## ПОКАЗАТЕЛИ ОБОГАЩЕНИЯ

Продукт	Выход	ΣРЗО		BeO		Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Li <sub>2</sub> O	
		Сод-е	Извл-е	Сод-е	Извл-е	Сод-е	Извл-е	Сод-е	Извл-е
Флотационный редкоземельный концентрат	11,07	11,21	82,49	0,77	25,07	0,48	44,89	0,086	3,81
Бериллиевый продукт	14,56	0,60	5,79	0,55	23,55	0,079	9,63	0,50	29,12
<b>Σ Коллективный концентрат на переработку</b>	<b>25,63</b>	<b>5,18</b>	<b>88,27</b>	<b>0,65</b>	<b>48,62</b>	<b>0,25</b>	<b>54,53</b>	<b>0,32</b>	<b>32,93</b>
Хвосты обогащения	74,37	0,24	11,73	0,23	51,38	0,07	45,47	0,23	67,07
Исходная руда	100,0	1,505	100,0	0,34	100,0	0,119	100,0	0,25	100,0

Опробована гидрометаллургическая схема переработки коллективного концентрата, включающая сульфатизацию, водное выщелачивание сульфатной массы, при котором в раствор переходит основная масса лития и бериллия, а РЗЭ остаются в кеке выщелачивания.

Получены: гидроксид бериллия (BeO-16,5%), коллективный редкоземельный концентрат ( $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$  45,6%), карбонат лития (Li<sub>2</sub>O-99,0%) с извлечением от концентрата 74,4%; 76,0% и 75,2%, соответственно.

В результате проведенных исследований с использованием традиционных и новых флотационных реагентов разработаны:

✓ технология флотации бериллиево-флюоритовых руд с получением высокосортных флюоритовых концентратов (марка ФФ-95А, марка ФФ-97А) и бериллиевых концентратов высшего сорта при изменении качества исходного сырья;

✓ технология обогащения редкоземельно-бериллиевых руд, включающая новый эффективный режим редкоземельной флотации с получением коллективного редкоземельно-бериллиево-литиевого концентрата, пригодного для последующей гидрометаллургической переработки с получением товарной продукции всех содержащихся в нем редких металлов.

## Основные месторождения редкометалльных руд

Месторождение (субъект РФ)	Степень освоения, недропользователь	Запасы на 01.01.2023 г. категорий, тыс. т $Nb_2O_5$		Доля в балансовых запасах РФ, %	Сод-е* $Nb_2O_5$ в рудах, %
		A+B+C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		
<b>СОБСТВЕННО НИОБИЕВЫЕ, в т ч.:</b>		<b>2 868,6</b>	<b>1 713,5</b>	<b>53,6</b>	<b>0,15–4,2</b>
Белозиминское (Иркутская обл.)	<i>не передано в освоение</i>	1 326,1	1 001,8	27,2	0,35
Томторское * (Респ. Саха (Якутия))	<i>подготавливаемые к освоению, ООО «Восток Инжиниринг»</i>	1 047	330,4	16,1	4,2
Большеатагнинское (Иркутская обл.)	<i>Разведываемые, АО «СТ Элементы»</i>	362,5	45	4,8	0,98
Чуктуконское (Красноярский край)	<i>не передано в освоение</i>	109	334,1	5,2	0,61
<b>НИОБИЙ-ТАНТАЛОВЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ, в т ч.:</b>		<b>1 778,1</b>	<b>1 513,2</b>	<b>38,5</b>	<b>0,09–0,44</b>
Ловозерское ** (Мурманская обл.)	<i>разрабатываемые, ООО «Ловозерский ГОК»</i>	567	1 013,7	18,5	0,24
Улуг-Танзекское (Республика Тыва)	<i>не передано в освоение</i>	711	358,6	12,5	0,15
Катугинское (Забайкальский край)	<i>не передано в освоение</i>	473,4	135,5	7,1	0,35
<b>СОБСТВЕННО ТАНТАЛОВЫЕ, в т ч.:</b>		<b>146,9</b>	<b>58,3</b>	<b>2,4</b>	<b>0,003–0,27</b>
Зашихинское *** (Иркутская обл.)	<i>подготавливаемые к освоению, ЗАО «Техноинвестальянс»</i>	126,3	39,5	1,9	0,27
<b>НИОБИЙСОДЕРЖАЩИЕ</b>		<b>137,8</b>	<b>336</b>	<b>5,5</b>	<b>&lt;0,02</b>
<b>Всего по РФ</b>		<b>4 931,4</b>	<b>3 621</b>	<b>—</b>	<b>0,19</b>

Распределение  
запасов ниобия между  
субъектами РФ  
(кол-во месторождений)

Северо-Западный ФО

11

Уральский ФО

5

Сибирский ФО

14

Дальневосточный ФО

11

Σ балансовые запасы:

**8 552,4 тыс.т  $Nb_2O_5$**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ



**Поликомпонентный** (комплексный) характер рудного сырья



**Сложный** вещественный состав руд



**Радиоактивность** рудного сырья



**Развернутые многостадийные технологические процессы:**

- ✓ *обогажительный передел* (циклы предобогащения, циклы глубокого обогащения, доводочные операции)
- ✓ *химико-металлургический передел*
  - ✓ (гидро- и пирометаллургические процессы)
- ✓ *многоступенчатые очистные узлы, сложные газо- и пылеулавливающие системы, масштабные площадки для отходного хозяйства*



Как извлечь ниобий и попутные компоненты?



Целесообразно ли извлекать весь спектр сопутствующих ниобию компонентов



Будет ли ликвиден спектр попутной продукции (кроме ниобиевой)



Строгое соблюдение норм радиационной безопасности в производственном процессе



Необходимость введения в технологическую цепочку стадии дезактивации продуктов передела



Какой объем и категория радиоактивных отходов могут быть получены при промышленной обработке месторождения



Необходимость организации крупномасштабной производственной площадки



Будет ли производство рентабельным

# М. БЕЛОЗИМИНСКОЕ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

## Минеральный состав, масс.%

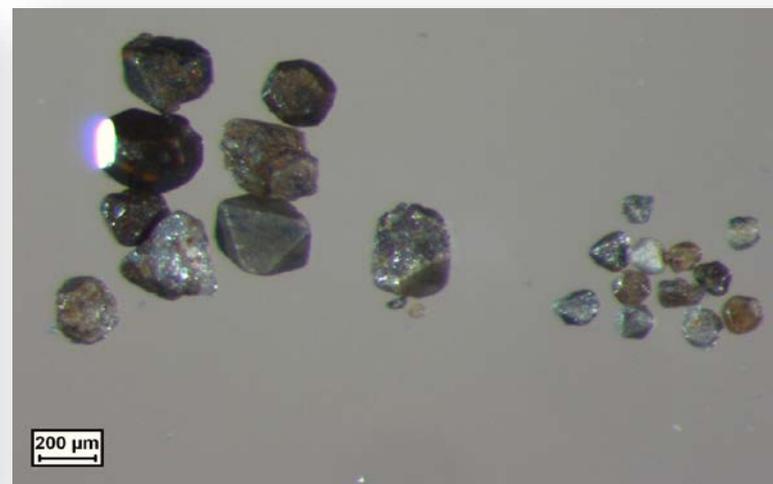
Минерал	Содержание, %
Пирохлор	0,27
Колумбитизированный пирохлор	0,81
Монацит	1,29
Циркон	0,03
Ильменит	0,09
Магнетит	19,05
Гидроксиды железа	8,74
Карбонаты	1,98
Апатит	42,6
Актинолит	1,68
Пироксен	0,02
Гидрослюда	3,51
Полевой шпат	10,42

## Особенности рудного сырья

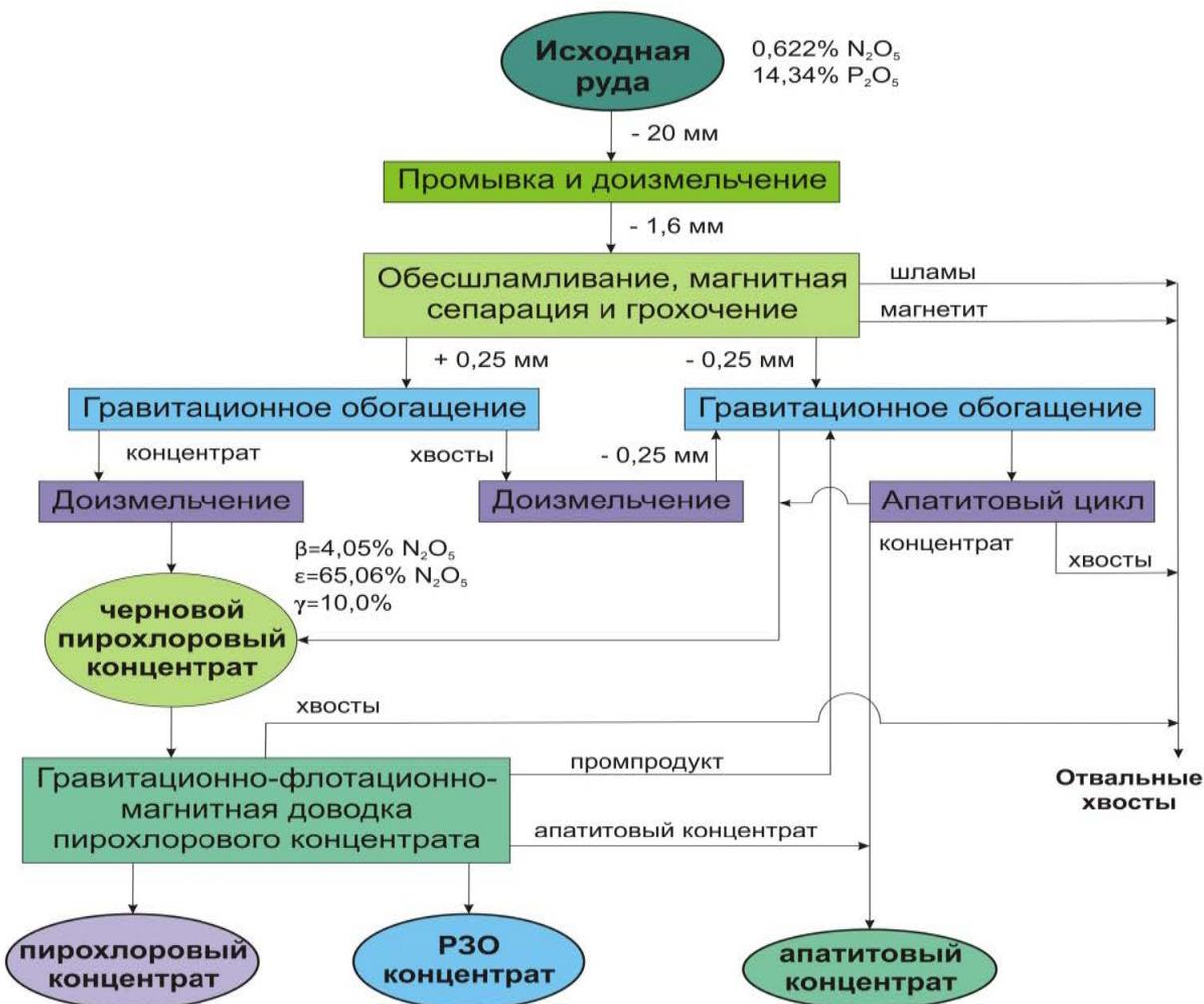
- кора выветривания карбонатитов;
- высокое содержание апатита;
- колумбитизированный пирохлор;
- наличие четко индивидуализированных зерен пирохлора

## Химический состав, масс.%

Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	∑TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Th	U	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO
0,622	0,85	0,028	0,0066	0,014	0,0041	31,0	14,34	5,37	30,4	5,78



# М. БЕЛОЗИМИНСКОЕ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)



Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Пирохлоровый концентрат	0,8	<b>40,0</b>	1,0	0,64	55,3	0,06	0,65
Апатитовый концентрат	22,6	0,2	<b>38,0</b>	0,85	7,28	60,0	22,64
РЗ-концентрат	0,5	4,5	6,5	<b>46,0</b>	3,76	0,24	28,14

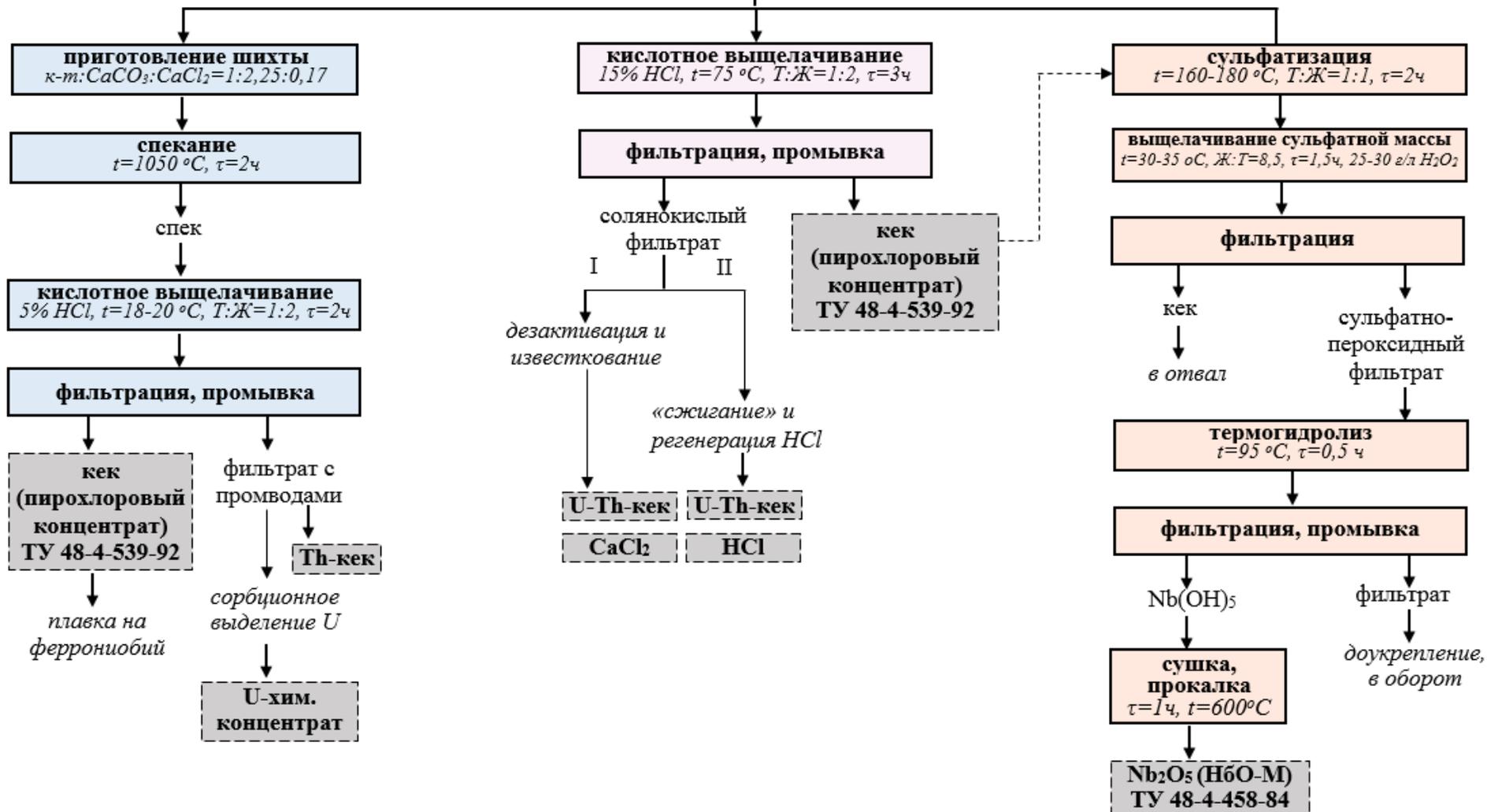
# М. БЕЛОЗИМИНСКОЕ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

термохимическая технология

обесфосфоривание  
(технология кислотной доводки)

сульфатизация

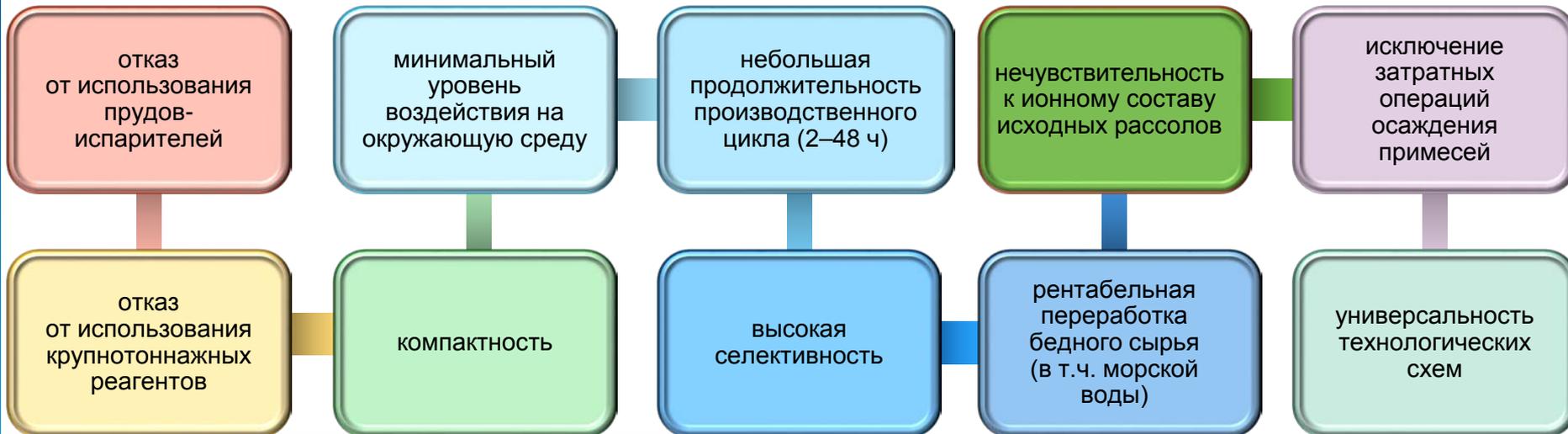
пирохлоровый концентрат  
крупность -0,074мм



# ПРОРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ (ТЕХНОЛОГИИ DLE (Direct Lithium Extraction))

## ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОЛОГИЙ DLE

главное преимущество: прямое селективное извлечение лития из растворов всех типов



**Расширение ресурсной базы лития:**  
снижение бортового содержания лития в растворах и рассолах с 300 мг/л Li до 1–10 мг/л Li

**Легкость масштабирования:**  
снижение капитальных затрат на сооружение предприятий

**Независимость от географического фактора ("литиевый суверенитет"):**  
предприятия могут сооружаться везде, где имеются литийсодержащие рассолы

# ОСНОВНЫЕ СТАДИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА DLE

<b>1. ПОДГОТОВКА</b> исходных растворов (осветление и фильтрация)	сорбционная очистка исходного раствора от элементов-примесей (Ca, Mg, Fe и др.)
<b>2. ИОНООБМЕННОЕ УМЯГЧЕНИЕ</b> раствора	необязательна при использовании гиперселективных сорбентов и наномембран
<b>3. СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ Li</b> (мембранное, ионообменное, экстракционное)	обратноосмотическое концентрирование Li
<b>4. Тонкая ОЧИСТКА</b> концентрированного Li-содержащего раствора (элюата, реэкстракта, пермеата)	совмещение очистки с процессами упаривания и/или сорбции-десорбции (экстракции-реэкстракции)
<b>5. ПРОИЗВОДСТВО ТОВАРНЫХ ПРОДУКТОВ ЛИТИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ ЧИСТОТЫ</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- осаждение Li в форме нерастворимых солей (карбоната, фосфата, фторида)</li><li>- электролиз с получением LiOH·H<sub>2</sub>O</li><li>- концентрированный раствор LiCl или сухой LiCl</li></ul>

В процессах DLE не используются токсичные реагенты

Отработанные растворы закачивается обратно в геотермальный горизонт

Отработанные растворы горнодобывающих предприятий направляются в гидрометаллургическую цепочку

# DLE: СОРБЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ЛИТИЯ

## Сорбционный метод — наиболее отработанная технология DLE

СЕЛЕКТИВНАЯ СОРБЦИЯ ЛИТИЯ  
ВОЗМОЖНА ТОЛЬКО ПУТЕМ СЕЛЕКЦИИ  
ПО РАЗМЕРУ (ЭФФЕКТ ИОННОГО СИТА),  
ЧТО ЛЕЖИТ В ОСНОВЕ ДЕЙСТВИЯ:

- ✓ ЛИТИЙ-СЕЛЕКТИВНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ;
- ✓ ИОНИТОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ (ИМР)

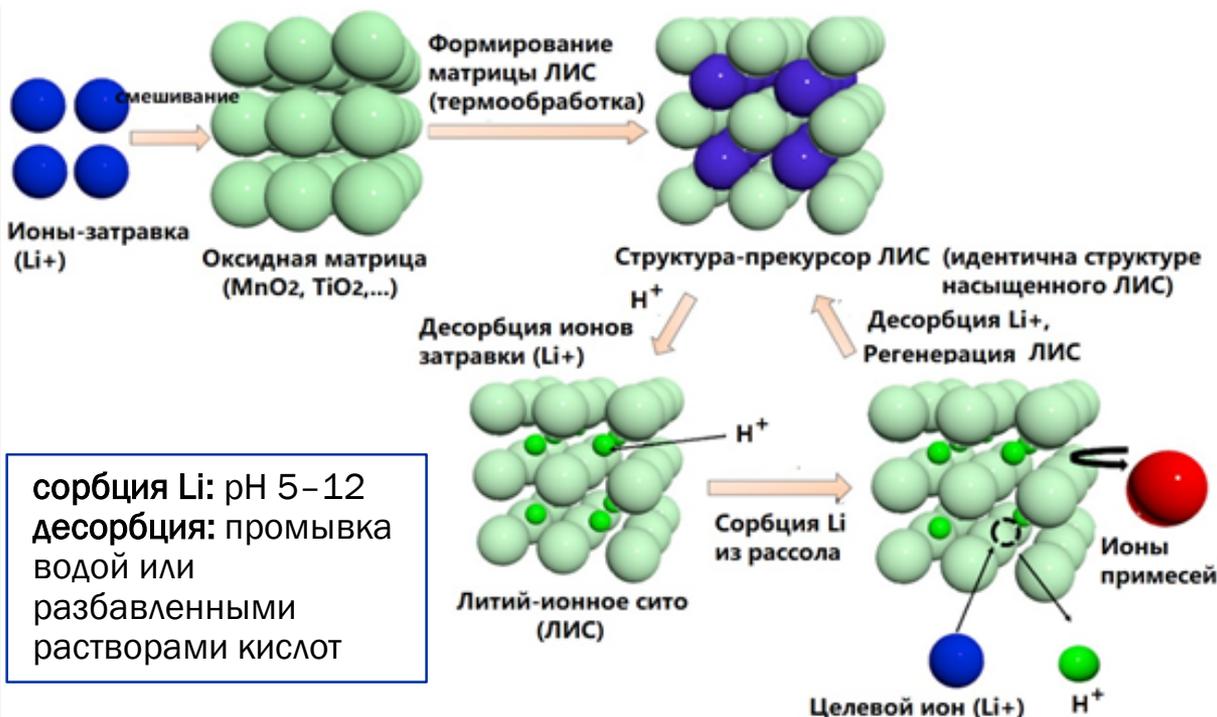
МЕХАНИЗМ ПОЛУЧЕНИЯ СОРБЕНТОВ  
С ЭФФЕКТОМ ИОННОГО СИТА:

- ✓ ВНЕДРЕНИЕ ЗАТРАВКИ (КАТИОНЫ  $\text{Li}^+$ ) В НЕОРГАНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ
- ✓ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРИ НАГРЕВАНИИ
- ✓ УДАЛЕНИЕ ЗАТРАВКИ ЭЛЮИРОВАНИЕМ

ПРЕИМУЩЕСТВА неорганических сорбентов с эффектом ионного сита :

- ✓ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДЕШЕВИЗНА
- ✓ ПРОСТОТА СИНТЕЗА
- ✓ ВЫСОКАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ПО ЛИТИЮ
- ✓ «ЭФФЕКТ СТРУКТУРНОЙ ПАМЯТИ» обеспечивает возможность сорбции  $\text{Li}$  из растворов со сложным ионным составом
- ✓ ИЗБИРАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ сорбировать катионы, ионному радиус которых  $\leq r$  ионов  $\text{Li}^+$

Схема синтеза неорганических сорбентов с эффектом литий-ионного сита и графическое изображение эффекта ионного сита

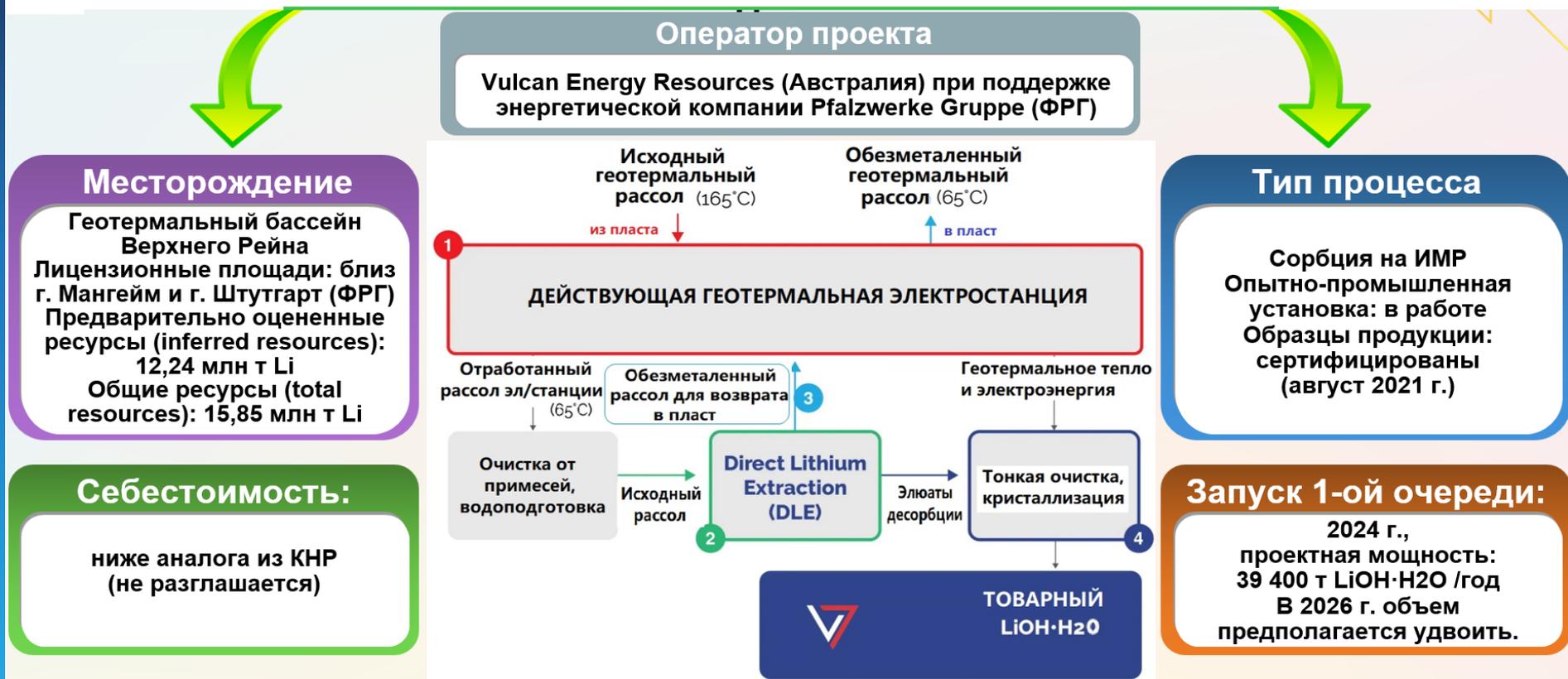


сорбция  $\text{Li}$ : pH 5–12  
десорбция: промывка  
водой или  
разбавленными  
растворами кислот

## ВИДЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ИОННОГО СИТА:

- **ЛИТИЙ-АЛЮМИНАТНЫЕ СОРБЕНТЫ** (LDH-сорбенты), вещество-прекурсор — гидроксид алюминия
- **ЛИТИЙ-МАНГАТНЫЕ СОРБЕНТЫ** (ОЛМ-сорбенты и их гидратированные варианты — ГОЛМ-сорбенты), вещества-прекурсоры —  $\lambda\text{-MnO}_2$ ,  $\text{MnO}_2 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{MnO}_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$
- **ЛИТИЙ-ТИТАНАТНЫЕ СОРБЕНТЫ** (ОЛТ-сорбенты), вещества-прекурсоры — метатитановая кислота  $\text{H}_2\text{TiO}_3$  и титанат лития  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$

# ПРОЕКТ VULCAN – ZERO CARBON LITHIUM (ФРГ) – КРУПНЕЙШЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ DLE В МИРЕ



Подписаны долгосрочные контракты на поставку продукции:  
LG Energy Solutions: 5000 т/год (с 2024), 10000 т/год (с 2026);  
Renault Group: 6000 т/год (с 2024), 17000 т/год (с 2026);  
Daimler: с 2026 (не разглашается);  
Umicore: с 2025 (не разглашается)

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЙ ТЕХНОЛОГИИ DLE: узел сорбции и десорбции (элюации)

Совместные экспериментальные исследования специалистов ФГБУ «ВИМС» и АО «Аксион»  
(технологический отдел ВИМСа и научно-производственная база АО «Аксион»)



- Автоматизированная сорбционная установка (АО «Аксион»)
- Коммерческий сорбент AXIONIT на основе хлорсодержащего двойного гидроксида алюминия и лития

МОДЕЛЬНЫЙ РАСТВОР <i>хлоридно-натриевого типа</i>	ПРИРОДНЫЙ РАССОЛ <i>хлоридно-кальциевого типа</i>
<b>состав, г/л</b> 0,05 Li; 65,4 Na; 2,5 K; 1,0 Mg; 11,7 Ca; 127,0 Cl общее солесодержание — 210; pH = 6,0	<b>состав, г/л</b> 0,188 Li; 19,27 Na; 13,31 K; 11,73 Mg; 63,1 Ca; 0,20 B; 1,28 Sr общее солесодержание – 301; pH = 6,4
<b>Технологические режимы</b>	<b>Технологические режимы</b>
<b>Режим сорбции:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– динамические условия; непрерывный режим</li> <li>– пропуск рассола в колонне сверху вниз</li> <li>– <math>V_k=50</math> мл; слой сорбента – 11 см;</li> <li>– скорость: <math>V/V_c = 3/1</math> в час</li> </ul> <b>Режим десорбции:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– элюация <math>H_2O</math>; скорость 1,5 <math>V/V_c</math> в час</li> <li>– пропуск рассола в колонне снизу вверх</li> </ul>	<b>Режим сорбции:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– динамические условия; непрерывный режим</li> <li>– пропуск рассола в колонне сверху вниз</li> <li>– <math>V_k=50</math> мл; слой сорбента – 11 см</li> <li>– скорость: <math>V/V_c = 3/1 - 1/1</math> в час</li> </ul> <b>Режим десорбции:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– элюация <math>H_2O</math>; скорость 1,5 <math>V/V_c</math> в час</li> <li>– пропуск рассола в колонне снизу вверх</li> </ul>
<b>Результаты</b>	<b>Результаты</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>установлена</b> принципиальная возможность сорбционного извлечения лития на сорбенте AXIONIT (<i>не менее 60% на одной колонне</i>)</li> <li>• <b>установлена</b> емкость сорбента по Li (<i>3 г/л</i>)</li> <li>• <b>определена</b> оптимальная скорость протекания рассола через колонну (<i>2 <math>V/V_c</math> в час</i>)</li> <li>• <b>получены</b> выходные кривые сорбции и элюации Li, K, Na, Mg, Ca</li> <li>• <b>выявлен</b> 3-х этапный механизм элюации</li> <li>• <b>показана</b> необходимость доочистки элюата от щ-з металлов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>достигнута</b> высокая степень извлечения лития из рассола на сорбенте AXIONIT с первичным отделением лития от сопутствующих металлов (<i>37-52 % на одной колонне</i>)</li> <li>• <b>установлена</b> ёмкость сорбента по Li (<i>5-6 г/л</i>)</li> <li>• <b>определено</b> влияние удельной скорости протекания рассола на ёмкостные показатели сорбента AXIONIT; <i>оптимальная скорость в пределах 1-3 <math>V/V_c</math> в час</i></li> <li>• <b>доказана</b> воспроизводимость сорбционного процесса</li> <li>• <b>установлено</b> оптимальное количество колонн сорбционного передела (<i>не более 3-4-х</i>)</li> <li>• <b>приведены</b> выходные кривые сорбции и элюации Li, K, Na, Mg, Ca</li> </ul>

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЙ ТЕХНОЛОГИИ DLE: узел глубокой очистки растворов



Установка «Сорбция» (ФГБУ «ВИМС»): сорбционный и десорбционный узлы

- прамоточный и противоточный режим работы
- объем колонны: 50 мл
- циклическое дозирование
- 6 колонн без нагрева
- 2 колонны с термостатированием

## ПРИРОДНЫЙ РАССОЛ

*хлоридно-кальциевого типа*

Состав элюата до очистки, г/л

0,56-1,0 Li; 0,5-0,6 Na; 0,34 K; 0,23-0,46 Mg;  
1,06-2,77 Ca; 0,12 B; 0,03-0,05 Sr

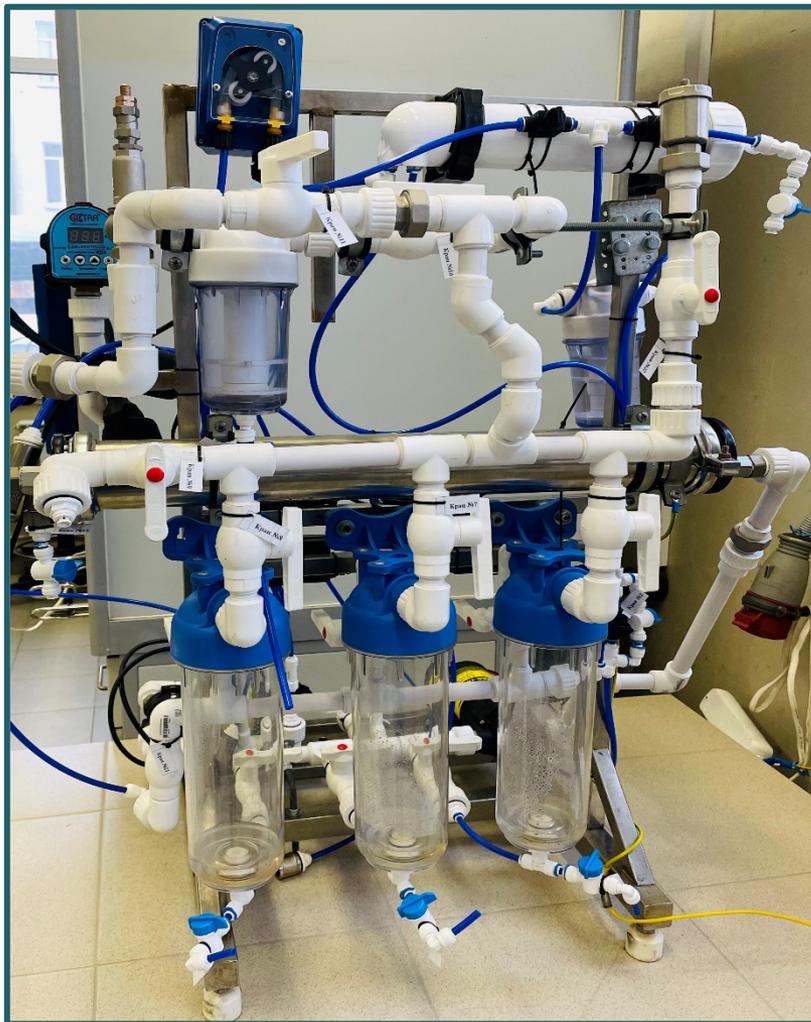
Технологические режимы

- карбоксильный катионит
- каскад из трех колонн
- десорбция: 19,8 г/л HCl
- удельная скорость протекания раствора через сорбент при десорции: 0,5 V/Vc в час

## Результаты

- **установлена** емкость сорбента (*по Ca – 29,3 г/л, Mg – 5,94 г/л*)
- **получены** выходные кривые элюации Li, B, Mg, Ca
- **рекомендовано** последовательное сочетание нанофильтрационной и ионнообменной глубокой доочистки водного элюата от щ-з металлов и B
- **получен** очищенный литийсодержащий элюат: **0,56–1,0 г/л Li, 0,0034 г/л Ca, 0,0009 г/л Mg, 0,1 г/л B**, качество которого пригодно для дальнейшего концентрирования методом обратного осмоса  
\*для очистки элюата от бора рекомендовано использование борселективных анионообменных смол

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЙ ТЕХНОЛОГИИ DLE. СОЗДАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ СОРБЦИОННО-МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ DLE (ОСНОВНОЙ ЦИКЛ)



Фирма-изготовитель: ООО «ИТМ-Гейзер»

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УЗЛЫ УСТАНОВКИ:

- СОРБЦИОННЫЙ
- ДЕСОРБЦИОННЫЙ
- УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫЙ
- НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫЙ
- УЗЕЛ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ (ОБРАТНЫЙ ОСМОС)

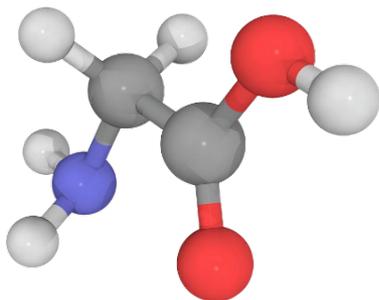
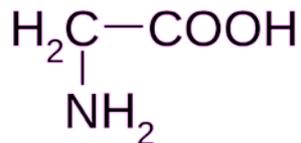
## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ:

- РАБОЧАЯ СРЕДА: ПРИРОДНЫЕ РАССОЛЫ РАЗЛИЧНОГО СОЛЕВОГО СОСТАВА
- ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ: 2–8 л/ч
- РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ: ДО 6 АТМ
- УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННАЯ МЕМБРАНА ПЛОВОЛОКОННОГО ТИПА ИЗ ГИДРОФИЛИЗОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ ОЧИСТКИ РАСТВОРА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ И КОЛЛОИДНЫХ ВЗВЕСЕЙ
- НАНОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МЕМБРАНА РУЛОННОГО ТИПА ДЛЯ ДООЧИСТКИ LI-РАСТВОРА ОТ ПРИМЕСНЫХ КОМПОНЕНТОВ
- ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГУЛИРОВКИ СКОРОСТИ ПОТОКА



# РЕАГЕНТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

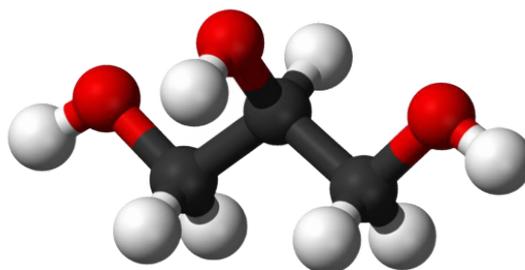
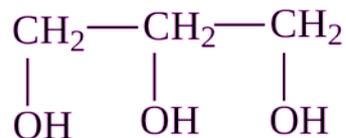
## ГЛИЦИН ( $C_2H_4NO_2H$ )



### ДОСТОИНСТВА:

- промышленное производство реагента
- нетоксичность
- нелетучесть
- термическая устойчивость
- относительная дешевизна
- отсутствие проблем при хранении
- высокая селективность по отношению к Au, Ag, Cu, Zn, Ni и Co в щелочной среде
- возможность использования в различных вариантах процессов выщелачивания (кучное, перколяционное, агитационное)
- возможность сорбционного извлечения Au и Ag из продуктивных растворов глицинатного выщелачивания

## ГЛИЦЕРИН ( $C_3H_8O_3$ )



### ДОСТОИНСТВА:

- промышленное производство реагента
- нетоксичность
- способность к комплексообразованию
- доступность
- широкий спектр областей применения
- не агрессивен к рабочим поверхностям и конструкционным частям оборудования

## JGD

Jinchan Environmental-friendly Gold Dressing Agent

22,04% C    38,3% Na    15,12% N  
22,92% O    0,96% Fe    0,36% Cl



### ДОСТОИНСТВА:

- промышленное производство реагента
- малая токсичность
- способность к комплексообразованию
- высокая химическая активность
- доступность на российском рынке импортного реагента для обеспечения промышленных производств
- успешно прошел апробацию по замене цианида на российских предприятиях

Современная тенденция развития гидрометаллургических процессов переработки минерального сырья — переход химических и горнодобывающих производств на рельсы «зеленой химии»

# ГЛИЦЕРАТНО-ГЛИЦИНАТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Золото-сурьмяная руда, масс. %:

2,96 г/т Au, 4,41 Sb, 17,99 Si, 5,36 Al, 3,58 Fe, 1,46 S<sub>общ</sub>, 0,12 As, 16,09 Ca



## ПРЕИМУЩЕСТВА

- ✓ комплексная переработка
- ✓ высокая степень извлечения сурьмы (~98%) и золота (~72%) в раствор
- ✓ полная селекция сурьмы от мышьяка
- ✓ экологическая безопасность

## ПЕРСПЕКТИВЫ

- ✓ расширение ресурсной базы сурьмы: объекты ГРП за государственный счёт (Тыргетуй- Жипкошинская площадь)
- ✓ расширение ресурсной базы золота за счёт вовлечения в переработку золото-сурьмяных руд
- ✓ технологическая база для создания собственного производства товарных соединений Sb (м. Сарылах, м. Сентачан (Якутия) и др.)
- ✓ импортозамещение товарных соединений сурьмы

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

**1 стадия (щелочно-глицератное выщелачивание):**

100 г/л NaOH, 100 г/л C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>, τ=3 ч, отношение Т:Ж=1:10, t=95°C

**2 стадия (глицинатное выщелачивание):**

0,1 моль/л Gly, 0,5 моль/л NaOH, массовое соотношение глицин:JGD=5:1, τ= 24ч, t=18–20°C, Т:Ж = 1:10

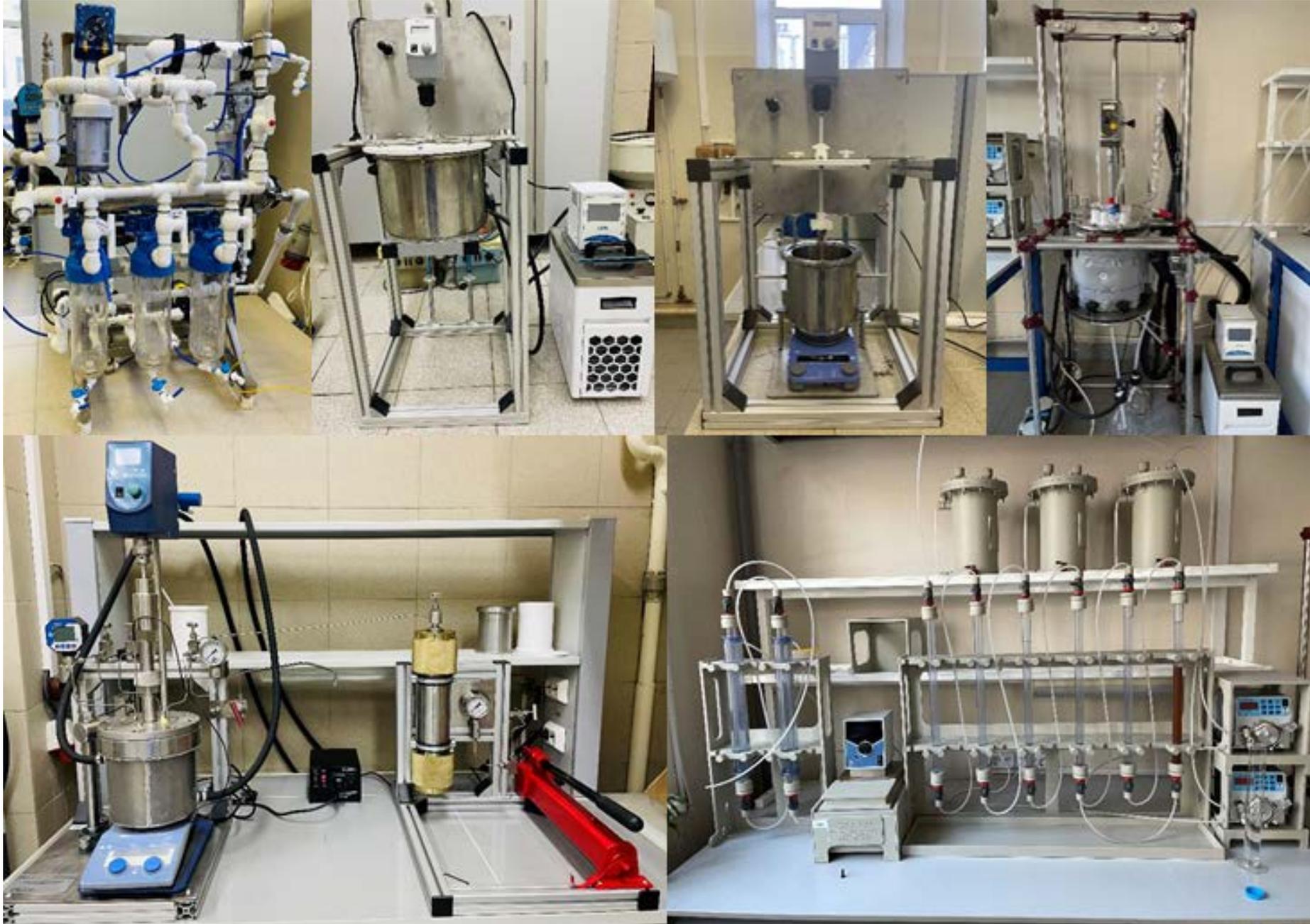
# НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛА



# НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛА



# НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛА



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В настоящее время продолжают исследования по разработке технологий извлечения стратегических металлов из минерального сырья, в т. ч. дефицитных, на основе обобщения мирового опыта в этой области, его развития и создания собственных подходов и решений.**

**Ведется разработка передовых технологий извлечения лития и сопутствующей продукции из руд крупнейших отечественных сподуменсодержащих месторождений, гидроминерального сырья; переработки комплексных бериллиевых руд сложного состава, ниобиевых и тантало-ниобиевых руд, золото-сурьмяных концентратов и получения товарной продукции других видов стратегических металлов.**

**Разработанные технологические решения могут быть использованы технологий при освоении месторождений недропользователями в качестве основы для дальнейшего создания промышленных руд стратегических металлов, в т.ч. дефицитных и импортозависимых, для получения высокотехнологической продукции, определяющей развитие современной экономики.**

**В последние 3 года в рамках Федерального проекта «Геология: Возрождение легенды» Минприроды России проводится постепенное оснащение технологического отдела ВИМСа современным технологическим оборудованием для проведения лабораторных и укрупненно-лабораторных работ с целью обеспечения возможности проведения исследований полного цикла с получением продукции глубокого передела: рудоподготовки, предварительного обогащения (радиометрическая и тяжелосредняя сепарация), гравитационного, магнитного и электрического обогащения, флотации, гидрометаллургических процессов (механоактивация, СВЧ и УЗ-ая обработки, перколяционное, атмосферное и автоклавное выщелачивание, сорбция, экстракция, осаждение и кристаллизация)**

**ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC-RESEARCH INSTITUTE OF MINERAL RESOURCES  
NAMED AFTER N.M.FEDOROVSKY  
FEDERAL STATE BUDGETARY INSTITUTION**



# **СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

---

119017, Москва, Старомонетный пер., 31  
Тел. (495) 951-50-43, Факс (495) 951-50-43.  
Эл. почта [vims@df.ru](mailto:vims@df.ru)  
Веб-сайт: [www.vims-geo.ru](http://www.vims-geo.ru)

31, Staromonetny per., Moscow, 119017 Russia  
Tel. (495) 951-50-43, Fax (495) 951-50-43.  
E-mail [vims@df.ru](mailto:vims@df.ru)  
Web site: [www.vims-geo.ru](http://www.vims-geo.ru)