

**УДК 622.277**

**Маланчук Е. З., к.т.н., доцент** (Национальный университет  
водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ БАЗАЛЬТОВ НА МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРАХ**

**В статье наведены результаты исследований магнитной восприимчивости для всех составляющих базальтового сырья, а именно туфа, лавобрекции и базальта и даны рекомендации технологичности их переработки с целью извлечения тяжелых металлов.**

**Ключевые слова:** исследования, туф, базальт, лавобрекция, магнитная сепарация, горная масса.

**Введение.** Объектом исследований являлись породы Рафаловского базальтового карьера. Целью являлось определение закономерностей магнитной восприимчивости всех трех основных составляющих базальтового сырья в месторождении (туф, лавобрекция и базальт) и установление на основе минералогического и гранулометрического анализа и продуктов магнитной сепарации технологических показателей операции, в частности распределения содержания меди в продуктах магнитной сепарации.

В задачи исследований входило рассмотреть вопрос о том, насколько эффективно на магнитных сепараторах можно выделять медные минералы в хвосты магнитной сепарации и при какой крупности питания извлечение меди в хвосты магнитной сепарации будет максимальным. То есть, исследовался вопрос применения магнитной сепарации с целью концентрации медных минералов в хвостах сепарации. Вопрос применения магнитной сепарации по прямому назначению – для получения железного концентрата – не рассматривался, так как для технологии он является вторичным.

Экспериментальные исследования проводились на основе сырьевой базы Рафаловского базальтового карьера как одного из перспективных для комплексной переработки горной массы с последующим извлечением самородной меди, ее окисленных и сульфидных образований, с дальнейшим использованием свободных от рудных минералов пород. Уникальные свойства пород месторождения Рафаловского карьера

(наличие самородных видов железа и меди) предполагают, что их магнитная сепарация будет эффективна, причем при достаточно высокой крупности питания, в отличие от обычных железистых кварцитов, которые требуют перед магнитной сепарацией высокой степени измельчения (до 95% класса минус 0,044 мм).

Для повышения достоверности экспериментальных результатов пробы для исследований брались в десяти разных участках взорванной горной массы карьера, после чего смешивались, и для экспериментов по сепарации использовалась осредненная смесь для каждой из трех составляющих месторождения.

Подготовка образцов к исследованиям заключалась в их предварительном дроблении и измельчении до класса крупности менее 3 мм, в соответствии с рекомендациями по сухой магнитной сепарации слабомагнитных руд [1, 2]. Измельченная горная масса классифицировалась на четыре класса крупности, и в каждом из классов определялась магнитная часть (в двух или трех уровнях) и немагнитная часть в весовом и процентном отношении к весу пробы. Исследования проводились в лабораторных условиях на барабанном магнитном сепараторе ПБСУ-0,5/0,2 в процессе сухой магнитной сепарации. Минералогический анализ выполнялся отдельно для магнитной и немагнитной частей пробы. Оценивалось содержание самородной меди в каждой навеске.

Исходные экспериментальные данные, полученные для последующего анализа, представлены в табл. 1–3.

В табл. 1 представлены среднестатистические результаты для базальта при содержании меди в исходной пробе 2,62%. Проявление магнитных свойств базальтов в отдельных продуктах объясняется наличием в них минералов группы халькопирита, содержащих в своем составе от 13% до 40% железа.

В табл. 2 представлены результаты анализа пород лавобрекции при среднем содержании меди в пробе 1,36%. Причем, если в пробах базальта самородная медь содержится мелкими вкраплениями, то в лавобрекции она представлена в виде разрушенных измельчением дендритных структур. Следует отметить, что основная масса лавобрекции состоит из силикатов группы пироксенита, содержащих в своем составе железо, магний, натрий. Присутствие в отдельных пробах куприта, малахита, лазурита и борнита указывает на наличие химически связанной окисленной меди в месторождении. В базальтовом уступе карьера лавобрекция залегает слоем мощностью от 0,5 м до 1,5–2,0 м.

Селективная выработка лавобрекции не вызывает технических трудностей, поскольку при взрывной отбойке уступа порода лавобрекции измельчается на значительно более мелкие фракции, нежели базальт.

Залежи красного туфа в карьере представлены в виде вскрыши базальтового слоя и при разработке базальта туф складируется в отвал, поскольку в настоящее время его промышленное использование ограничено. Перспективы его добычи огромны, так как подстилающий массив базальта – туфовый слой, который имеет мощность более 40 м.

В табл. 3 представлены результаты минералогического и гранулометрического анализа туфа. Контролируемое содержание самородной меди – 0,03%. Она проявляется в виде тонких (на микронном уровне) пленок и при измельчении туфа кусочки меди имеют размеры не более 100 микрон. Наличие малахита в пробах в виде сростков и отдельностей зеленого цвета свидетельствует о присутствии окисленной меди. При магнитной сепарации туфа выход магнитного продукта составил 54%. Такая магнитная восприимчивость туфа объясняется наличием в его составе титаномагнетита [3, 4]. Выделенные шламы (чистый туф) являются идеальным сырьем для химического производства и сельского хозяйства.

Таким образом, выполненные исследования базальта, лавобрекции и туфа Рафаловского месторождения показали целесообразность дальнейшего исследования операции магнитной сепарации, поскольку все три наиболее характерные породы имеют достаточно высокую магнитную восприимчивость: из базальта получается магнитного продукта 55%, из лавобрекции – 33%, из туфа – 54%.

Таблиця 1

Исходные материалы. Минералогический и гранулометрический анализ проб базальта Рафаловского карьера

490

Класс, мм	Продукт	Масса, г	Выход, %	Содержание минералов	Содержание меди, %	Выход	Извлечение
2,5+1,6	-	-	-	-	-	-	-
	Магн. 2	66	75,86	Базальт – 96-97%. Медь самородная – 3-4%	3,5	16,62	0,582
	Немагн.	21	21,14	Базальт – 85%. Медь самородная – 15% (10% – раскрыта и в сростках – 5%)	13,0	5,29	0,688
-1,6+0,8	Магн. 1	19	17,43	Базальт – более 99%. Медь самородная в сростках – единичные зерна. Малахит – ед. зерна. Куприт – единичные зерна	0,01	4,786	0,0004
	Магн. 2	51	46,79	Базальт – более 99%. Медь самородная в сростках – единичные зерна. Малахит – менее 1%.	0,6	12,85	0,077
	Магн. 3	17	15,60	Базальт – более 99%. Медь самородная в сростках – менее 1%.	0,1	4,282	0,004
	Немагн.	22	20,18	Базальт – 75-80%. Медь самородная 10-15% и в сростках – 5-7%. Кварц – 5%. Малахит в сростках 5-7%.	15,0	5,542	0,831

продовження табл. 1

-0,8+0,25	Магн. 1	5	4,31	Базальт – 100%. Малахит – ед. зерна, в сростках	0,01	1,259	0,004
	Магн. 2	31	26,72	Базальт – 100%	0	7,809	0
	Немагн.	80	68,97	Базальт – 94-96%. Кварц – 2-3%. Медь самородная в сростках – 2-3%	1,5	20,15	0,302
-0,25	Магн. 1	8	9,41	Базальт – 100%	0	2,015	0
	Магн. 2	22	25,88	Базальт – 100%	0	5,542	0
	Немагн.	55	64,71	Базальт – 99-100%. Медь самородная до 1%	1,0		0,139
Итого		397	100,0	Содержание меди в пробе базальта 2,624%	100,0		2,624

Таблица 2

## Исходные материалы. Минералогический и гранулометрический анализ лавобрекции

492

Класс крупности, мм	Продукт	Масса, г	Выход, %	Содержание минералов	Среднее содержание меди, %
-2,5+1,6	Магн. 1	3,0	0,93	Пироксенит – 95-98%. Магнетит – 5-2%.	-
	Магн. 2	19,0	5,93	Пироксенит – 99%. Сростки: медь самородная – 1-15%, куприте и азурит – единичные зерна	1,5
	"Магн. 3	18,0	5,62	Пироксенит – 99%. Куприте – единичные зерна. Медь самородная – до 1% в сростках. Малахит – 1%.	1,0
	Немагн.		18,75	Пироксенит – 95-98%. Кварц – 1-2%. Малахит – 1-2% Самородная медь – 1-1,5%.	1,5
-1,6+0,8	Магн. 1	2,0	0,62	Исходная порода – 100%.	-
	Магн. 2	15,0	4,68	Рудных минералов нет.	-
	Магн. 3	15,0	4,68	Куприте – 1,5-2,0%.	0,7
	Немагн.	47,0	14,6	Кварц – 1-2 %. Сростки самородной меди – 2,0-2,5%.	2,5
-0,8+0,25	Магн. 1	14,0	4,4	Куприте (гематит) – 1-2%. Медь самородная в сростках – единичные зерна.	0,1
	Магн. 2	20,0	6,25	Куприте – 1-2%. Медь самородная – единичные зерна.	0,2
	Магн. 3	-	-		-
	Немагн.	56,0	17,5	Кварц, малахит, медь самородная – единичные зерна.	0,3
-2,5	Магн. 1	8,0	2,5	Борнит – 2-3%. Магнетит – 2-3%. Пироксенит – 70-80%. Малахит – единичные зерна. Медь – 2-3%.	2,5
	Магн. 2	8,0	2,5	Пироксенит 75-78%. Медь – 2,5-4%. Кварц – 20%. Малахит – единичные зерна. Медь – 2-3%.	3,0
	Магн. 3	-	-		-
	Немагн.	35,0	10,93	Кварц – 50%. Малахит – 40%. Медь – 3-3,5%. Прочие – 2%	3,0
Итого:		320,0	100,0	Среднее содержание меди в пробе.	1,36

Таблица 3

Исходные материалы. Минералогический и гранулометрический анализ проб туфа Рафаловского карьера

493

Класс, мм	Продукт	Масса, г	Выход, %	Содержание минералов	Содержание меди, %	Выход	Извлече-ние
-2,5+1,6	Магн. 1	15	15,5	Туф – 100 %. Малахит – единичные вкрапления	0	2,66	0
	Магн. 2	41	42,3	Туф – 100 %. Малахит – 1% в сростках	0,5	7,27	0,011
	Немагн.	41	42,3	Туф – 100 %. Малахит – 0,5% в срост-	0,007	7,27	0,0004
-1,6+0,8	Магн. 1	22	16,06	Туф – 100%.	0	3,90	0,0004
	Магн. 2	64	46,729	Туф – 100%. Малахит - единичные сростки	0	11,35	0
	Немагн.	51	37,238	Туф – 100%.	0	9,04	0
-0,8+0,25	Магн. 1	28	12,56	Туф – 100%. Медь самородная – единичные сростки	0	4,96	0
	Магн. 2	85	38.12	Туф – 100%. Медь самородная – единичные сростки	0	15,07	0
	Немагн.	110	49,33	Туф – 97-98%. Кварц – 2-3%	0	19.50	0
-0,25	Магн. 1	16	14,95	Туф – 100%	0	2,84	0
	Магн. 2	37	34,58	Туф – 95%. Кварц – 5%. Малахит и медь самородная – в единичных зернах.	0,1	6.56	0,007
	Немагн.	54	50,47	Туф – 95%. Кварц – 5%. Малахит – в единичных зернах.	0,05	9,57	0,005
Итого:		564	100,0	Содержание меди в пробе туфа составило 0,023%		100,0	0,03

Исходные материалы табл. 1-3 были обработаны в части расчета технологических показателей, таких как выход, содержание и извлечения меди при сухой магнитной сепарации узких классов крупности базальта, лавобрекции и туфа. Результаты расчетов, представленные ниже в табл. 4-9, позволили установить закономерности магнитной восприимчивости сырья и сделать ряд практических полезных выводов.

Таблица 4

Показатели сухой магнитной сепарации узких классов базальта

Класс крупности, мм	Продукт	Вес, $10^{-3}$ кг	Выход в классе, %	Выход от исх., %	Содержание Cu, %	Извлечение Cu в классе, %	Извлечение Cu от исх., %
-2,5+1,6	Конц.2	66	75,9	16,62	3,5	45,8	22,2
	Немагн.	21	24,1	5,29	13,0	54,2	26,2
Всего по кл.		87	100,0	21,91	5,79	100,0	48,4
-1,6+0,8	Конц.1+2+3	87	79,8	21,91	0,37	9,0	3,1
	Немагн.	22	20,2	5,54	15,0	91,0	31,7
Всего по кл.		109	100,0	27,46	3,33	100,0	34,8
-0,8+0,25	Конц.1+2	36	31,0	9,07	0,0014	0,04	0,0
	Немагн.	80	69,0	20,15	1,5	99,96	11,5
Всего по кл.		116	100,0	29,22	1,03	100,0	11,5
-0,25	Конц.1+2	30	35,3	7,56	0	0	0
	Немагн.	55	64,7	13,85	1,0	100,0	5,3
Всего по кл.		85	100,0	21,41	0,65	100,0	5,3
Итого в пробе		397		100,0	2,624		100,0

Таблица 5

Сводные данные по магнитной сепарации базальта (по табл. 4)

Класс крупности, мм	Выход от исх., %	Содержание Cu, %	Извлечение Cu, %	Магнитный, %			Немагнитный, %		
				Выход	Содержание	Извлечение	Выход	Содержание	Извлечение
-2,5+1,6	21,91	5,79	48,39	16,62	3,5	22,2	5,29	13,0	26,21
-1,6+0,8	27,46	3,33	34,80	21,91	0,37	3,1	5,54	15,0	31,68
-0,8+0,25	29,22	1,03	11,53	9,07	0,0014	0,0	20,15	1,5	11,52
-0,25	21,41	0,65	5,28	7,56	0,0	0,0	13,85	1,0	5,28
Итого	100,0	2,624	100,0	55,16	1,20	25,3	44,84	4,37	74,70

Таблиця 6

Показатели сухой магнитной сепарации узких классов лавобрекчии

Класс крупности, мм	Продукт	Вес, $10^{-3}$ кг	Выход в классе, %	Выход от исх., %	Содержание Cu, %	Извлечение Cu в классе, %	Извлечение Cu от исх., %
-2,5+1,6	Магн.	40,0	40,0	12,5	1,16	34,1	10,7
	Немагн.	60,0	60,0	18,8	1,5	65,9	20,7
Всего по кл.		100,0	100,0	31,3	1,37	100,0	31,3
-1,6+0,8	Магн.	32,0	40,5	10,0	0,33	8,2	2,4
	Немагн.	47,0	59,5	14,7	2,5	91,8	27,0
Всего по кл.		79,0	100,0	24,7	1,62	100,0	29,4
-0,8+0,25	Магн.	34,0	37,8	10,6	0,16	24,3	1,2
	Немагн.	56,0	62,2	17,5	0,3	75,7	3,9
Всего по кл.		90,0	100,0	28,1	0,25	100,0	5,1
-0,25	Магн.	16,0	31,4	5,0	2,75	29,5	10,1
	Немагн.	35,0	68,6	10,9	3,0	70,5	24,1
Всего по кл.		51,0	100,0	15,9	2,92	100,0	34,2
Итого в пробе		320,0		100,0	1,36		100,0

Для наглядности дальнейшего анализа по данным табл. 6 составлена сводная табл. 7.

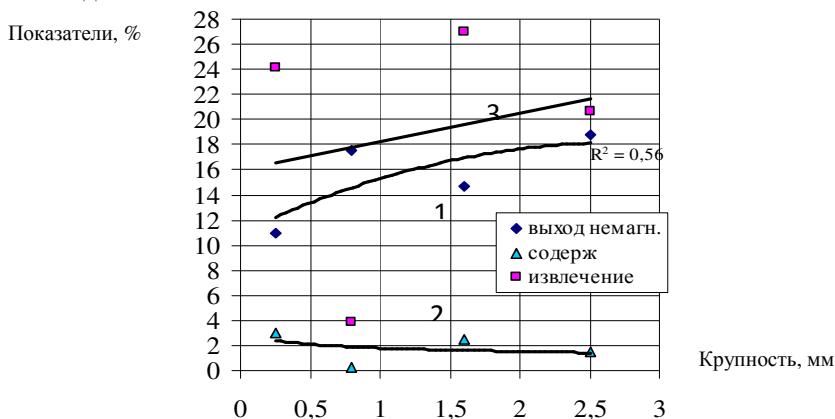


Рисунок. Закономерності изменения характеристик немагнитной фракции (хвостов) сухой магнитной сепарации узких классов лавобрекчии;  
хвости: 1 – выход; 2 – содержание меди; 3 – извлече

Таблица 7

Сводная таблица результатов сухой магнитной сепарации лавобрекчии

Классы крупности, мм	Выход от исх., %	Содер- жание Cu, %	Извле- чение Cu, %	Магнитный, %			Немагнитный,%		
				Вы- ход	Содер- жание	Извле- чение	Вы- ход	Содер- жание	Извле- чение
-2,5+1,6	31,25	1,37	31,3	12,50	1,16	10,67	18,75	1,50	20,66
-1,6+0,25	52,81	0,89	34,5	20,63	0,24	3,65	32,19	1,30	30,8
-0,25	15,94	2,92	34,2	5,00	2,75	10,10	10,94	3,00	24,10
Итого	100,0	1,36	100,0	38,13	0,87	24,42	61,88	1,66	75,58

Таблица 8

Показатели сухой магнитной сепарации туфа, проба 1 (по табл. 3)

Класс крупности, мм	Выход от исх., %	Содер- жание Cu, %	Извле- чение Cu, %	Магнитный, %			Немагнитный, %		
				Выход	Содер- жание	Извле- чение	Выход	Содер- жание	Извле- чение
-2,5+1,6	17,2	0,09	52,1	9,9	0,2	33,5	7,3	0,007	4,4
-1,6+0,25	63,8	0,00	0,0	35,3	0,0	0,0	28,5	0,0	0,0
-0,25	19,0	0,07	47,9	9,4	0,1	21,0	9,6	0,05	41,0
Итого	100,0	0,03	100,0	54,6	0,04	54,6	45,4	0,01	45,4

Таблица 9

Выход продуктов магнитной сепарации туфа, проба 2

Классы крупности, мм	Всего в про- бе		Распределение в узких классах, %				Выход от исходного, %		
			Магнитный		Немагнитный		Магнит- ный	Немагни- тный	
	г	%	г	%	г	%	%	%	
-2,5+0,63	331,4	36,1	275	83,0	56,4	17,0	29,94	6,14	
-0,63+0,1	208,9	22,7	175,4	84,0	33,5	16,0	19,09	3,65	
-0,1	378,3	41,2	0	0	378,3	100	0	41,18	
Всего	918,6	100	450,4		468,2		49,03	50,97	

Таблица 10

Показатели сухой магнитной сепарации туфа, проба 2

Классы крупности, мм	Выход от исх., %	Со- держ. Cu, %	Изв- леч. Cu %	Магнитный, %			Немагнитный,%		
				Выход	Содер- ж.	Изв- леч.	Выход	Содер- ж.	Изв- леч.
-2,5+0,63	36,1	0,31	21,01	29,94	0,29	16,38	6,14	0,40	4,63
-0,63+0,1	22,7	0,45	19,26	19,09	0,42	15,13	3,65	0,60	4,13
-0,1	41,2	0,77	59,83	0,00	0,00	0,00	41,18	0,77	59,8
Всего	100	0,53	100	49,03	0,34	31,5	50,97	0,71	68,6

Для примера на рисунке приведена закономерность изменения характеристик немагнитной фракции (хвостов) сухой магнитной сепарации узких классов лавобрекчии.

Наилучшее извлечение меди в хвосты (немагнитный продукт) наблюдается для двух средних классов крупности  $-1,6+0,8$  мм и  $-0,8+0,25$  мм, где оно составляет 91,8% и 75,7 %, соответственно. Видимо, эта крупность соответствует крупности самородных образований меди.

Для любого класса крупности лавобрекчии выход хвостов закономерно выше, чем выход концентрата (магнитного продукта).

С уменьшением крупности частиц выход хвостов снижается, содержание меди в хвостах возрастает, извлечение снижается (рисунок). Все зависимости слабые и носят иллюстративный характер. Важным является тенденция повышения содержания меди в хвостах с уменьшением крупности хвостов. Это говорит о том, что минералы сырья лучше раскрыты в мелких классах, то есть для лавобрекчии целесообразно снижать крупность питания магнитной сепарации.

В заключении наведены выводы исследований магнитной восприимчивости для проб лавобрекчии. Данные исследований для базальта и туфа наведены в таблицах и рисунке.

**Выводы:**

1) Выход магнитной и немагнитной фракций из пробы лавобрекчии составил 38,13% и 61,88%, соответственно. Причем, для всех узких классов крупности количество немагнитной фракции стабильно выше, чем магнитного продукта.

2) Для данной пробы содержание меди в немагнитной фракции немногого выше, нежели в исходном сырье (1,66% против 1,36%). Обе фракции (и магнитная, и немагнитная) оказались достаточно богатыми медью. Они содержат 0,87% и 1,66% меди, соответственно, то есть обе требуют доработки. Такая ситуация является следствием плохого извлечения меди в хвосты из самых крупных и из самых мелких классов, а именно, для классов, крупнее 1,6 мм и мельче 0,25 мм, содержание меди в магнитной и немагнитной фракциях оказалось, примерно, одинаковым.

3) В целом по пробе лавобрекчии извлечение меди в немагнитную фракцию выше, чем в магнитную: 75,6% против 24,4%.

Относительно высокое извлечение меди в магнитную фракцию (24,2%) происходит в равной мере из-за богатого медью крупняка (классы  $+1,6$ ) и из-за богатой мелочи (классы  $-0,25$ ). Скорее всего, оба этих класса содержат множество сростков минералов меди и железа,

вместе с которым медь попадает в магнитный продукт. Наиболее низкое извлечение меди в магнитный концентрат имеет место для узкого класса крупности  $-1,6+0,25$  мм.

4) На основании изложенного для процесса магнитной сепарации лавобрекции можно дать следующие рекомендации, что в технологическом процессе целесообразно избавиться от верхнего класса крупности, то есть дробить весь материал до крупности менее 1,6 мм.

1. Булат А. Ф. Перспективы комплексной переработки базальтового сырья Волыни / А. Ф. Булат, В. П. Надутый, З. Р. Маланчук // Геотехническая механика : Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 3-7. 2. Надутый В. П. Обобщение результатов исследований магнитной восприимчивости составляющих базальтового сырья / В. П. Надутый, А. М. Эрперт, Е. З. Маланчук // Збагачення корисних копалин : Наук-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 51(92). – С. 144-149. 3. Характеристика покладів міді в Рівненсько-Волинському регіоні / [Т. Ю. Гринюк, Р. П. Рачковський, С. Р. Боблях, Є. З. Маланчук] // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. праць. – Рівне, 2006. – Вип. № 3(35).– С. 217-225. 4. Кvasниця В. М. До знахідки самородної міді в туфогенних породах Волині / В. М. Кvasниця, В. А. Нестеровський, В. І. Павлишин // Мінерал. журнал. – 2000. – № 4. – С. 20-24.

Рецензент: д.т.н., профессор Маланчук З. Р. (НУВХП)

---

**Malanchuk E. Z., Candidate of Engineering, Associate Professor**  
(National University of Water Management and Nature Resources Use,  
Rivne)

## **RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFICIENCY OF PROCESSING BASALTS MAGNETIC SEPARATORS**

**In the article under the research results of the magnetic perceived the susceptibility for all components of basalt raw material, namely, tuff breccias and basalt and recommendations the technology of their processing to extract heavy metals.**

**Keywords:** research, tuff, basalt, lawarence, magnetic separation, the rock mass.

---

**Маланчук Є. З., к.т.н., доцент** (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ПЕРЕРОБКИ БАЗАЛЬТІВ НА  
МАГНІТНИХ СЕПАРАТОРАХ**

У статті наведені результати досліджень магнітної сприйнятливості для всіх складових базальтової сировини, а саме туфу, лавобрекчії і базальту та надано рекомендації технологічності їх переробки з метою вилучення важких металів.

**Ключові слова:** дослідження, туф, базальт, лавобрекчія, магнітна сепарація, гірська маса.

---