

## ВЛИЯНИЕ ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ВАРИАЦИИ СОСТАВА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ФОСФОРИТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЕГИПТА

**Х.М. Баюми**

*School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia*

Промышленные фосфориты позднемиоценового возраста из районов Красного моря, долины р. Нил и плато Абу Тартур (Египет) характеризуются заметными вариациями в литологическом составе ассоциирующих осадков, минералогии нефосфатных компонентов и в распределении главных и редких элементов. На участке Красного моря пачки фосфоритов переслаиваются с тонкослоистыми черными сланцами, а нефосфатные компоненты представлены обломочным кварцем и кальцитом, а также кальцитовым, анкеритовым и пиритовым цементом. На участке долины р. Нил пачки фосфоритов переслаиваются с кремнистыми сланцами, мраморами и песчаниками, а нефосфатные компоненты представлены обломочным кварцем и кальцитом, а также халцедоновым цементом. На плато Абу Тартур пачки фосфоритов переслаиваются с тонкослоистыми черными сланцами, а нефосфатные компоненты представлены обломочным кварцем, анкеритом и пиритовым цементом. Изученные фосфориты также показывают заметные вариации концентраций главных и редких элементов. Фосфориты с участка Абу Тартур имеют относительно более высокие содержания  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , Co, Nb, Pb, Sr, Th, Y и Zr и более низкие —  $SiO_2$ , Ba и U по сравнению с фосфоритами участков Красного моря и долины р. Нил. Положительная корреляция между  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ ,  $K_2O$ , Nb, Yb и Zr позволяет предположить обломочное происхождение таких компонентов.

Близкий состав фосфатных компонентов, образовавшихся вне области отложения, а также вариации литологического состава ассоциирующих осадков, минералогии и геохимии нефосфатных составляющих, отражающих условия областей отложения, позволяют сделать вывод, что вариации условий отложения фосфоритов являются потенциальным фактором, контролирующим состав этих фосфоритов. Распространенность черных сланцев на участках Красного моря и Абу Тартур, а также анкерита и пирита, цементирующих фосфатные компоненты, видимо, отражают восстановительные условия в этих областях, а обилие кремнисто-обломочных осадков, кальцитового и халцедонового цемента — более окислительные условия в области долины р. Нил. Восстановительные условия в районах Красного моря и Абу Тартур, вероятно, возникли в пределах ранее образовавшихся депрессий в шельфовой обстановке. Эти депрессии могли возникнуть в результате изменения движения Северо-Атлантической, Евразийской и Африканской плит в позднеантонское время, что привело к трансгрессивной инверсии рифтов вдоль Северного Египта и последующего образования складчатости во внутриконтинентальных обстановках. Повышенные содержания элементов обломочного происхождения в фосфоритах Абу Тартур относительно фосфоритов Красного моря и долины р. Нил может свидетельствовать о дополнительном поступлении обломочного материала в ходе отложения фосфоритов в области Абу Тартур. Продукты диагенеза и выветривания этих месторождений также отражают вариации условий осадконакопления.

*Фосфориты, литология, состав, среда отложения, Египет.*

## EFFECT OF THE DEPOSITIONAL ENVIRONMENT ON THE COMPOSITIONAL VARIATIONS AMONG THE PHOSPHORITE DEPOSITS IN EGYPT

**H.M. Baioumy**

Late Cretaceous economic phosphorites from the Red Sea, Nile Valley, and Abu Tartur areas, Egypt, show distinct variations in the lithology of associated sediments, mineralogy of nonphosphatic constituents, and distributions of major and trace elements. In the Red Sea area, the phosphorite beds are intercalated with laminated black shales, and the nonphosphatic constituents are detrital quartz and calcite, ankerite, and pyrite cements. In the Nile Valley, the phosphorite beds are intercalated with chert, marl, and sandstone, and the nonphosphatic constituents are detrital quartz and calcite and chalcedony cements. In the Abu Tartur Plateau, the phosphorite beds are intercalated with laminated black shales, and the nonphosphatic constituents are detrital quartz and ankerite and pyrite cements. The phosphorites studied also show distinct variations in major- and trace-element concentrations. The Abu Tartur phosphorites have higher contents of  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ , Co, Nb, Pb, Sr, Th, Y, and Zr and lower contents of  $SiO_2$ , Ba, and U as compared to those in the Red Sea and Nile Valley areas. The positive correlations between  $Al_2O_3$  and  $TiO_2$ ,  $K_2O$ , Nb, Y, and Zr suggest the detrital origin of these constituents.

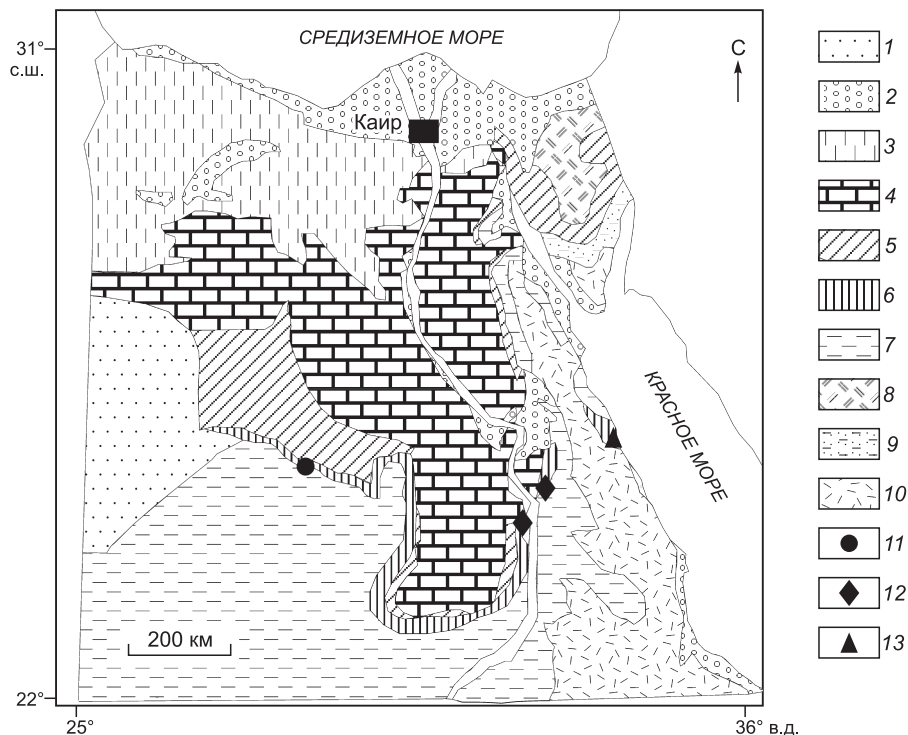
Similarity in the phosphatic constituents, which were derived from outside the depositional sites, and variations in the lithology of associated sediments and the mineralogy and geochemistry of the nonphosphatic

constituents, which reflect the conditions at the depositional sites, suggest that the variations in the depositional environment of the phosphorites are the potential controlling factor of the compositional variations among these phosphorites. The abundance of black shales in the Red Sea and Abu Tartur areas, as well as the occurrence of ankerite and pyrite as cementing materials for the phosphatic constituents, might reflect reducing conditions in these areas, while the abundance of siliciclastic sediments and calcite and chalcedony cements suggests oxidizing conditions in the Nile Valley. The reducing conditions in the Red Sea and Abu Tartur areas were probably developed within the pre-existing depressions in a shelf environment. These depressions might have formed as a result of a change in the movements of the North Atlantic, Eurasian, and African Plates during the late Santonian, which led to transgressive inversion of rifts along northern Egypt and consequent folding in the continental interior. The higher contents of detrital components in the Abu Tartur phosphorites, as compared to the Red Sea and Nile Valley areas, suggest more detrital inputs during the deposition of the phosphorites in Abu Tartur. The products of the diagenesis and weathering of these deposits also reflect the variations in the depositional conditions.

*Phosphorites, lithology, composition, depositional environment, Egypt*

### ВВЕДЕНИЕ

Состав осадочных фосфоритов очень изменчив [Smith, Lehr, 1966; Bliskovski et al., 1967; Lehr et al., 1967; McClellan, Lehr, 1969; McArthur, 1978; Jarvis et al., 1994], и многие авторы пытались объяснить эту изменчивость с точки зрения факторов внешней среды, действовавших во время фосфогенеза, либо на основе постформационного изменения [McArthur, 1985]. Авторы [Whippo, Murrowchick, 1967] предположили, что точно не установленное воздействие окружающей среды, имевшее место во время образования фосфоритов, отвечало за химические вариации состава нескольких фосфоритовых месторождений США. В.В. Блисковски с соавторами [1967] полагали, что отношения Sr/Ca, варьирующие как в пределах отдельных фосфатных месторождений, так и от месторождения к месторождению, особенно в месторождениях бывшего СССР, непосредственно отражают величину Sr/Ca в осадочных водах.



**Рис. 1. Геологическая карта Египта с указанием положения изученных площадей (с изменениями по [Spanderashvilli, Mansour, 1970]).**

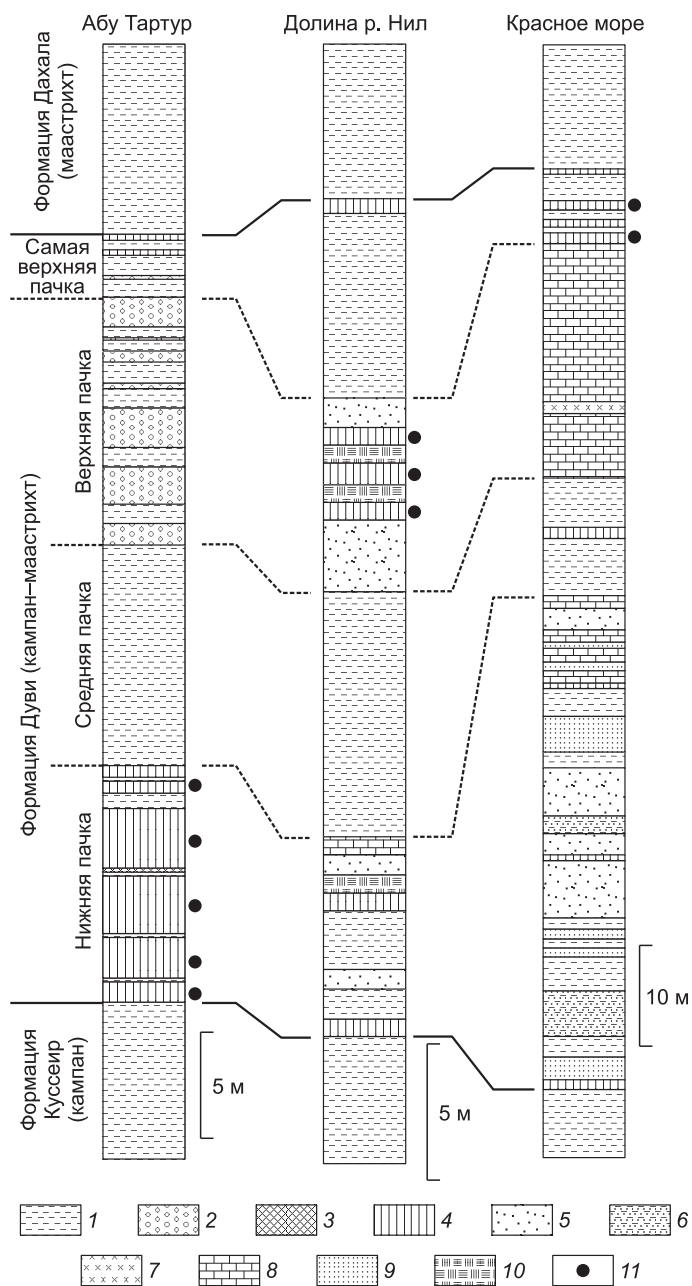
1 — четвертичное песчаное море, 2 — плиоцен-четвертичные песчаники, 3 — олигоценые и миоценовые сланцы, 4 — эоценовые известняки, 5 — маастрихт-палеоценовые сланцы, 6 — кампан-маастрихтские фосфориты, 7 — нижнемеловые сланцы, 8 — юрские угли и песчаники, 9 — каменноугольные кремнисто-обломочные породы, 10 — породы докембрийского фундамента, 11 — Абу Тартур, 12 — долина р. Нил, 13 — Красное море.

**Рис. 2. Корреляция стратиграфических колонок формации Дуви на исследованных площадях, по [Baïoumy, Tada, 2005].**

1 — сланец, 2 — глауконит, 3 — доломитит, 4 — фосфорит, 5 — песчаник, 6 — алевритистый аргиллит, 7 — кремнистый сланец, 8 — известняк, 9 — алеврит, 10 — глинистый известняк, 11 — горизонт опробования.

С.В. Тамбиев [1979] объяснял различающиеся величины отношений  $Sr/P_2O_5$  фосфоритов тихоокеанских подводных гор и аутигенных проб фосфоритов из Перу, Чили и Намибии разными механизмами образования, при этом он отводил существенную роль субаэральным процессам в образовании фосфоритов подводных гор. Другие авторы [Prevot, Lucas, 1980] предположили, что причиной переменных отношений  $Sr/P_2O_5$  фосфоритов Марокко является фосфатизация смеси кальцита с низким содержанием Sr и арагонита с высоким содержанием Sr. Считалось [Gulbrandsen, 1966], что диапазон составов фосфоритов формации Фосфория может отражать некоторые морские обстановки или обстановки раннего диагенеза. Возможно, что химические различия между фосфоритами трех типов в шт. Квинсленд могут быть связаны с процессами выветривания [Cook, 1972]. Причиной вариаций состава марокканских и сенегальских фосфоритов считали метеорное изменение и выветривание [Lucas et al., 1980].

Позднемеловые фосфориты в Египте, составляющие часть Ближневосточной — Северо-Африканской фосфоритоносной провинции с запасами более 3 млн т, широко распространены в Восточной пустыне, долине р. Нил и Западной пустыне [Glenn, Arthur, 1990; Baïoumy, Tada, 2005]. Они добываются для внутреннего использования в качестве удобрений и экспортируются в необработанном виде из трех главных областей: района Красного моря, долины р. Нил и площади Абу Тартур. В данной статье обсуждаются сходные и различающиеся характеристики промышленных фосфоритов из этих трех районов на основе детальных минералогических и геохимических анализов фосфатных и нефосфатных компонентов. Также обсуждаются возможные факторы, контролирующие изменения состава этих фосфоритов.

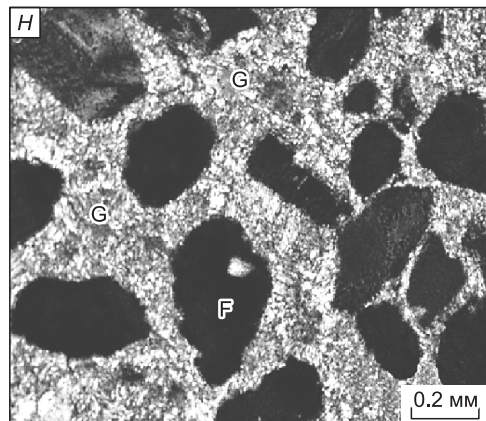
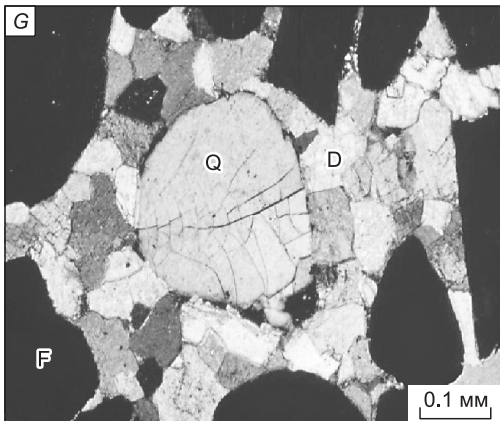
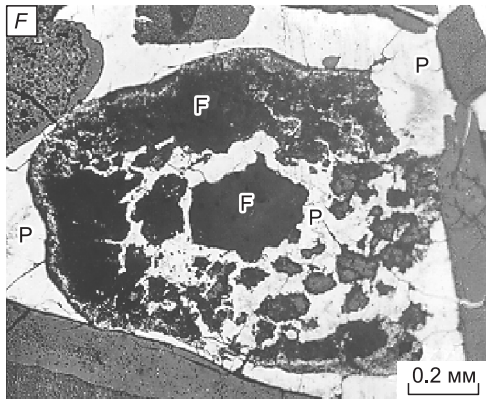
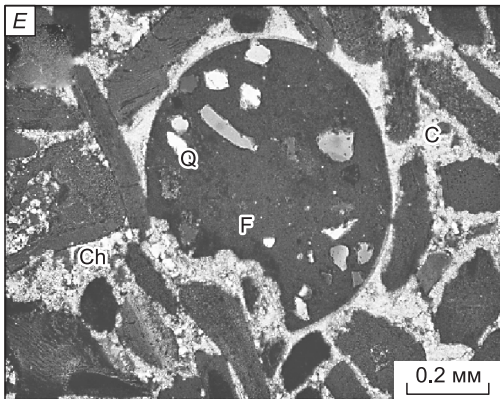
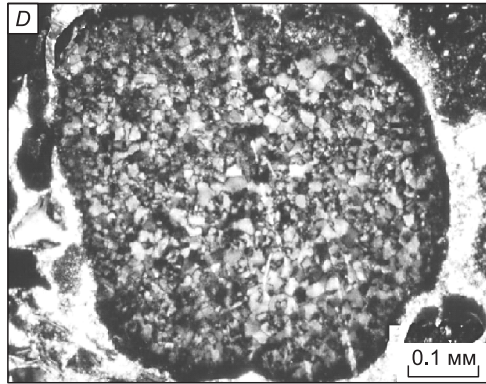
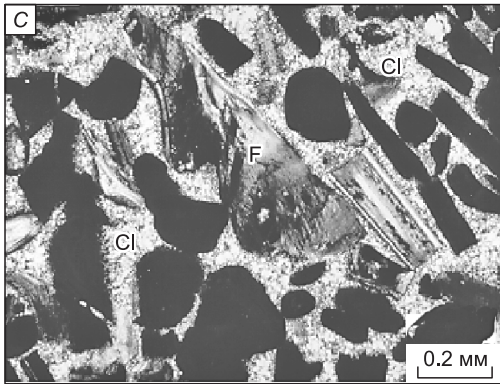
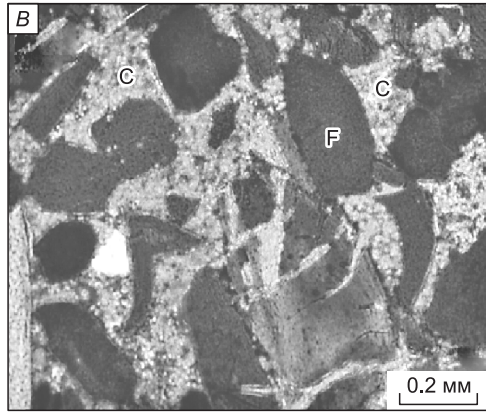
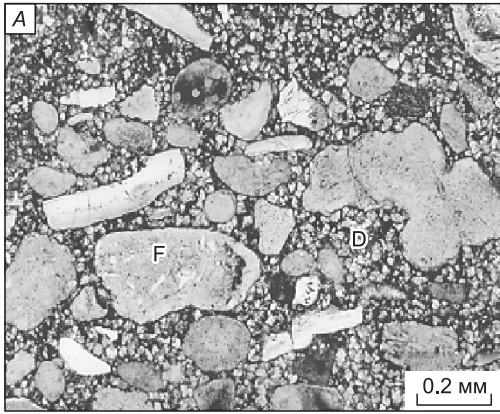


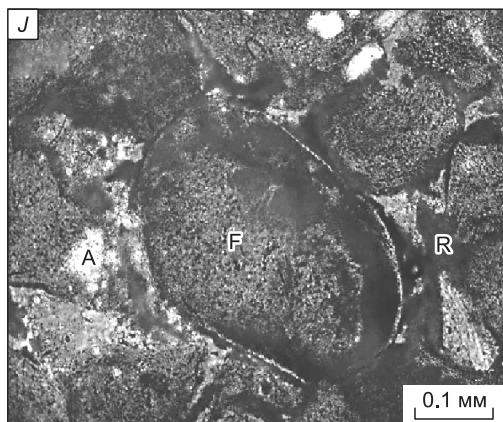
### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Фосфатоносная формация (формация Дуви) перекрывает аллювиальную глинистую толщу формации Куссеир среднекампанского возраста и, в свою очередь, перекрывается глубоководными морскими глинами и глинистыми известняками формации Дахала среднемаастрихтского возраста [Glenn, Arthur, 1990; Baïoumy, Tada, 2005]. Поэтому отложение осадков формации Дуви представляет начальную стадию позднемеловой морской трансгрессии в Египте. Точный возраст формации Дуви недостаточно обоснован; по палеонтологическим данным возраст формации датируется от позднего кампана до раннего маастрихта [Glenn, Arthur, 1990].

Промышленные фосфоритовые месторождения в Египте эксплуатируются в трех основных районах: Красное море, долина р. Нил и Абу Тартур (рис. 1). Согласно данным [Baïoumy, Tada, 2005], формация Дуви в этих районах по литологическим признакам подразделяется на четыре пачки (рис. 2). Ниж-







**Рис. 3. Петрография фосфоритовых месторождений на трех исследованных площадях.**

Зерна фосфата F с участка Красного моря цементированы очень тонкими ромбическими кристаллами анкерита D (фото A), при этом первые цементируются кальцитом C, фото B. На фото C показаны зерна фосфата F с участка долины р. Нил, цементированные халцедоном CI и кальцитом C; полностью халцедоном (фото D) и полностью замещенные халцедоном (фото E). Зерна фосфата F на участке Абу Тартур цементированы и частично замещены пиритом P (фото F) и цементированы анкеритом D (фото G). Выветрелые фосфориты с участка Абу Тартур цементированы гипсом P (фото H), ангидритом и оксидами железа R (фото J).

няя пачка на участке Абу Тартур сложена грубозернистыми фосфатными песчаниками, а на участках долины р. Нил и Красного моря она сложена кварцевыми песчаниками и кремнистыми сланцами. Средняя пачка на трех этих участках сложена мягкими слоистыми, богатыми органикой черными сланцами. Верхняя пачка на участке Абу Тартур сложена грубозернистым глауконитовым песчаником, фосфатноносным песчаником на участке долины р. Нил и фосфатноносным песчаником и калькаренитом с обильными фрагментами моллюсков на участке Красного моря. Самая верхняя пачка на всех трех участках сложена твердыми массивными сланцами от бурого до серого цвета. Мощность отдельных слоев фосфоритов формации Дуви варьирует от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Более мощные слои образовались путем объединения отдельных, более тонких слоев. Наиболее крупные скопления промышленных фосфоритов встречаются в нижней пачке участка Абу Тартур, где слои фосфоритов локально укрупняются с образованием единого пласта со средней мощностью приблизительно 12 м. Одной из общих характеристик почти всех фосфоритов формации Дуви является интенсивно проявленная биотурбация. В результате большинство фосфатных слоев выглядят массивными и не имеющими внутренней структуры.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Из представительных образцов с различных фосфоритовых месторождений были приготовлены шлифы, которые исследовались при помощи оптического микроскопа. Для изучения минерального состава тот же набор образцов был проанализирован методом рентгеновской порошковой дифрактометрии (XRD). Порошковые пробы закреплялись на стеклянной подложке и подвергались рентгеновскому облучению от 2 до 80° 2θ со скоростью 2° 2θ/мин с использованием рентгеновского дифрактометра MAC Science MXP-3, оборудованного CuK<sub>α</sub> трубкой. Анализы выполнялись в Департаменте наук о Земле и планетах Токийского университета. Рабочее напряжение и ток в трубке составляли 40 кВ и 20 мА соот-

**Таблица 1. Средние содержания компонентов (мас. %) фосфатных зерен из трех изученных участков по данным микрозондового анализа (EPMA) (полные данные приведены в работе [Vaioumy et al., 2007])**

Участок	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	F	Cl
Красное море	0.08	0.02	0.01	0.31	0.02	0.14	53.1	0.02	0.45	0.03	0.02	0.01	1.4	34.6	5.4	4.37	0.03
Долина р. Нил	0.06	0.01	0.02	0.39	0.07	0.16	52.4	0.04	0.58	0.04	0.02	0.01	1.6	34.7	5.6	4.22	0.07
Абу Тартур	0.06	0.01	0.40	1.03	0.13	0.22	51.6	0.05	0.94	0.02	0.02	0.02	1.6	34.9	5.2	4.03	0.04

**Таблица 2. Структурные формулы франколита из фосфоритовых месторождений разных площадей**

Участок	Формула
Красное море	(Ca,Na,Mg,Mn) <sub>9,9</sub> (P,C,S,Cr,V) <sub>6,4</sub> O <sub>24</sub> (F,Cl) <sub>2,5</sub>
Долина р. Нил	(Ca,Na,Mg,Mn) <sub>9,9</sub> (P,C,S,Cr,V) <sub>6,4</sub> O <sub>24</sub> (F,Cl) <sub>2,6</sub>
Абу Тартур	(Ca,Na,Mg,Mn) <sub>10,1</sub> (P,C,S,Cr,V) <sub>6,2</sub> O <sub>24</sub> (F,Cl) <sub>2,3</sub>

Таблица 3. Распределение главных оксидов (мас. %) в фосфоритовых месторождениях трех изученных участков по данным рентгенофлуоресцентного анализа

Участок	Образец	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма
Красное море	Ph1	10.6	0.13	2.9	1.5	0.01	0.6	44.4	0.11	0.01	14.5	24.5	99.3
	Ph4	4.6	0.01	0.2	0.9	0.06	6.1	45.2	0.11	0.01	24.2	19.4	100.8
	Ph6	39.7	0.01	0.2	2.8	0.03	0.3	31.2	0.19	0.04	18.3	7.6	100.4
	Ph8	30.9	0.03	0.5	2.1	0.05	0.4	35.6	0.43	0.17	23.3	5.9	99.4
	Ph9	35.4	0.05	0.2	5.1	0.11	0.3	32.1	0.27	0.07	20.9	5.3	99.8
	Ph10	39.1	0.03	0.3	13.1	0.06	0.3	24.8	0.24	0.12	16.1	5.4	99.6
	Ph14	37.3	0.01	0.1	0.4	0.01	0.3	33.4	1.39	0.11	21.7	5.6	100.3
	Ph17	4.8	0.01	0.2	1.1	0.05	5.8	45.4	0.14	0.01	24.2	19.1	100.8
	Ph18	10.7	0.2	1.4	4.7	0.09	12.1	31.2	0.06	0.01	11.5	27.3	99.3
	Ph19	24.2	0.04	0.9	1.1	0.02	1.3	38.9	0.41	0.31	25.1	7.6	99.9
	Ph22	25.1	0.02	0.1	0.4	0.04	2.2	38.9	0.21	0.07	24.9	8.8	100.7
	Ph27	12.3	0.03	0.8	1.1	0.06	0.9	43.9	0.57	0.18	29.9	10.7	100.4
	Ph30	30.3	0.02	0.3	0.1	0.03	0.4	36.7	0.53	0.22	24.8	5.8	99.2
	Ph31	8.9	0.04	0.7	2.2	0.31	8.5	38.4	0.07	0.01	17.4	24.3	100.8
	Ph34	6.4	0.01	0.2	1.3	0.01	2.5	47.1	0.17	0.01	29.7	11.3	98.7
	Ph36	35.4	0.08	0.8	1.3	0.02	0.8	31.1	1.11	0.77	20.7	7.8	99.9
	Среднее	22.2	0.05	0.6	2.5	0.1	2.7	37.4	0.4	0.1	21.7	12.3	100.0
	Долина р. Нил	Ph37	32.6	0.1	1.6	3.1	0.07	0.7	32.1	1.12	0.35	21.5	7.1
Ph38		42.3	0.02	1.3	2.9	0.21	0.6	27.1	0.51	0.16	17.4	6.6	99.1
Ph39		15.1	0.03	0.2	1.7	0.08	0.3	45.1	0.25	0.04	25.2	12.7	100.7
Ph40		12.7	0.07	0.5	3.2	0.13	0.6	44.5	0.45	0.13	30.2	8.2	100.7
Ph42		39.4	0.03	1.1	2.6	0.07	0.6	29.5	0.51	0.32	19.5	6.1	99.7
Ph43		25.8	0.03	0.4	1.9	0.09	0.4	38.7	0.43	0.19	25.8	6.7	100.4
Ph44		15.9	0.02	0.6	1.9	0.11	0.4	43.9	0.31	0.05	23.9	13.5	100.6
Ph47		40.2	0.02	0.3	1.8	0.08	0.3	30.8	0.46	0.06	20.1	5.8	99.9
Ph48		26.2	0.01	1.1	2.7	0.11	0.4	37.6	0.53	0.17	24.3	7.4	100.5
Ph49		42.7	0.01	0.1	1.4	0.04	0.3	30.1	0.32	0.08	19.5	5.4	100.0
Ph50		42.2	0.01	0.1	1.1	0.04	0.3	30.6	0.36	0.11	20.2	4.9	99.9
Ph52		46.8	0.01	0.2	0.8	0.03	0.2	28.2	0.26	0.08	18.2	4.7	99.5
Ph54		34.3	0.02	0.4	1.8	0.07	0.5	33.4	0.47	0.19	21.6	6.7	99.5
Ph59		42.1	0.01	0.1	0.9	0.03	0.3	30.5	0.39	0.13	20.1	5.2	99.8
Ph62		38.3	0.01	0.4	0.2	0.03	0.3	33.2	0.42	0.13	21.3	5.9	100.2
Ph63		41.9	0.1	0.1	1.3	0.05	0.3	30.7	0.32	0.05	19.9	5.1	99.8
Среднее		33.7	0.03	0.5	1.8	0.1	0.4	34.1	0.4	0.1	21.8	7.0	100.0
Абу Таргур		Ph64	19.4	0.06	2.6	5.3	0.05	0.8	37.6	0.57	0.59	21.8	11.8
	Ph68	13.6	0.03	0.9	5.3	0.04	0.5	35.6	0.67	0.76	24.8	16.3	98.5
	Ph69	11.1	0.06	0.5	3.8	0.09	1.1	42.9	0.71	0.17	29.5	10.7	100.6
	Ph70	8.9	0.04	1.4	5.4	0.05	1.4	37.9	0.62	0.22	27.1	15.8	98.8
	Ph73	11.9	0.04	0.7	6.7	0.41	7.3	36.1	0.36	0.07	15.8	20.5	99.9
	Ph76	11.7	0.06	0.7	6.8	0.38	7.5	36.1	0.36	0.07	15.8	20.8	100.3
	Ph79	12.2	0.07	1.1	7.1	0.08	0.5	38.8	0.71	0.16	26.8	10.6	98.1
	Ph81	12.7	0.04	1.3	4.5	0.09	1.1	37.6	0.75	0.36	26.4	14.3	99.1
	Ph84	11.1	0.06	0.8	3.6	0.09	0.5	43.5	0.88	0.11	29.7	8.8	99.1
	Ph88	12.7	0.09	0.9	5.6	0.08	0.5	38.6	0.78	0.19	26.3	12.4	98.1
	Ph90	13.6	0.05	1.8	5.9	0.11	0.6	37.1	0.69	0.21	25.6	12.6	98.3
	Ph96	13.2	0.04	0.8	3.2	0.41	1.1	42.9	0.74	0.17	28.9	9.1	100.6
	Ph98	9.6	0.04	0.6	5.4	0.11	8.4	36.9	0.27	0.06	15.1	23.3	99.8
	Ph100	12.7	0.04	0.6	3.3	0.13	0.4	44.4	0.76	0.17	31.1	6.8	100.4
	Phw1	17.3	0.03	0.9	5.3	0.16	0.6	39.9	0.61	0.19	23.4	11.9	100.3
	Phw2	14.1	0.04	0.6	3.1	0.11	1.2	42.7	0.77	0.12	26.4	10.6	99.7
	Среднее	12.9	0.05	1.0	5.0	0.1	2.1	39.3	0.6	0.2	24.7	13.5	99.5



Таблица 4. Средние содержания главных оксидов (мас. %) в кислото-нерастворимом остатке (КНО) в фосфоритовых месторождениях трех изученных площадей\*

Участок	КНО, %	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма
Красное море	14.0	87.9	0.1	0.7	5.1	0.0	0.2	1.9	0.3	0.1	0.2	3.7	100.2
Долина р. Нил	25.4	88.3	0.1	0.9	4.8	0.01	0.1	0.8	0.2	0.1	0.2	4.7	100.2
Абу Тартур	34.2	65.2	0.5	3.2	9.8	0.0	0.5	1.9	0.1	0.3	0.2	18.0	99.7

\* Полные данные приведены в работе [Baïoumy et al., 2007].

ответственно. На главные оксиды (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) было проанализировано 47 образцов фосфоритов из различных месторождений, а на редкие элементы было проанализировано 28 представительных проб фосфоритов из разных месторождений. Главные и редкие элементы анализировались рентгенофлуоресцентным (РФ) методом с использованием рентгеновского спектрометра Philips, оснащенного Rh трубкой, в Департаменте наук о Земле и планетах Токийского университета. Рабочее напряжение и ток в трубке составляли 40 кВ и 60 мА соответственно.

Для сравнения использовались усредненные данные РФ анализа нерастворимого в кислотах остатка различных фосфоритов из работы [Baïoumy et al., 2007]. Химические формулы франколита из разных месторождений были рассчитаны на основе данных микронзондового анализа (ЕРМА), приведенных в работе [Baïoumy et al., 2007]. Для сравнения также использовались усредненные данные микронзондового анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Общие характеристики.** Исследования под микроскопом показывают, что фосфатные компоненты на всех месторождениях трех исследованных площадей представлены бесструктурными зернами, фрагментами скелетов рыб и зубами акул (рис. 3, А—Л). Минералогический XRD анализ выявил наличие карбоната-фторапатита (франколита), являющегося фосфатсодержащим минералом на всех изученных месторождениях (рис. 4). Данные микронзондового анализа и рассчитанные формулы фосфатных зерен показывают, что геохимические характеристики фосфатных зерен также очень близки на всех изученных месторождениях (табл. 1, 2).

**Переменные характеристики. Литологические вариации.** Главный фосфатный горизонт (продуктивный слой) на участках Красного моря, долины р. Нил и плато Абу Тартур характеризуется значительными литологическими вариациями (см. рис. 2). На площади Красного моря продуктивные слои фосфоритов приурочены к самой верхней пачке и ассоциируют в основном с черными сланцами. На участке долины р. Нил фосфатные и продуктивные фосфоритовые слои приурочены к верхней пачке и ассоциируют в основном с глинистыми известняками и песчаниками. В то же время продуктивные фосфоритовые пласты на плато Абу Тартур располагаются в нижней пачке и ассоциируют в основном с черными сланцами. Эти вариации в литологии отражают различные условия и обстановки осадконакопления на изученных площадях. Распространенность черных сланцев на участках Красного моря и Абу Тартур может отражать относительно более глубинные и более восстановительные условия относительно условий в долине р. Нил, которые могут отражать более мелководные и более окислительные обстановки, на которые указывает ассоциация с кремнисто-обломочными осадками. Формация Дуви также характеризуется отчетливыми литологическими вариациями на изученных участках. На участке Красного моря, где формация Дуви достигает максимальной мощности (типичное местонахождение), осадки формации представлены преимущественно органогенными известняками с остатками раковин моллюсков; на участке долины р. Нил в разрезе формации преобладают сланцы, а на участке Абу Тартур среди осадков формации преобладают глаукониты.

**Минералогические вариации.** Хотя петрографические и минералогические исследования показывают близкий состав фосфатных составляющих на изученных площадях, состав нефосфатных компонентов значительно варьирует. Например, нефосфатные компоненты на участке Красного моря представлены в основном кальцитом, анкеритом и кварцем, встречающихся главным образом в качестве цементирующего материала (см. рис. 3, А, В). На месторождениях долины р. Нил эти компоненты представлены преимущественно кварцем в виде халцедонового цемента (см. рис. 3, С), который во многих случаях замещает частично или полностью фосфатные зерна (см. рис. 3, D). На некоторых горизонтах кальцит также встречается в виде цемента (см. рис. 3, E). С другой стороны, среди нефосфатных компонентов фосфоритов участка Абу Тартур преобладают обломочный кварц (см. рис. 3, F), а также анкеритовый (см. рис. 3, F) и пиритовый (см. рис. 3, G) цемент в неизмененных фосфоритах. Пирит и анкерит во многих случаях замещают частично или полностью фосфатные зерна (см. рис. 3, G). На обнажениях

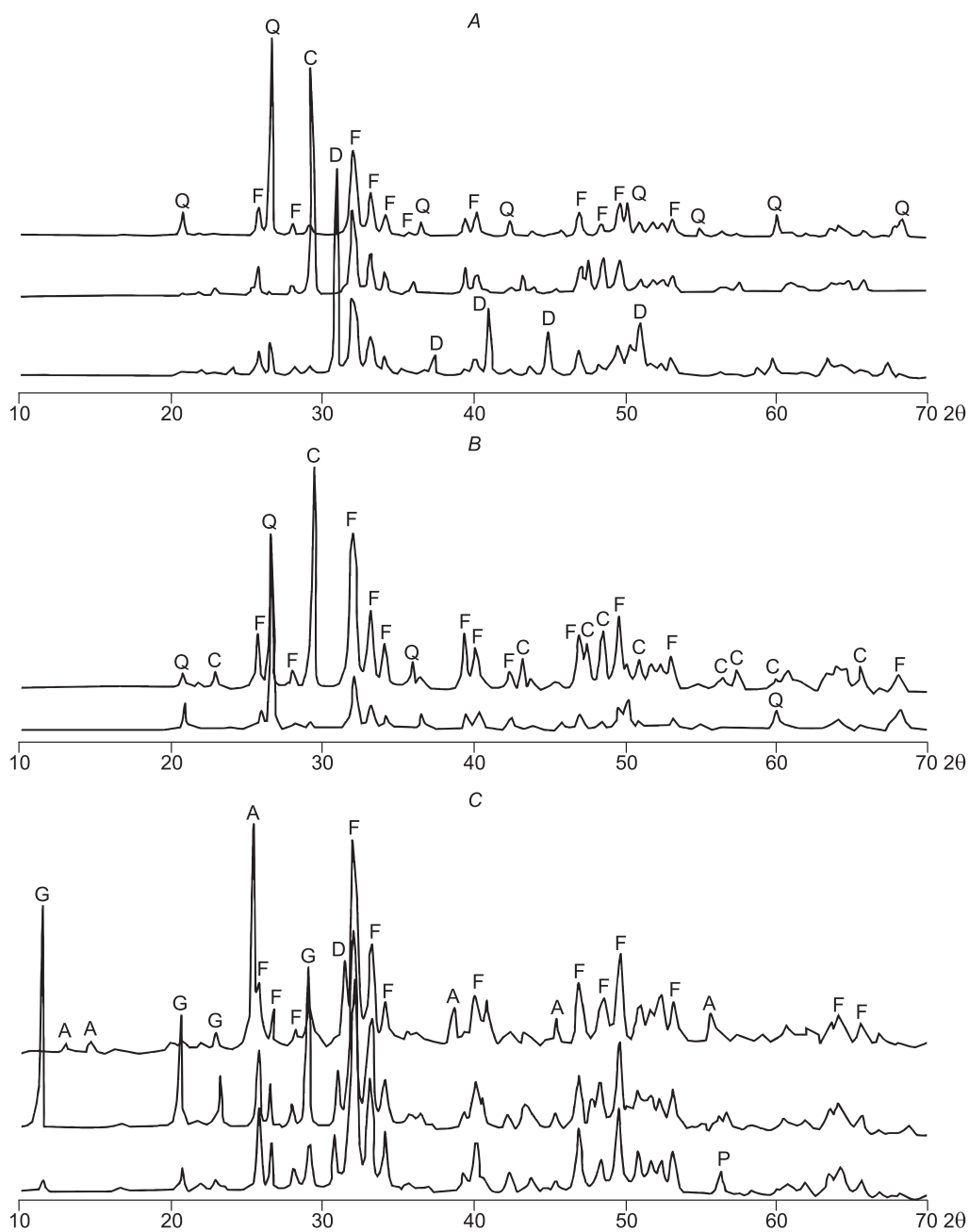
с равной степенью выветрелости цемент представлен в основном гипсом, ангидритом (см. рис. 3, H) и оксидами и гидроксидами железа (см. рис. 3, K).

*Геохимические вариации.* Распределение главных оксидов на фосфоритовых месторождениях трех изученных площадей приведено в табл. 3. Оно показывает отчетливую изменчивость содержаний многих оксидов, отражающую вариации минералогического состава, особенно нефосфатной составляющей, а также отношение фосфатной к нефосфатной составляющей на каждом месторождении. Фосфориты долины р. Нил показывают относительно высокое содержание  $\text{SiO}_2$  (в среднем 33.7 мас. %) по сравнению с участками Красного моря и Абу Тартур (средние содержания 22.2 и 12.9 мас. % соответственно) вследствие распространенности кварца и халцедона на этой площади. Распространенность пирита в фосфоритах Абу Тартур обусловлена более высокими содержаниями  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (в среднем 5 мас. %) по сравнению с участками Красного моря и долины р. Нил (в среднем 2.5 и 1.8 % соответственно). Относительно высокое содержание  $\text{MgO}$  на площадях Красного моря и Абу Тартур (в среднем 2.6 и 2.1 мас. % соответственно) в сравнении с площадью долины р. Нил (среднее 0.4 мас. %) связывается с наличием анкерита в фосфоритах Красного моря и Абу Тартур. Фосфориты Абу Тартур характеризуются максимальными содержаниями  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{CaO}$  на изученных площадях, отражающими относительно повышенные содержания франколита на этих месторождениях. Хотя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  встречается в низких концентрациях (0.5—1 мас. %) на всех месторождениях, фосфориты Абу Тартур имеют относительно повышенные содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в среднем 1 мас. %) по сравнению с месторождениями Красного моря и Абу Тартур (средние содержания 0.6 и 0.5 % соответственно).

Таблица 5. Распределение редких элементов (мас. %) в фосфоритовых месторождениях трех изученных площадей

Участок	Образец	Ba	Co	Cr	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	U	Y	Zr
Красное море	Ph6	93.5	—	140.9	0.2	42.1	3.1	1.7	1046	2.3	—	41.6	7.3
	Ph8	119.8	—	158.8	0.4	42.6	7.2	3.4	1290	0.8	—	81.3	12.7
	Ph9	206.6	—	67.5	0.2	33.1	7.6	2.3	1104	1.9	—	50.1	18.5
	Ph10	204.5	—	66.9	0.1	50.1	7.1	1.9	633	2.8	—	41.3	17.8
	Ph14	41.5	—	104.8	0.3	23.9	13.2	3.1	1128	1.1	—	35.1	3.1
	Ph19	68.9	3.57	186.2	0.4	33.1	8.2	4.8	1386	0.7	28.1	86.3	8.5
	Ph22	89.1	—	393.9	0.1	16.9	4.8	4.1	1363	2.1	—	32.1	6.2
	Ph30	90.8	1.10	97.8	0.1	16.2	1.8	2.1	1383	1.8	47.3	41.5	13.4
	Ph36	48.8	—	116.5	0.6	18.5	1.5	4.9	1108	0.6	—	81.4	15.4
	Среднее	107.1	2.3	148.1	0.2	30.7	6.1	3.1	1160.1	1.6	37.7	54.5	11.4
Долина р. Нил	Ph39	279.9	7.12	82.9	0.1	17.1	3.7	1.4	1695	0.06	32.9	60.1	11.1
	Ph40	500.1	—	98.2	0.3	22.2	5.3	2.4	2004	1.7	—	89.9	18.9
	Ph42	567.1	—	86.7	1.0	24.9	5.1	4.6	1368	2.1	—	76.6	27.8
	Ph43	294.5	—	86.9	0.2	18.3	3.7	1.5	1848	2.4	—	81.1	16.5
	Ph49	209.2	—	80.5	0.2	8.2	1.8	1.2	1126	0.3	—	34.4	7.4
	Ph50	263.3	1.04	87.1	0.2	11.9	1.9	1.6	1381	0.05	47.0	30.1	5.8
	Ph51	259.7	—	101.6	0.2	19.9	2.2	2.2	1735	1.6	—	58.6	10.8
	Ph52	203.2	—	87.6	0.1	13.6	2.2	2.3	1011	0.02	—	43.4	4.9
	Ph53	282.8	—	119.3	0.1	15.5	2.1	2.2	2011	1.7	—	55.4	13.7
	Ph62	160.4	—	66.9	0.2	6.2	3.3	2.2	1290	0.6	—	47.2	6.3
	Среднее	302.0	4.1	89.8	0.2	15.8	3.1	2.2	1546.9	1.1	39.9	57.7	12.3
Абу Тартур	Ph64	24.4	—	30.2	1.9	25.5	19.2	10.6	1551	3.2	—	235.3	26.5
	Ph65	87.3	—	24.9	1.7	20.2	24.2	9.3	900	4.6	—	166.3	96.5
	Ph68	36.8	12.1	26.7	0.7	11.7	11.2	11.1	1741	7.1	19.1	154.6	35.7
	Ph76	27.1	—	32.4	0.3	29.7	18.3	2.3	1186	2.3	—	100.1	16.5
	Ph79	56.1	—	27.2	1.4	44.7	13.2	2.3	1921	5.6	—	190.1	45.4
	Ph81	72.3	10.3	40.6	1.5	30.8	13.3	4.1	2081	6.1	19.0	192.1	41.2
	Ph88	47.8	—	36.9	1.1	40.4	13.9	2.8	1822	5.5	—	176.3	43.8
	Ph90	44.5	—	34.9	1.2	28.2	10.5	3.7	2065	3.1	—	135.3	35.9
	Phw1	84.2	—	34.1	0.5	49.3	11.7	1.8	1889	4.1	—	155.6	26.8
	Phw2	44.2	—	20.6	0.7	53.5	13.8	1.5	2025	6.6	—	119.1	35.2
	Среднее	52.5	11.2	30.9	1.1	33.4	14.9	5.0	1718.1	4.8	19.1	162.5	40.4





**Рис. 4. XRD-дифрактограммы различных фосфоритов изученных участков показывают сходства и различия минерального состава.**

Франколит (F) — единственный фосфатсодержащий минерал на всех изученных месторождениях, при этом минеральный состав нефосфатной составляющей варьирует от месторождения к месторождению. Q — кварц, D — доломит, C — кальцит, G — гипс, A — ангидрит, P — пирит.

Другие элементы (например  $\text{TiO}_2$ , Mn,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ ) встречаются на всех месторождениях в относительно низких концентрациях ( $< 1$  мас. %) и не обнаруживают существенной изменчивости на изученных месторождениях. Средние содержания элементов в кислотно-нерастворимом остатке (КНО) для трех месторождений и их составы показаны в табл. 4. Видно, что фосфориты долины р. Нил и Абу Тартур имеют повышенные содержания КНО (средние 34.2 и 25.4 мас. % соответственно) по сравнению с фосфоритами Красного моря (среднее содержание 14 мас. %). На всех месторождениях в составе КНО преобладает  $\text{SiO}_2$ , при этом его доля в КНО фосфоритов Абу Тартур относительно ниже. Фосфориты площади Абу Тартур характеризуются относительно повышенными содержаниями  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в сравнении с фосфоритами площадей Красного моря и долины р. Нил.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  показывает положи-

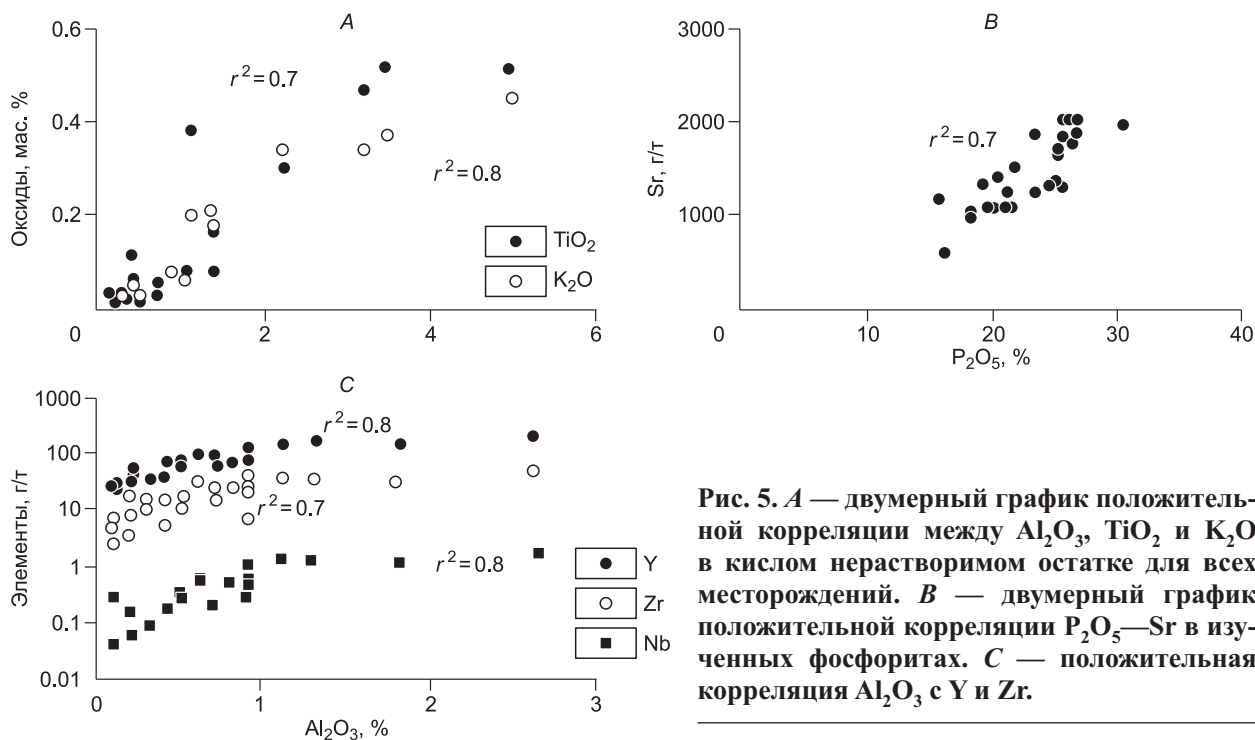


Рис. 5. *A* — двумерный график положительной корреляции между  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в кислом нерастворимом остатке для всех месторождений. *B* — двумерный график положительной корреляции  $\text{P}_2\text{O}_5$ —Sr в изученных фосфоритах. *C* — положительная корреляция  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с Y и Zr.

тельную корреляцию с  $\text{TiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$  (рис. 5, *A*), что позволяет предположить в качестве наиболее вероятного общего источника этих элементов глинистые минералы. Если допустить поступление Al в тонкозернистые осадки исключительно из обломочных алюмосиликатных пород [McLennan, 1980; Murtagh et al., 1992], а также если предположить, что содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  отражают в основном содержания глинистых минералов, положительная корреляция между  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$  указывает на детритовое происхождение  $\text{TiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Относительно высокие содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в фосфоритах Абу Тартур могут свидетельствовать о большей доле поступающего обломочного материала в ходе отложения фосфоритов на площади Абу Тартур по сравнению с площадями Красного моря и долины р. Нил.

Распределение редких элементов на трех месторождениях приведено в табл. 5. Такие элементы, как Ba, Cr, Ni, Sr, Y и Zr, встречаются в относительно высоких концентрациях, тогда как Co, Nb, Pb, Rb, Th и U обнаружены в относительно низких концентрациях на всех месторождениях. Хотя «открытая» решетка карбоната-фторапатита (CFA) благоприятна для ряда замещений ионов редких элементов [Jarvis et al., 1994], только Sr обнаруживает положительную корреляцию с  $\text{P}_2\text{O}_5$  на всех месторождениях (см. рис. 5, *B*), что указывает на присутствие Sr в структуре франколита. Отсутствие положительных корреляций между редкими элементами и главными компонентами (например  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) указывает на нахождение этих элементов в различных фазах. Только Nb, Y и Zr показывают положительную корреляцию с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на всех месторождениях (см. рис. 5, *C*), что позволяет предположить обломочное происхождение этих элементов. Для сравнения, фосфориты долины р. Нил имеют более высокое содержание Ba (среднее содержание 302 г/т) относительно месторождений Красного моря и Абу Тартур (среднее 105 и 52 г/т соответственно), при этом фосфориты Красного моря имеют повышенные содержания Sr (среднее 148 г/т) по сравнению с месторождениями долины Нила и Абу Тартур (средние содержания 90 и 31 г/т соответственно). С другой стороны, фосфориты Абу Тартур показывают отчетливо повышенные концентрации Co (среднее 11 г/т), Nb (среднее 1.1 г/т), Pb (среднее 15 г/т), Sr (среднее 1718 г/т), Th (среднее 5 г/т), Y (среднее 163 г/т) и Zr (среднее 40 г/т) по сравнению с месторождениями Красного моря (средние содержания 2.3, 0.2, 6, 1160, 1.6, 55 и 11 г/т для Co, Nb, Pb, Sr, Th, Y и Zr соответственно) и долины р. Нил (средние содержания 4, 0.2, 3, 1541, 1.1, 58 и 12 г/т для Co, Nb, Pb, Sr, Th, Y и Zr соответственно), при этом фосфориты Абу Тартур характеризуются заметно более низкими концентрациями U (среднее 19 г/т) по сравнению с месторождениями Красного моря и долины р. Нил (средние содержания 38 и 40 г/т соответственно).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Изменчивость состава осадочных фосфоритов активно изучалась многими исследователями и связывалась с несколькими параметрами, например, условиями генезиса, литологией, стратиграфией и географическим происхождением [Gnandi, Tobschall, 1999; Samb, 2002; Sattouf, 2007; Bech et al., 2009].

Поздне меловые фосфориты с участков Красного моря, долины р. Нил и Абу Тартур рассматривались как разновозрастные и образовавшиеся в одинаковых геологических обстановках [Glenn, Arthur, 1990; Baioumy, Tada, 2005] и поэтому должны иметь близкие литологические, минералогические и геохимические характеристики. Данное исследование показывает, что три изученных месторождения имеют близкие минералогические и геохимические характеристики фосфатной составляющей (франколит), что указывает на происхождение этих фосфатных компонентов из одного источника, но в различных соотношениях. Авторы [Baioumy, Tada, 2005] предположили, что зерна фосфатов образовались в обстановке открытого моря (аутигенные фосфориты) в результате апвеллинга, а затем были преобразованы в мелководном(ых) морском(их) бассейне(ах) в период поздне меловой трансгрессии Тетиса. Вместе с тем эти месторождения показывают отчетливые вариации литологического состава ассоциирующих осадков, минералогии и геохимии нефосфатных составляющих. Эти вариации отражают в основном условия осадконакопления нефосфатных компонентов, а не фосфатных, которые привносились извне. Распространенность пирита, анкерита и тонкослоистых черных сланцев на площадях Красного моря и Абу Тартур указывает на восстановительную обстановку осадконакопления, возможно, в пределах ранее существовавшей депрессии на шельфе. Согласно [Bosworth et al., 1999], эта депрессия могла возникнуть в результате изменения движения Северо-Атлантической, Евразийской и Африканской плит в поздне сантонское время, что привело к трансгрессивной инверсии рифтов вдоль Северного Египта и последующего образования складчатости во внутриконтинентальных обстановках.

Повышенные содержания Nb, Y и Zr в фосфоритах Абу Тартур, а также положительная корреляция между этими элементами и  $Al_2O_3$ , являющиеся показателями обломочного привноса, подтверждают вывод о том, что на площадь Абу Тартур могло поступать большее количество обломочного материала во время отложения фосфоритов по сравнению с изученными участками Красного моря и долины р. Нил, по-видимому, вследствие более близкого расположения бассейна Абу Тартур к источнику обломочного материала. Относительно высокие содержания редкоземельных элементов в фосфоритах Абу Тартур для подтверждения вывода о привносе более тонкозернистого обломочного материала на участок Абу Тартур по сравнению с другими участками [Baioumy, 2011].

Продукты диагенеза на изученных месторождениях представлены образованием цементирующего материала фосфоритов в виде анкерита и пирита на участках Красного моря и Абу Тартур, отражающих восстановительные условия, и кальцита, и халцедона на участке долины р. Нил, отражающих окислительные условия. Таким образом, вариации продуктов диагенеза также отражают изменчивость условий осадконакопления на изученных участках. Исключительная связь между пиритовым цементом в образцах неизмененного фосфорита на участке Абу Тартур и наличием гипсового, ангидритового и Fe-оксидного цемента в горизонтах фосфоритов той же степени выветрелости показывает, что последние образовались при окислении пиритового цемента в результате выветривания. Это означает, что продукты процесса выветривания также испытывали воздействие исходных нефосфатных компонентов, которые образовались при соответствующих условиях осадконакопления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленные фосфориты поздне мелового возраста из основных месторождений (участков Красного моря, долины р. Нил и Абу Тартур) показали некоторые общие характеристики, связанные в основном с минералогией и геохимией фосфатной составляющей (франколит). С другой стороны, наблюдаются отчетливые вариации стратиграфического положения продуктивного фосфатного пласта, литологии фосфоритсодержащей формации (формации Дуви), минералогии нефосфатных компонентов и в распределении главных и редких элементов. Вариации состава нефосфатной составляющей фосфоритов, которые встречаются в основном в виде цементирующего материала для фосфатных компонентов и в виде обломочного материала, рассматриваются как основные причины минералогических и геохимических вариаций изученных фосфоритов. Близость состава фосфатных компонентов, привнесенных извне областей отложения, а также вариации литологического состава ассоциирующих осадков и нефосфатных компонентов в пластах фосфоритов, отражающих условия осадконакопления в местах отложения, показывают, что эти вариации отражают изменчивость обстановок осадконакопления изученных месторождений. Представленные в статье данные свидетельствуют о преобладании восстановительных условий в ходе отложения фосфоритов на участках Красного моря и Абу Тартур и более окислительных условий на участке долины р. Нил. Продукты диагенеза и выветривания этих месторождений также отражают вариации условий осадконакопления.

## ЛИТЕРАТУРА

**Baioumy H.** Rare earth elements and sulfur and strontium isotopes of upper Cretaceous phosphorites in Egypt // *Cretac. Res.*, 2011, v. 32, p. 368—377.

- Baioumy H.M., Tada R.** Origin of Upper Cretaceous phosphorites in Egypt // *Cretac. Res.*, 2005, v. 26, p. 261—275.
- Baioumy H.M., Tada R., M. Gharaie H.M.** Geochemistry of Late Cretaceous phosphorites in Egypt: implication for their genesis and diagenesis // *J. African Earth Sci.*, 2007, v. 49, p. 12—28.
- Bech J., Suarez M., Reverter F., Tume P., Sanchez P., Bech J., Lansac A.** Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar-Sechura (Peru) // *J. Geochem. Explor.*, 2009, Special issue. doi:10.1016/j.gexplo.2009.08.004.
- Bliskovski V.Z., Yefimova V.A., Romanova L.V.** The strontium contents of phosphorites // *Geochem. Intern.*, 1967, v. 4, p. 1186—1190.
- Bosworth W., Guiraud R., Kessler II L.G.** Late Cretaceous (ca. 84 Ma) compressive deformation of the stable platform of northeast Africa (Egypt): far-field stress effects of the «Santonian event» and origin of the Syrian Arc deformation belt // *Geol.*, 1999, v. 27, p. 633—636.
- Cook P.J.** Petrology and geochemistry of the phosphate deposits of northwest Queensland, Australia // *Econ. Geol.*, 1972, v. 67, p. 1193—1213.
- Glenn C.R., Arthur M.A.** Anatomy and origin of a Cretaceous phosphorite-greensand giant, Egypt // *Sedimentology*, 1990, v. 37, p. 123—154.
- Gnandi K., Tobschall H.J.** The pollution of marine sediments by trace elements in the coastal region of Togo caused by dumping of cadmium-rich phosphorite tailing into the sea // *Environm. Geol.*, 1999, v. 38 (1), p. 13—24.
- Gulbrandsen R.A.** Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria Formation // *Geochim. Cosmochem. Acta*, 1966, v. 30, p. 769—778. *SEPM Sp. Pub.*, 29, 41-51.
- Jarvis I., Burentt W.C., Nathan Y., Almbaydin S.M.F., Attia A.K.M., Castro L.N., Flicoteaux R., Hilmy M.E., Husain V., Qutawah A.A., Serjani A., Zanin Y.N.** Phosphorite geochemistry: state-of-the-art and environmental concern // *Concepts and controversies in phosphogenesis. Proceeding of the Symposium and Workshop held on 6—10 September, 1993 Switzerland*, 1994, p. 643—700.
- Lehr J.R., McClellan G.H., Smith J.P., Franzier A.W.** Characterization of apatites in commercial phosphate rocks. *Coll. Int. Sur Les phosphates minéraux Solides Toulouse*, 1967, 29 p.
- Lucas J., Flicoteaux R., Nathan Y., Prevot L., Shahar Y.** Different aspects of phosphorite weathering. 1980.
- McArthur J.M.** Systematic variations in the contents of Na, Sr, CO<sub>3</sub>, and SO<sub>4</sub> in marine carbonate-fluorapatite and their relation to weathering // *Chem. Geol.*, 1978, v. 21, p. 89—112.
- Mc Arthur J.M.** Francolite geochemistry — compositional controls during formation, diagenesis, metamorphism and weathering // *Geochim. Cosmochem. Acta*, 1985, v. 49, p. 23—35
- McClellan G.H., Lehr J.R.** Crystal chemical investigation of natural apatite // *Amer. Miner.*, 1969, v. 54, p. 1374—1391.
- McLennan S.M.** Geochemistry of Archean shale from the Pilbara Supergroup, western Australia // *Geochim. Cosmochem. Acta*, 1980, v. 47, p. 1211—1222.
- Murray R.W., Jpnes D.L., Buchholtz T.B.** Diagenetic formation of bedded chert: evidence from chemistry of the chert-shale couplet // *Geol.*, 1992, v. 20, p. 271—274.
- Prevot L., Lucas J.** Behavior of some trace elements in phosphatic sedimentary formation. *SEPM Sp. Pub.*, 1980, v. 29, p. 31—39.
- Samb M.** Evolution géochimique des phosphates sédimentaires du gisement de Tobene (Senegal) implications pour l'exploitation industrielle // *J. Sci.*, 2002, v. 2 (2), p. 68—74.
- Sattouf M.** Identifying the origin of rock phosphates and phosphorous fertilizers using isotope ratio technique and heavy metal patterns. 2007.
- Smith J.P., Lehr J.P.** An X-ray investigation of carbonate apatite // *J. Agricult. Food Chem.*, 1966, v. 14, p. 342—349.
- Spanderashvilli G.I., Mansour M.** The Egyptian phosphorites / Ed. O. Moharram. *Studies on some mineral deposits of Egypt* // *UAR Geol. Surv.*, 1970, p. 89—106.
- Tambiyev S.B.** Strontium and barium in the formation of oceanic phosphorites // *Oceanology*, 1979, v. 19, p. 171—175.
- Whippo R.E., Murrowchick B.L.** The crystal chemistry of some sedimentary apatites // *Trans. Soc. Miner. Eng.*, 1967, v. 238, p. 257—263.