

## Магнитно-минералогическая характеристика, классификация и использование природных магнитных песков

© Ю. А. Курников<sup>1</sup>, М. И. Орлюк<sup>2</sup>, 2011

<sup>1</sup>Международный научно-технический университет,  
Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 11 мая 2010 г.

*Представлено членом редколлегии О. М. Русаковым*

Магнітні піски є новим об'єктом досліджень у зв'язку з можливістю їх використання у багатьох галузях народного господарства. Для зразків піску з Чорноморського регіону, Росії та Єгипту здійснено експериментальні магнітно-мінералогічні дослідження, що дало змогу визначити мінеральний склад, магнітну сприйнятливість порід, ізотерму Кюрі тощо. Аналіз мінерального складу та магнітних параметрів природних магнітних пісків показав можливість їх застосування як наповнювача фільтрів для очищення води.

Magnetic sands are a new object of studies due to possibility of their utilization in many branches of national economy. Experimental magneto-mineralogical studies have been performed for the samples of sand from the Black Sea region, Russia and Egypt which made possible to determine mineralogical composition, magnetic susceptibility of rocks, Curie isotherm etc. Analysis of composition of natural magnetic sands and their magnetic parameters has shown a possibility of their utilization as filling material for filters of water purification.

К настоящему времени магнитные вещества нашли широкое применение во многих отраслях народнохозяйственного комплекса — в медицине, на транспорте, при решении ряда экологических задач. Однако практически во всех магнитных изделиях используются материалы искусственного происхождения. Поскольку их изготовление обходится не дешево, особый интерес вызывает природный магнитный песок. Несмотря на то, что словосочетание "магнитный песок" известно давно, оно до сих пор являлось термином свободного пользования без какой-либо конкретной понятийной нагрузки, обозначая любые пески с повышенным содержанием ферромагнитных минералов. Такая ситуация обусловлена тем, что только в последнее время они стали объектом прикладных исследований [Курников и др., 2005; Орлюк и др., 2005]. В этих работах впервые были исследованы

магнитно-минералогические характеристики магнитного песка и разработаны рекомендации для его использования в практических целях. Также сформулировано определение этого геологического объекта: *магнитный песок природный — рыхлая осадочная порода темно-серого цвета с размером твердых частиц 0,05—2 мм, в которых содержится не менее 2 % зерен магнетита с подчиненным количеством грубых магнитных минералов*. В связи с этим стало ясным, о каком песке идет речь, а в формулировке учтены специфические признаки магнитного песка и количество магнетита, необходимое для того, чтобы проявились его полезные качества, а добыча стала рентабельной. После выхода упомянутых публикаций, а также работы [Курников и др., 2007] накопилось много нового материала, исследование которого привело к возможности обобщения магнитно-минерало-

гических характеристик магнитных песков, а также к их классификации.

**Распространение и характеристика россыпей.** Магнитные пески известны уже давно во многих районах мира. По сведениям античных авторов на Кинбурнском полуострове и на берегу Егорлыцкого залива залегали содержащие магнетит пески, которые использовались для выплавки "лучших сортов железа", неподверженных коррозии [Агбунов, 1987]. В средние века на побережье одного из Валаамских островов время от времени появлялись черные пески, которые представляли собой магнитный железняк. Монахи использовали этот песок для сушки чернил. В 1791 г. английский минералог-любитель У. Грегор писал о магнитных песках местечка Менакан в Англии, когда сообщал об открытии титана. Камчатское побережье Тихого океана изобилует скоплениями черного песка [Курников и др., 2005]. В юго-западной части Таманского полуострова в 1907 г. С. П. Поповым обнаружены скопления гранат-магнетитовых песков [Геология ..., 1968]. Небольшая россыпь магнитного песка установлено у села Любимовка к северу от г. Севастополь [Шнюков, Зиборов, 2004].

В береговой зоне Черного моря наиболее значительные, по размерам и содержанию магнетита, залежи песка развиты в Грузии [Абих, 1856; Чирвинский, Ульянов, 1928] и на юге Болгарии [Цветкова-Голева, 1975; Нааге, 1968]. Поскольку они дают наглядное представление о россыпях магнитного песка, целесообразно хотя бы кратко описать результаты их изучения по материалам приведенных выше работ, а также ряда публикаций [Бойко и др., 1975; Шнюков и др., 1979 и др.].

Магнетитовые пески Грузии сформировались в основном реками Риони, Супса, Натанеби, Ингури, Кодор и Бзыбь. Содержание магнетита в пляжных отложениях длиной около 50 км между реками Чорох и Бзыбь колеблется в пределах 2—3%. Однако оно может достигать 70% в линзах и прослойках мощностью 4 см в верхнем метровом слое. Наиболее богатые россыпи залегают между реками Супса и Натанеби, где пески сосредоточены в мелководной зоне шириной 1,0—1,5 км и пляжной полосе шириной от 10 до 70 м. Общая длина россыпей достигает 10 км.

Россыпи магнитных песков слагают подводные валы, пляжи, дюны, частично погребенные. Магнетит локализуется в толще верхнечетвертичных песков, хотя материал, из ко-

торого сложены магнитные пески, значительно древнее (40—260 млн лет). Источником магнитных песков могут быть андезиты и андезито-базальты Аджаро-Имеретинского хребта, сиениты р. Натанеби. Магнитные пески состоят в основном из пироксена, магнетита, титаномагнетита, кварца, мусковита, биотита, биогенных карбонатов и гидроксидов железа. В небольшом количестве установлены эпидот, роговая обманка, оливин, ильменит, сфен, рутил и обломки кристаллических пород и сланцев.

Перспективы поиска магнитных песков на Таманском полуострове связываются с гранатовыми россыпями, обнаруженными у южного края озера Соленое (лагуна Черного моря), в 4—5 км восточнее мыса Железный Рог и вдоль южного берега Ахтанизовского лимана. Данные россыпи прослеживаются на расстоянии 1,5—2 км, в ширину достигают 20—30 м при мощности от 0,1 до 0,4 м. Минералогический анализ гранатовой россыпи показал, что она состоит из зерен граната, магнетита, лейкоксена, рутила, турмалина, циркона, ставролита, дистена, монацита, ильменита и эпидота, до 5—7% зерен кварца и 1—3% составляют обломки фауны. Магнитная фракция гранат-магнетитовых песков Черноморского побережья Таманского полуострова представлена магнетитом (от 14 до 20%). Содержание электромагнитной фракции в этих песках 70—72%, представлена гранатом, гематитом, амфиболом, хромитом и ильменитом [Бойко и др., 1975]. Россыпи генетически относятся к абразионно-пляжевому песчанистому типу, а главная перспектива в плане горнорудного сырья связывается с гранатом.

Магнитные пески на побережье Несебрского и Бургасского заливов в Южной Болгарии известны с 1912 г. Они протягиваются узкой полосой от г. Несебра до г. Созополь шириной до 100 м, длиной до 50 км. Их мощность в основном не превышает 0,4 м, изредка 1,0 м. На отдельных участках подводного склона пляжа содержание магнетита достигает 10%, а на шельфе не превышает 3%. В песках помимо магнетита установлены ильменит, циркон, хромит, титанит, пироксен, гематит, монацит и знаки других минералов.

Россыпи Южной Болгарии сформировались в результате размыва пород Странджанского антиклинория и Бургасского синклинория реками Ахелой и Фракийская. Разрушению подвергались вулканогенно-осадочные, интрузивные кислые и основные породы, возраст кото-

рых охватывает интервал времени от протерозоя до мела.

**Лабораторные исследования.** Магнитные свойства песков определяются количеством и типом ферромагнетика. В природе существует много минералов, которые определяют магнитные свойства горных пород и песка в частности (табл. 1). Есть еще один ферромагнетик, а именно, самородное железо  $\alpha$ -Fe [Печерский, 2000], которое, однако, вряд ли может присутствовать в магнитных песках в силу своей специфичности. Предполагаемое практическое использование магнитных песков требует исследования их минералогического состава, гранулометрии, пористости, магнитных свойств, радиоактивности и т. д.

**Магнитно-минералогический и гранулометрический анализ.** Результаты магнитно-минералогического и гранулометрического анализа сведены в табл. 2—4. Наиболее детально исследованы образцы песка из Грузии. В частности, как видно из табл. 2, из выявленных в составе песка 14 минералов главными являются пироксен и магнетит. Содержание магнетита в необогащенном песке составляет около 11%. Заметим, что кроме свободных достаточно крупных зерен магнетита и мар-

тита, в зернах темноцветных минералов содержатся многочисленные пылевидные включения магнетита размером  $< 0,05$  мм, что повышает общее содержание магнетита на 0,5—1%.

К настоящему времени исследованы магнитные пески Крыма (подножье Медведь-горы, поселки Любимовка, Николаевка, Рыбачье, Новый Свет, мыс Фиолент), Камчатки, Египта (система разлома Мертвого моря, район г. Таба), Карелии (о-в Коневец, Ладожское озеро), а также искусственный магнитный концентрат (песок). В табл. 3 приведены результаты гранулометрического анализа с указанием распределения минералов для разных классов, а в табл. 4 — результаты сокращенного минералогического анализа этих песков на содержание только магнитных минералов. Как видно из табл. 4, в песке из Красного моря преобладает магнетит, подчиненное значение имеют мартит и титаномагнетит. В песке пос. Николаевка тоже преобладает магнетит, но процентное содержание титаномагнетита существенно выше. В песке с мыса Фиолент обнаружен только магнетит. В противоположность рассмотренным пескам песок с о-ва Коневец (Ладожское озеро) отличается тем, что в нем преобладает титаномагнетит. Исследо-

Т а б л и ц а 1. Магнитные параметры ферромагнитных минералов [Физические ..., 1976]

Минерал	Формула	$\alpha$ , магнитная восприимчи- вость, ед. СГСМ	$I_s$ , намагни- ченность насыще- ния, Гс	$H_c$ , коэрцитив- ная сила, Э	$T_c$ , темпе- ратура Кюри, °С
Магнетит	$Fe_3O_4$	0,7—2,0	490	10—150	578
Титаномагнетит	$xFe_3O_4(1-x)TiFe_2O_4$	$10^{-6}$ — $10^{-1}$	75—430	—	100—578
Треволит	$NiFe_2O_4$	0,5	240	—	590
Якобсит	$MnFe_2O_4$	20	320	—	510
Магнезиоферрит	$MgFe_2O_4$	0,8	140	—	310
Маггемит	$\gamma Fe_2O_3$	0,3—2,0	435	10—130	675
Гематит	$\alpha Fe_2O_3$	$10^{-5}$ — $10^{-4}$	1,5—2,5	7000—8000	675
Пирротин	$FeS_{1+x}$	$10^{-2}$ — $10^{-3}$	17—70	15—110	300—325
Гетит	$\alpha FeOOH$	$(0,02—80) \cdot 10^{-3}$	4,8	700	—
Лепидокрокит	$\gamma FeOOH$	$(0,9—2,5) \cdot 10^{-3}$	—	—	—
Гидрогематит	$\alpha Fe_2O_3 \cdot H_2O$	—	$2,3 \cdot 10^{-3}$	—	—
Сидерит	$FeCO_3$	$(20,0—60,0) \cdot 10^{-5}$	—	—	238

Т а б л и ц а 2. Минералогический состав исследованных образцов из Грузии и Крыма (пос. Партенит), %

Номер пробы	Материал пробы	Магнетит	Мартит	Пироксен моноклиный	Эпидот	Легкая фракция (кварц, плагиоклаз, полевой шпат, халцедон)	Гидрослюда, продукты замещения пироксена	Роговая обманка	Оксиды и гидроксиды Fe	Гранат	Глаукоцит	Циркон	Хромит	Турмалин	Ставролит
1	Песок магнитный (Грузия)	11	зн	78	зн	8	3	зн	зн	зн	—	—	—	—	—
2	Песок магнитный обогащенный (Грузия)	40	зн	55	зн	2	3	зн	зн	зн	зн	—	—	—	—
3	Хвосты после обогащения (Грузия)	1	1	87	1	8	3	зн	—	—	—	зн	зн	зн	зн
4	Песок обогащенный (Крым, пос. Партенит)	3	зн	70	зн	17	3	зн	зн	зн	зн	—	—	—	—

вание аншлифов природного песка из Красного моря и искусственного магнитного песков показал, что в обоих случаях установлено наличие четырех главных минерала: магнетит, гематит, пирит и кварц, но, естественно, в разных пропорциях (рис. 1).

Результаты определения гранулометрического состава магнитных песков и содержания магнетита-мартита по классам крупности приведены в табл. 3 и 4. Для практического использования магнитных песков важно, чтобы фракция магнитных минералов была более мелкозернистая по сравнению с силикатной. В этом плане отметим, что мелкозернистые фракции (< 0,16—0,5 мм) преобладают в обогащенных песках, в пробах песка № 2, № 3 и № 4 также наблюдается существенное содержание магнетита во фракциях песка с размерами 0,25—0,16 мм и < 0,16 мм (см. табл. 4).

Магнитно-минералогический анализ показал, что в камчатском песке из сильномагнитных минералов присутствует только магнетит, но в очень ограниченном количестве (0,13%),

а большая часть представлена слабомагнитным ильменитом (96,94%). Магнитная восприимчивость составляет  $175 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ, т. е. этот песок не относится к магнитному песку природному. В песке с окрестностей Медведь-горы минерал магнетит отсутствует, но в большом количестве имеется мартит (62%) и современные механические примеси (11,31%), в которых присутствует окисленная металлическая стружка. Мартит является сильномагнитным минералом, о чем свидетельствует тот факт, что магнитная восприимчивость данного песка составляет  $7000 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Ильменит в данном песке отсутствует. Песок пос. Любимовка содержит очень незначительное количество магнетита (0,06%), значительное мартита (37,66%) и механических примесей (28,83%), а также оксидов и гидрооксидов железа (см. табл. 3). Магнитная восприимчивость песка  $\approx = 4000 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Следовательно, крымские пески подпадают под определение природного магнитного песка, но в исследуемом регионе он пока обнаружен только в ряде мест на

**Т а б л и ц а 3. Результаты гранулометрических исследований обогащенного магнитного песка из Крыма (пос. Любимовка)**

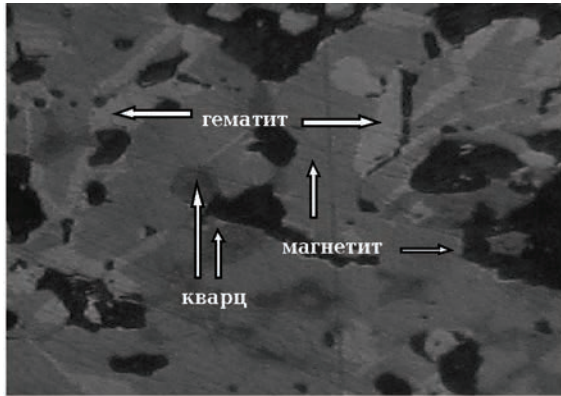
Размер класса, мм	Вес класса, г	Минералогический состав (в числителе — весовое (г), в знаменателе процентное (%) содержание на класс)														
		Магнетит	Мартит	Механические примеси (шлак, стекло, окисленная стружка)	Ильменит	Оксиды + гидроксиды Fe	Пирит	Гранат	Ставролит	Пироксен	Амфибол	Эпидот	Глаукоцит	Группа карбоната	Минералы л/ф (кварц, полевые шпаты, глинисто-слоистые агрегаты, сростки)	Опал
> 7 (крупнее)	1,78	—	1,16/65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,62/35	—
7—5	1,14	—	0,57/50	—	—	0,11/10	—	—	—	—	—	—	—	—	0,46/40	—
5—3	6,06	—	1,62/27	2,13/35	—	1,43/24	—	—	—	—	—	—	—	—	0,83/14	—
3—2	2,53	—	0,61/24	0,86/34	—	0,76/30	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30/12	—
2—1	1,94	—	1,02/52	0,23/12	—	0,19/10	—	—	—	—	—	—	—	—	0,50/26	—
1—0,5	3,91	—	1,59/40	0,89/23	0,02/1	0,17/4	зн	—	—	—	—	—	—	—	1,24/32	—
0,5—0,25	0,24	—	0,05/21	0,07/29	зн	0,02/8	зн	зн	зн	зн	—	—	зн	зн	0,10/42	зн
< 0,25 (мельче)	0,03	0,01/33	зн	0,01/34	—	—	—	зн	зн	зн	зн	зн	зн	—	0,01/33	—
Среднее значение на пробу весом 17,58 г		0,01/0,06	6,62/37,66	4,19/23,83	0,02/0,11	2,68/15,25	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	4,06/23,09	зн

Черноморском побережье в небольших скоплениях с незначительным содержанием оксидов железа. Поэтому изучение данных песков вносит некоторый вклад в геолого-геофизическую область исследований, в плане определения минерального состава, природы намагниченности, места расположения материнских пород, путей сноса материала и т. д., но их промышленное использование сомнительно.

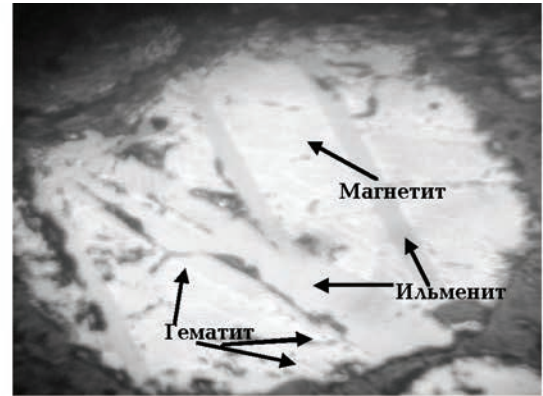
**Магнитная восприимчивость песков.** Исследованные пески имеют, как правило, высо-

кие значения магнитной восприимчивости. Естественно, что величина магнитной восприимчивости зависит от степени обогащения исходного песка, т. е. от концентрации магнитного материала. В частности, магнитные пески из Грузии характеризуются следующими значениями магнитной восприимчивости: необогащенный песок —  $68,45 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, обогащенный —  $221 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, остатки песка после обогащения —  $7,6 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ. Крымский магнитный песок из Партенита имеет маг-

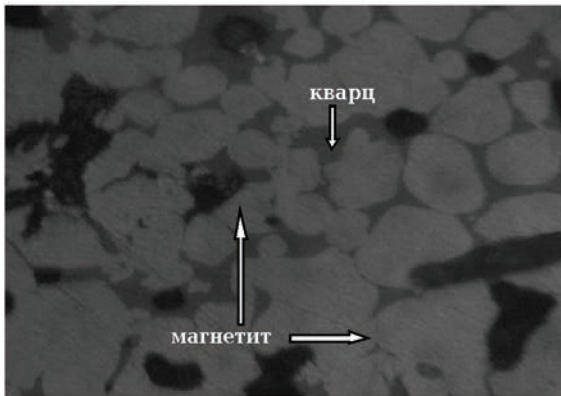




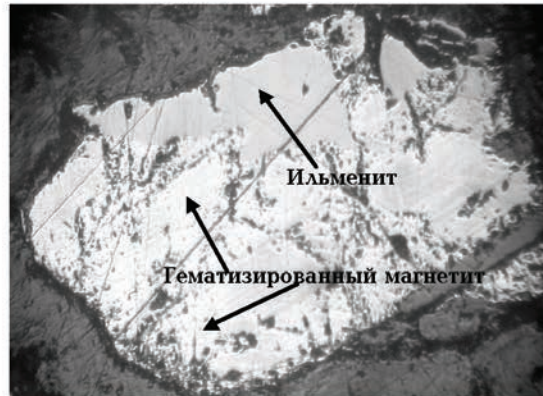
*а*



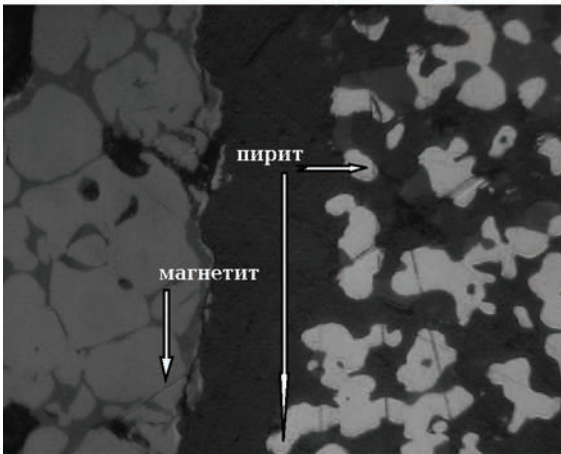
*г*



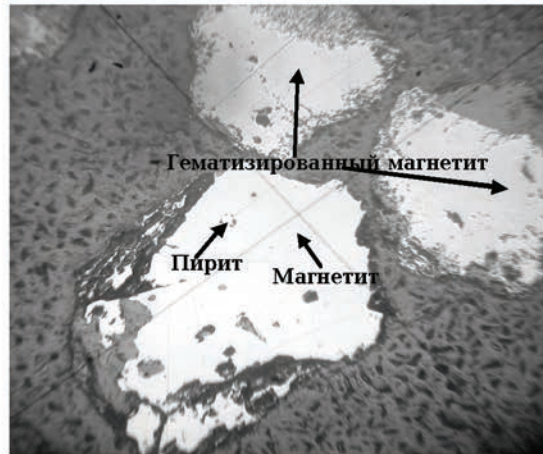
*б*



*д*



*в*



*е*

Рис. 1. Минералогический состав искусственного аналога природного магнитного песка (*а, б, в*) и необогащенного магнитного песка с берега Красного моря (*г, д, е*) на основании анализа шлифов. Образцы с наличием: *а* — магнетита, гематита, кварца (увеличение  $\times 500$ ); *б* — магнетита и кварца ( $\times 500$ ); *в* — магнетита и пирита ( $\times 125$ ); *г* — магнетита, гематита и ламелей ильменита ( $\times 300$ ); *д* — ильменита и гематизированного магнетита ( $\times 120$ ); *е* — магнетита, гематизированного магнетита и зерна пирита ( $\times 120$ ).

нитную восприимчивость  $0,98 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, Рыбачьего —  $28 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, Нового Света —  $32 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, с мыса Фиолент —  $10 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ. Высокой магнитной восприимчивостью обладают пески западного побережья Крыма, отобранные у пос. Николаевка —  $(40—50) \cdot 10^{-3}$  ед. СИ, очень высокой — пески Красного моря ( $\approx 227 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ). Магнитный песок с о-ва Коневец (Ладожское озеро) характеризуется небольшими значениями магнитной восприимчивости ( $4 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ) из-за низкой концентрации ферромагнетика. Высокие значения магнитной восприимчивости, естественно, у искусственного магнитного песка  $\approx 75 \cdot 10^{-3}$  ед. СИ.

**Терромагнитный анализ.** Выполненный для всех образцов терромагнитный анализ позволил определить температуру Кюри и тип ферромагнетика, характерного для разных песков, который в большинстве случаев подтверждает результаты минералогического анализа. Температура Кюри  $580^\circ\text{C}$  подавляющего большинства образцов магнитного песка свидетельствует, что они представлены практически чистым магнетитом (рис. 2).

Магнитные свойства образцов песка, которые являются достаточной совокупной магнитной характеристикой его типа и качества, показаны на примере песка из Грузии и Крыма (табл. 5). Кривая зависимости намагничен-

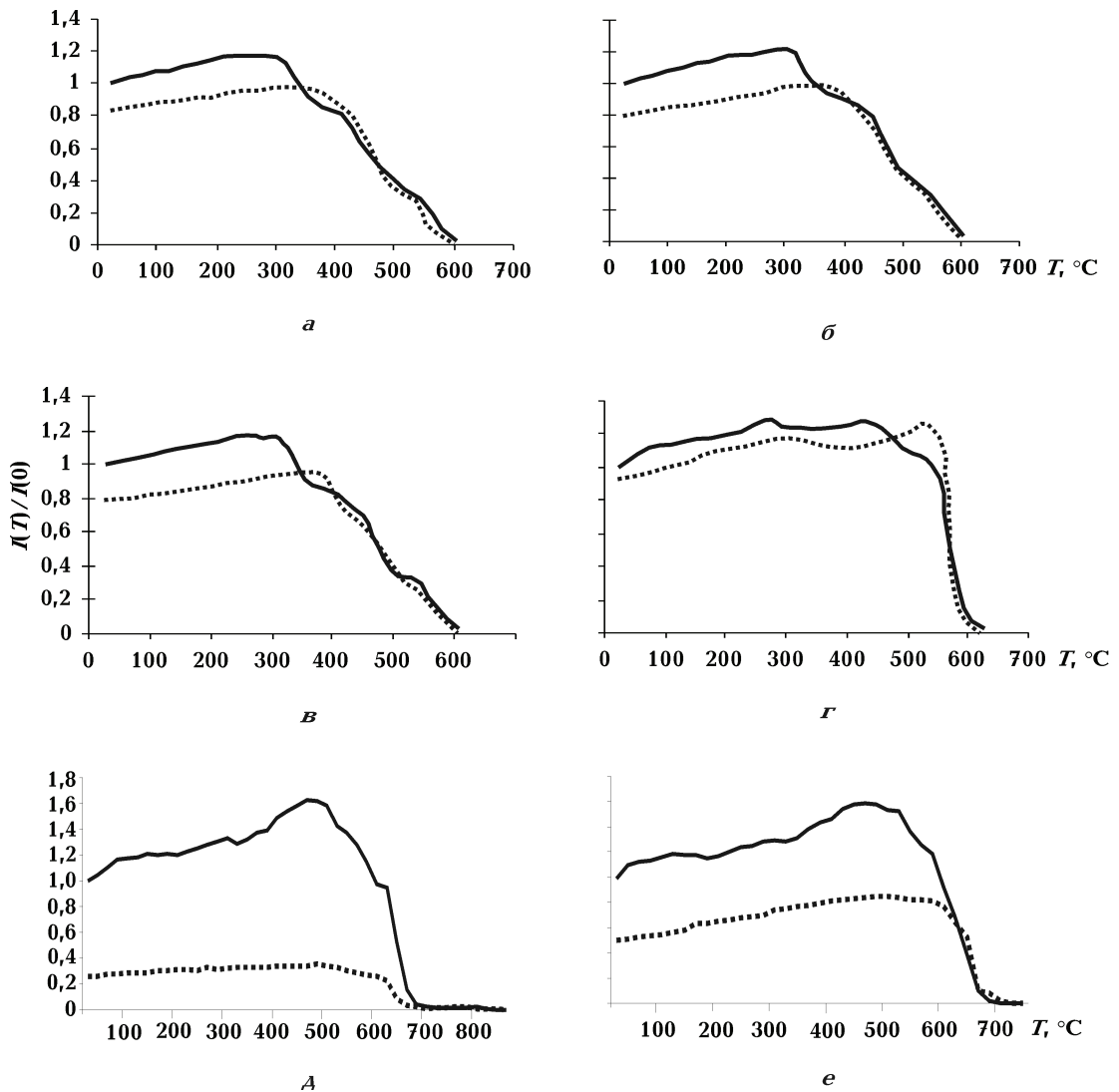


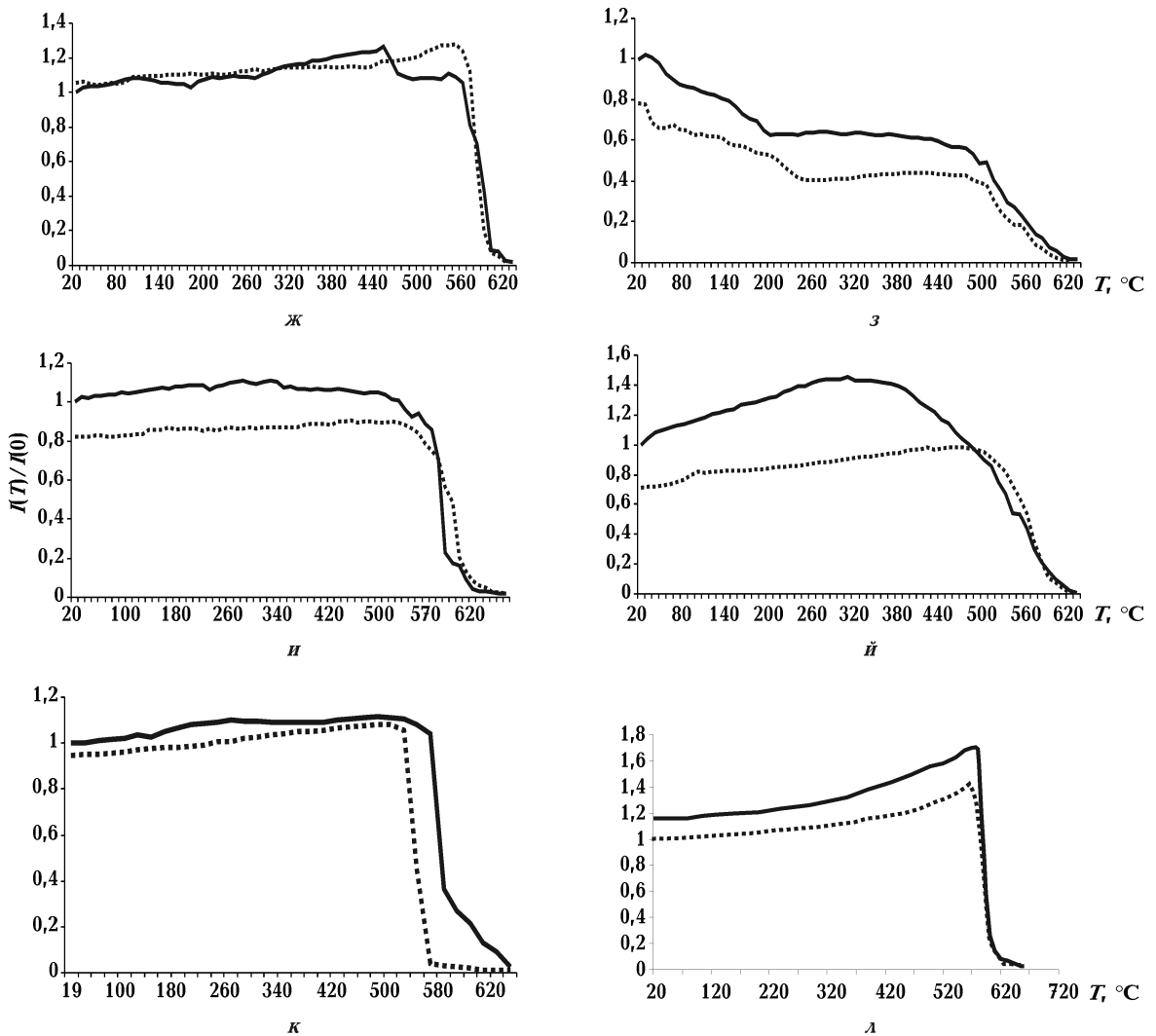
Рис. 2. Терромагнитный анализ образцов магнитного песка: а—в — Грузия (а — необогащенный, б — обогащенный, в — хвосты после обогащения); г—и — Крым (г — Партенит, д — Рыбачье, е — Новый Свет, ж — Николаевка, 2 км южнее пансионата, з — Николаевка, напро-



ности насыщения от температуры получена в непрерывном режиме "нагрев — охлаждение" в постоянном магнитном поле 2000 Э. Как видно, первые три пробы из Грузии имеют идентичные зависимости (рис. 2, а—в), что и следовало ожидать, поскольку минералогический состав у этих проб один и тот же, различие только в количестве ферромагнетика (см. табл. 2). Для образцов из поселков Партенит, Рыбачье, Новый Свет, Николаевка (2 км от пансионата), Табы и искусственного песка наблюдаются также близкие зависимости с потерей намагниченности в пределах 520—600 °С (рис. 2, г—л). Немного другая картина наблюдается для образца с о-ва Коневец, где

уменьшение намагниченности происходит при температуре 300 °С, и для одного из образцов, отобранного возле пансионата "Николаевка", для которого максимальное уменьшение намагниченности происходит при температуре 120 °С и 570 °С (рис. 2, и, к).

Для образцов была получена остаточная намагниченность насыщения и определено магнитное поле ( $H_c$ ), которое ее компенсирует. Этот параметр характеризует магнитную жесткость образца. На рис. 3 приведены результаты экспериментов. Кривые нормального (изотермического) намагничивания практически совпадают для всех образцов, а кривые размагничивания для первых трех образцов по-



тив пансионата, и — Фиолент); й — о-в Коневец, Ладожское озеро, Россия; к — Таба, Египет; л — искусственный аналог песка. Черной жирной линией показано изменение намагниченности образцов в процессе нагревания, а точками — в процессе охлаждения.

Т а б л и ц а 5. Магнитные свойства исследованных образцов

Номер пробы	Материал пробы	Содержание магнитной фракции	$10^{-6}$ ед. СГСМ	$H_c$ , Э	$T_i$ , °С
1	Песок магнитный (Грузия)	магнетит — 11 %, мартит — знаки	4400	144	450, 540, 600
2	Песок магнитный обогащенный (Грузия)	магнетит — 40 %, мартит — знаки	17 600	158	450, 540, 600
3	Хвосты после обогащения (Грузия)	магнетит + мартит — 1 %	600	130	450, 540, 600
4	Песок обогащенный (Крым, Партенит)	магнетит — 3 %, мартит — знаки	980	237	580

добны ( $H_c$  равна ~ 150 Э). В магнитном отношении крымский образец более жесткий ( $H_c$  составляет 230 Э).

Анализ приведенных выше результатов свидетельствует о постоянстве типа ферромагнетиков и основных магнитных параметров для песков, отобранных с довольно представительного ареала. Главным магнитным минералом является магнетит. Температура Кюри для всех

исследованных образцов соответствует температуре Кюри чистого магнетита (578 °С). Другой менее распространенный магнитный минерал — титаномагнетит. Температура Кюри титаномагнетита изменяется в пределах 100—578 °С (в образцах, где присутствует титаномагнетит, температура Кюри не выходит за эти пределы (см. рис. 2)). Изученная для нескольких образцов коэрцитивная сила ( $H_c$ ) также соот-

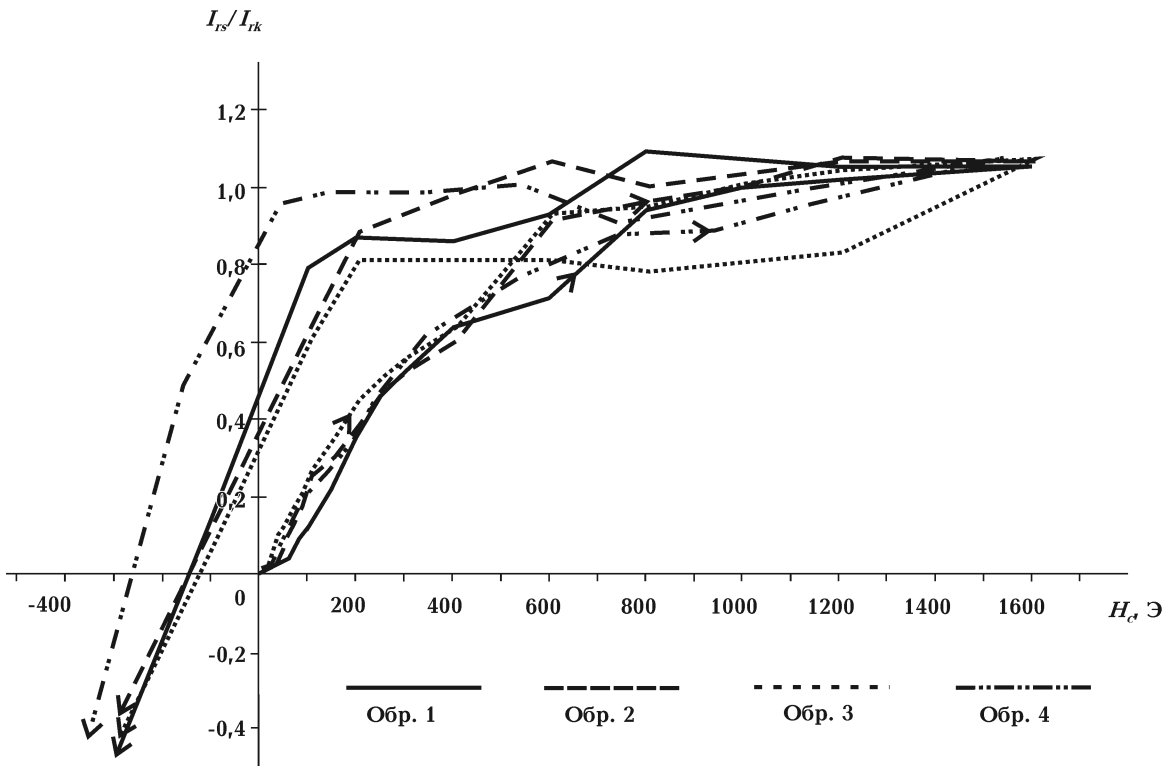


Рис. 3. Результаты определения коэрцитивной силы ( $H_c$ ) исследуемых образцов.

ветствует ее классическим значениям для магнетита и титаномагнетита. Изученные черные титановые пески, которые ранее ассоциировались с магнитными песками, не являются таковыми, поскольку не обладают необходимой величиной магнитной восприимчивости.

**Области применения.** В начале XX в. черные пески рассматривались только в качестве металлургического сырья [Чирвинский, Ульянов, 1928]. К настоящему времени анализ разрозненных, но многочисленных литературных источников позволил определить много новых областей практического применения магнитного песка. Он может использоваться как самостоятельно, так и в качестве элемента различных смесей.

Параметры, качество и эффективность применения перечисленных разработок зависят от свойств исходного магнитного материала.

К настоящему времени магнитные порошки и пески используются в магнитных системах [Калинкин, 1975; Шляго и др., 1978]; комплексах подготовки питьевой воды для очистки, доочистки сточных и технических вод, обработки водных систем различного назначения, когда в фильтрах используются зернистые материалы [Коваленко, Ильинский, 1982; Кульский, Душкин, 1988; Кульский, Строкач, 1981; Курников и др., 1988; 1989; Сокольский, 1990]; для изготовления магнитного порошка, применяемого в качестве наполнителя при разработке постоянных твердых и гибких магнитов [Алексеев, Корнеев, 1976; Рабкин и др., 1968; Курников и др., 1978]; магнитной жидкости [Бибик, Бузунов, 1979; Курников и др., 1975]; композиционных материалов [Курников и др., 1975; 1978]; магнитно-абразивных порошков [Барон, 1986].

Производство композиционных изделий осуществляется путем дробления магнитов или спеканием. Поскольку первый способ трудоемкий и дорогой, он имеет ограниченное применение. Изготовление наполнителя из магнитного песка спеканием экономичнее, технологичнее и позволяет получить новые, высокоэнергетичные магнитные материалы путем соединения оксидов железа с оксидами кобальта, никеля, цинка, стронция и других металлов редкоземельной группы [Рабкин и др., 1968]. Потребность в широком использовании такой технологии назрела давно, но ограничивалась отсутствием доступного по цене исходного материала, которым на данном этапе может быть пока еще мало востребованный магнитный песок.

Рекомендуемый размер частиц магнитного наполнителя композиционных материалов составляет 50—200 мкм. Так как он совпадает с размерами частиц магнитной фракции магнитных песков, это значительно расширяет область их применения, упрощает технологии изготовления и реализации магнитных материалов [Курников и др., 1980].

Следовательно, комплексное использование песка и магнитных систем делает доступнее разработку и реализацию новых технологий с улучшенными экономическими показателями и экологическими свойствами для следующих целей:

- централизованная подготовка питьевой воды [Кульский, Душкин, 1988; Кульский, Строкач, 1981];
- очистка технических и сточных вод [Класен, 1981; 1982; Коваленко, Ильинский, 1982];
- сооружение и эксплуатация нефтегазовых скважин [Курников и др., 1988, Кусакин и др., 1990];
- магнитно-абразивная обработка в машиностроении [Барон, 1986, Шляго, Бибик, 1978];
- транспортировка твердых полезных ископаемых [Курников, 1991; Штокман, 1972];
- повышение прочностных характеристик изделий из цементных растворов [Курников и др., 1989];
- создание ленточных конвейеров на магнитной подушке [Курников, 1991];
- создание ленточных конвейеров для сложных трасс [Курников, 1991];
- создание конвейеров для сложных трасс с магнитоактивными лентами [Курников, 1991];
- оздоровительно-лечебные процедуры [Бирла, Хэмлин, 2002; Орлюк и др., 2005].

К настоящему времени ограниченное практическое применение нашли только магнитные пески на грузинском побережье Черного моря, которые используются в лечебных целях как физиотерапевтическое средство на курорте "Уреки".

На Черноморском побережье Украины и в Приазовье, где обнаружены пока только небольшие скопления магнитного песка, необходимо проводить целенаправленные геолого-геофизические работы по выявлению его крупных россыпей.

В связи с этим следует обратить внимание на магнитные вещества техногенного происхождения, параметры и качество которых превышает природные магнитные пески. В част-

ности, на горно-обогатительных комбинатах Криворожского региона накопились огромные запасы отходов (более 1 млрд тонн), которые по существу представляют собой магнитные пески высокого качества. В них концентрация магнитного железа достигает 8%, которое представлено преимущественно магнетитом. Использование хвостов горно-обогатительных комбинатов в качестве исходного сырья не только снизит затраты на добычу, но и позволит существенно улучшить экологическую обстановку загрязненных районов. Другой возможный путь получения материала — аналога природного магнитного песка — изготовление магнетитового концентрата.

С целью поиска альтернативы природному магнитному песку в отделе ОАО НИИП "Механобрчермет" г. Кривой Рог в небольшом количестве был изготовлен искусственный магнитный песок в виде гранул из магнетитового концентрата крупностью 0,5—2 мм с массовой долей железа 68—69 %.

В случае успешных испытаний искусственного магнитного песка его производство может исчисляться сотнями тонн в год для использования на станциях водоподготовки.

Исходя из анализа исследуемых минералов, требуется углубленное изучение магнитных песков различных регионов и их классификация с целью выработки нормативных требований для применения в различных областях и условиях использования.

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований является, во-первых, изучение сильномагнитных титаномagnetитовых песков, широко распространенных на территории Украины, а во вторых, использование искусственного магнитного песка.

**О создании фильтров и установок с использованием магнитного песка.** Магнитный песок предполагается использовать в комплексах водоподготовки, очистки и доочистки питьевой воды, сточных и технических водных систем, в фильтрах с зернистыми минералами и наполнителями.

Минералогический состав магнитного песка и гранулометрические исследования показывают, что наибольшее содержание магнетита фиксируется в образцах с размерами зерен 0,05—1,8 мм при удельном весе 3,6 г/см<sup>3</sup> и пористости 33—34 % [Orliuk, Kurnikov, 2011].

Коэрцитивная сила различных песков составляет 150—230 Э. Это создает возможность получить высокоградиентное магнитное поле, дополнительно обеспечивающее, кроме очист-

ки, омагничивание протекающей среды и связанного с этим повышение качества обработки водных систем [Пат. № 44067 ..., 2009].

Магнитные параметры песка, качество и работоспособность может сохраняться долгие годы и неограниченно при применении регенерации фильтров и устройств. Омагничиванию водных систем и исследованиям влияния магнитных полей на свойства воды посвящено много работ и монографий [Бердышев и др., 2009; Кусакин и др., 1990; Сокольский, 1990]. Аппараты по магнитной обработке воды широко используются в промышленности и быту.

Магнитный песок, состоящий из притягивающихся друг к другу частиц минералов с природным намагничиванием, образует при определенных условиях вязкую массу и становится магнитным носителем в виде пескообразного наполнителя. Он сохраняет свои свойства длительное время (до нескольких десятков лет), формируя магнитное поле определенной конфигурации. Магнитное поле такого наполнителя при необходимости может изменяться внешним магнитным полем любого происхождения в зависимости от поставленных задач обработки воды, в том числе и ее омагничивания, значительно расширяя функции магнитного песка. Песок в этом случае становится элементом магнитной системы, обеспечивающим, кроме фильтрации, магнитную обработку протекающей среды.

Параметры магнитной системы (фильтрующе-омагничивающего устройства) зависят от назначения, технической характеристики устройства и требований к конечному продукту. Вопросам омагничивания и фильтрации водных систем посвящено много литературы и исследований, поэтому в данной статье не рассматриваются. Рекомендации, приведенные в литературе по омагничиванию водных систем, будут приняты во внимание в дальнейших исследованиях.

При омагничивании и очистке воды от коллоидных частиц, обладающих довольно большой магнитной восприимчивостью, установлены уникальные изменения свойств воды после воздействия на нее магнитным полем невысокой напряженности, характерной для магнитного песка, в течение 10—20 часов [Бердышев и др., 2009].

Магнитный песок самостоятельно и в комбинации с другими минералами (шунгит, цеолит, силекс, кварцевый песок) может обеспечивать очистку воды или водной системы от

железа, в том числе и в ионном состоянии (коллоидное железо), а также придать воде другие свойства, например лечебные. Это позволит решить проблему универсальных фильтров очистки и омагничивания водных систем различного назначения с большим ресурсом работы.

Общее устройство бытовых фильтров и установок с использованием магнитного песка в качестве наполнителя фильтрующих насадок на первом этапе освоения конструктивно не будут существенно отличаться от используемых в настоящее время (с минеральными наполнителями), в том числе и серийно выпускаемых.

Принципиальное отличие заключается в замене наполнителя на магнитный песок с изменением гидравлической схемы фильтрующего устройства (с учетом регенерации), обеспечивающей обязательную фильтрацию и омагничивание воды всем объемом наполнителя, заполняющего контейнер.

Универсальное устройство, совмещающее функции фильтрации и омагничивания водопроводной, речной или подземной воды, а также получения воды повышенного качества, содержится в своей конструкции корпус из экологически чистого материала, выдерживающего необходимое рабочее давление [Пат. № 44067 ..., 2009].

В середине основного корпуса размещены фильтрующие элементы в составе сетчатого контейнера, размещенного вертикально и загруженного фильтрующим материалом, в данном случае магнитным песком. При необходимости в один сетчатый контейнер с магнитным песком можно загружать шунгит, цеолит, силекс (силевит) или кремниевый песок.

При предварительных испытаниях опытного образца, изготовленного в лабораторных условиях Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, отмечены позитивные результаты очистки воды. Исследования показали снижение жесткости воды и уменьшение в 3 раза количества растворенного в воде железа, а также улучшение других важных показателей загрязненности воды без применения реагента в технологическом процессе ее очищения. Использование при очистке воды усовершенствованного фильтра, с расположением природного магнитного песка во внешней магнитной системе, привело к уменьшению содержания общего железа в воде, в том числе и коллоидного, до уровня допустимой концентрации для питьевой воды (0,28—0,57 мг/дм<sup>3</sup> при исходной концентрации 13,64—

13,76 мг/дм<sup>3</sup>). Кроме железа, изменяются показатели воды по ряду других элементов и параметров. В частности, изменяется pH (с 6,9 до 7,6), окисляемость (с 8,96 до 5,12), уменьшается количество хлора (с 21,14 до 7,95 мг/дм<sup>3</sup>), фосфатов (с 0,37 до 0,08 мг/дм<sup>3</sup>), аммонийного азота (с 1,00 до 0,2 мг/дм<sup>3</sup>) и т. д. Эти показатели превзошли наши ожидания, продемонстрировав не только очистку воды от железа, но и ее омагничивание.

Аналогичные исследования в тех же условиях с использованием наполнителя из искусственного магнитного песка показали более низкие результаты и эффективность работы фильтра.

Физические процессы обработки водных систем в устройствах с природным и искусственным магнитным песком требует дальнейших исследований. Вместе с тем пробные испытания и экспериментальные исследования позволяют с оптимизмом рассчитывать на перспективность применения магнитного песка при фильтрации.

При использовании магнитного песка на станциях водоподготовки питьевой воды возникает проблема о его количестве, качестве и обогащении, особенно пляжных песков, что связано с экологией пляжей и требует проведения специальных исследований в отношении поиска залежей песка в больших объемах.

**Выводы.** 1. Впервые обобщена многочисленная информация о природных черных (магнитных) песках и непосредственно исследованы пески из многих регионов мира: Черноморского побережья Кавказа и Крыма, Камчатки, Ладожского озера, Красного моря.

2. Магнитно-минералогический анализ показал, что основным магнитным минералом магнитных песков является магнетит, а второстепенным — титаномагнетит. Песок сохраняет свои магнитные качества длительное время при температуре до 580 °С.

3. В связи с трудностями поиска и добычи в больших количествах природного магнитного песка создан его искусственный аналог.

4. Реализована идея использования природного магнитного песка в качестве наполнителя различных технических устройств и фильтрующих систем для очистки воды и водоподготовки.

5. Использование внешних магнитных полей позволяет применять системы с магнитным песком в качестве омагничивающих и фильтрующих устройств.

6. Результаты исследования на экспериментальных и опытных устройствах показали высокую эффективность омагничивания и фильтрации воды.

**Благодарности.** Авторы благодарны начальнику минералогической лаборатории В. В. Серееде за выполнение минералогических и гранулометрических исследований, начальнику химико-аналитической лаборатории З. В. Орлюк за химический анализ образцов песка и воды (Центральная лаборатория ПДРГП "Північгеологія"), Н. К. Воробьеву, директору НИИП "Механобрчермет", г. Кривой Рог за участие в разработке аналога природного магнитного

песка, зав. учебной лабораторией кафедры геофизики геологического факультета Киевского национального университета им. Т. Шевченко С. А. Попову и аспиранту ИГФ НАН Украины В. В. Друкаренко за помощь при проведении термомагнитного анализа образцов и минералогических исследований искусственно-аналога природного песка. Особую признательность выражаем доктору геол.-мин. наук, главному научному сотруднику Института геофизики им. С. И. Субботина О. М. Русакову за плодотворные дискуссии и обсуждение отдельных положений статьи.

### Список литературы

- Абих Г. В. Месторождение магнитного железняка на берегу Черного моря (реки Сужа, Катамба) // Горн. журн. — 1856. — Ч. 3. — С. 10—15.
- Агбунов М. В. Античная лоция Черного моря. — Москва: Наука, 1987. — 156 с.
- Алексеев Л. Г., Корнеев А. В. Эластичные магнитные материалы. — Москва: Химия, 1976. — 197 с.
- Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. — Ленинград: Машиностроение, 1986. — 156 с.
- Бердышев Г. Д., Дешко Н. А., Мельничук С. В., Козодой Ю. А. Легкая вода — эликсир молодости и долголетия. — Киев: Фитосоциоцентр, 2009. — 160 с.
- Бибик Е. Е., Бузунов О. В. Достижения в области получения и применения ферромагнитных жидкостей. — Москва: ЦНИИ "Электроник", 1979. — Сер. 6, вып. 7. — 660 с.
- Бирла Г. С., Хэмлин К. Магнитотерапия. — Москва: Гранд, 2002. — 234 с.
- Бойко Н. И., Власов Д. Ф., Голиков-Заволженский И. В., Седлецкий В. И., Талпа Б. В. Справочник по неметаллическим полезным ископаемым Краснодарского края. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1975. — 580 с.
- Геология СССР. Северный Кавказ, геологическое описание. Том 9. — Москва: Недра, 1968. — 760 с.
- Калинкин А. К. Анализ конструкций магнитно-жидкостных уплотнений // Вопросы теории и расчета электрических машин и аппаратов. — Иваново: Изд. Иванов. энергет. ин-та, 1975. — Вып. 6. — С. 280—282.
- Класен В. И. О перспективах использования магнитной обработки сточных вод // Водные ресурсы. — 1981. — № 4. — С. 146—152.
- Класен В. И. Омагничивание водных систем. — Москва: Химия, 1982. — 296 с.
- Коваленко В. П., Ильинский А. А. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений. — Москва: Химия, 1982. — 270 с.
- Кульский Л. А., Душкин С. С. Магнитное поле и процессы водоподготовки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 112 с.
- Кульский Л. А., Строкач П. П. Технология очистки природных вод. — Киев: Вища шк., 1981. — 327 с.
- Курников Ю. А. Теоретические и экспериментальные основы создания горно-транспортных средств с использованием полей постоянных магнитов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Днепрпетровск, 1991. — 36 с.
- Курников Ю. А., Концур И. Ф., Паневник А. В. Активизация тампонажного раствора для повышения качества крепления скважин // Нефтяное хозяйство. — 1989. — № 6. — С. 29—31.
- Курников Ю. А., Концур И. Ф., Паневник А. В. Омагничивающие устройства для активации водных систем // Нефтяная и газовая промышленность. — 1988. — № 4. — С. 29—31.
- Курников Ю. А., Кравченко С. Н., Орлюк М. И. Магнитный песок — новый взгляд на практи-

- ческое использование // Геология и полезные ископаемые мирового океана. — 2005. — № 2. — С. 111—120.
- Курников Ю.А., Кравченко С.Н., Орлюк М.И. Магнитно-минералогические исследования природного песка крымского побережья // Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазоносных регионов Украины: Тез. докл. VII междунар. конф. Украины "Крым-2007". — Симферополь: Изд-во Ассоциации геологов г. Симферополь, 2007. — С. 222—224.
- Курников Ю.А., Сливной В.Н., Лейзан Л.И., Борода З.В. Исследование возможности использования магнитоэласта для конвейеров на магнитной подушке // Шахтный и карьерный транспорт. — Москва: Недра, 1978. — Вып. 4. — С. 103—108.
- Курников Ю.А., Сливной В.Н., Лейзан Л.И., Захаров А.Ю. Разработка эластичных магнитов с повышенными магнитными свойствами для ленты конвейера на магнитной подушке // Шахтный и карьерный транспорт. — Москва: Недра, 1980. — Вып. 6. — С. 129—132.
- Курников Ю.А., Юрченко В.М., Сливной В.Н. О кривой намагничивания магнитомягкой обкладки резинотканевой ленты // Механизация горных работ. — Кемерово: Изд. Кузбас. политех. ин-та, 1975. — Вып. 75. — С. 280—282.
- Кусакин А.Б., Курников Ю.А., Концур И.Ф., Паневник А.В. Результаты испытаний омагничивающих устройств для предупреждения солеотложений // Газовая промышленность. — 1990. — № 7. — С. 33—34.
- Орлюк М.И., Курников Ю.А., Кравченко С.Н. Магнитный песок: комплексные магнитно-минералогические исследования и перспективы практического использования // Экологія і природокористування. — 2005. — Вып. 8. — С. 83—89.
- Пат. на корисну модель № 44067. Універсальний фільтрувальний пристрій для очищення водопровідної або річкової, або підземної води і одержання питної води підвищеної якості споживання "ПРИРОДНИЙ" / Ю. О. Курніков, Г. Д. Бердишев, М. І. Орлюк, Є. С. Тимочко. — Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі. — Опубл. 10.09.09, Бюл. № 17.
- Печерский Д.М. Палеомагнитология, петромагнитология и геология. — Москва: Наука, 2000. — 123 с.
- Рабкин Л.И., Соскин С.А., Эпштейн Б.Ш. Ферриты. — Ленинград: Энергия, 1968. — 379 с.
- Сокольский Ю.М. Омагниченная вода — правда и вымысел. — Москва: Химия, 1990. — 144 с.
- Физические свойства горных пород и полезные ископаемые (петрофизика) / Под ред. Н.Б. Дортман. — Москва: Недра, 1976. — 528 с.
- Цветкова-Голева В. Тяжки минерали в пясъците от южного българского крайбережие // Изв. Геол. ин-та БАН. Сер. рудн. — 1975. — 23. — С. 77—81.
- Чирвинский П.Н., Ульянов А.А. Черный песок реки Супсы на Кавказе // Изв. Дон. политех. ин-та. — 1928. — XI. — С. 1—11.
- Шляго Ю.И., Бибик Е.Е., Евстишенков В.С. Применение магнитно-реологических жидкостей с абразивным наполнителем для обработки стекла // Стекло и керамика. — 1978. — № 1. — С. 19—20.
- Шнюков Е.Ф., Белогег Р.М., Цемко В.П. Полезные ископаемые Мирового океана. — Киев: Наук. думка, 1979. — 256 с.
- Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Черного моря. — Киев: Карбон-Лтд, 2004. — 278 с.
- Штокман И.Г. Основы создания магнитных транспортных установок. — Москва: Недра, 1972. — 192 с.
- Haage R. Beitz zur kenntnis der schwarzen sande von Bargas // Berg. Deutsch. Ges. Geolwiss. B. Miner. Lagerstätten. — 1968. — № 5. — P. 13—20.
- Orliuk M.I., Kurnikov Yu.A. Natural magnetic sands: mineralogical and magnetic characteristic and its practical using. Abstracts of the 12<sup>th</sup> "Castle Meeting" New Trends in Geomagnetism Paleoleo, Rock and Environmental Magnetism. Travaux Geophysiques XXXIX. — Acad. Sci. Czech Republic, 2010. — P. 58.