

Хоботова Э.Б., докт. хим. наук, проф.,
Игнатенко М.И., канд. техн. наук, **Баумер В.Н.**, канд. хим. наук
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
ул. Петровского, 25, 61002 Харьков, Украина, e-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua

Исследование радиоактивности щебней гранитных карьеров Украины, используемых для изготовления многокомпонентных бетонов

Гамма-спектрометрическим методом определена активность радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в гранитных щебнях карьеров Украины. Значения активности изменяются в интервалах, Бк/кг: ^{226}Ra – 6,35–104; ^{232}Th – 12,3–160 и ^{40}K – 370–1290. Содержание ^{226}Ra и ^{40}K ниже, чем в изверженных породах. Варьирование эффективной удельной активности образцов от 62,7 до 365 Бк/кг определяет I класс радиационной опасности гранитных щебней как строительных материалов. Расчетные величины эквивалентной активности радия, индекса внешней опасности, гамма-индекса и альфа-индекса соответствуют средним значениям рекомендуемых интервалов для обеспечения радиационной безопасности. Гамма-излучение щебня Янцевского карьера превышает рекомендуемые пределы. Выявлена корреляция между эффективной удельной активностью гранитных щебней и общим содержанием минералов альбита и микроклина. *Библ. 17, табл. 2.*

Ключевые слова: радиоактивность, горные породы, гранитные щебни, минералы.

В процессы хозяйственной деятельности человечества вовлечены огромные объемы минерального сырья, радиоактивность которого оказывает отрицательное влияние на окружающую среду, на здоровье населения и производственного персонала. Естественные радионуклиды (ЕРН), содержащиеся в строительных материалах, создают поле γ -излучения в помещении. Эффективная удельная активность ($C_{\text{эфф}}$) бетонов и величина годовой эффективной эквивалентной дозы γ -облучения людей в бетонных помещениях ($D_{\text{пом}}$) обусловлены прежде всего удельной активностью заполнителей. В качестве заполнителей бетонов чаще всего используются фракции гранитных щебней. Радиационный фон гранита и любого другого натурального камня начинают контролировать на стадии добычи при утверждении запасов месторождения.

Изучению радиоактивности строительных горных пород Украины посвящено ограниченное количество исследований [1–3]. В монографии [1] суммированы данные по радиоактивности многочисленных составляющих биосферы, в том числе техногенно измененного радиационного фона: строительных материалов, отходов, минеральных удобрений. В работе [2] изучены радиационные характеристики горных пород специализированных карьеров по добыче блоч-

ного сырья. В работе [3] приведены данные по радиоактивности строительного сырья железорудных месторождений Криворожского бассейна. Остаются открытыми вопросы варьирования радиационных характеристик нерудного сырья по гранулометрическим фракциям, корреляции радиоактивных свойств с его минералогическим составом.

Цель работы – исследование радиоактивности образцов щебней гранитных карьеров Украины, используемых при изготовлении многокомпонентных бетонов.

Экспериментальные методы исследования

Измерения активности ЕРН образцов щебней выполнены с помощью гамма-спектрометрического анализа, проведенного на сцинтилляционном гамма-спектрометре СЕГ-001 «АКП-С». Определены удельные активности естественных радионуклидов (C_i) и $C_{\text{эфф}}$ гранулометрических фракций гранитных щебней. $C_{\text{эфф}}$ рассчитывались по уравнению [4], Бк/кг:

$$C_{\text{эфф}} = C_{\text{Ra}} + 1,31 C_{\text{Th}} + 0,085 C_{\text{K}}$$

Рентгенофазовый анализ [5] четырех выбранных образцов щебня выполнен на порошковом дифрактометре Siemens D500 в медном излучении с графитовым монохроматором. Пер-

Таблица 1. Результаты гамма-спектрометрического анализа и показатели радиационной опасности

Номер образца	Место отбора образцов	Фракция щебня, мм	$C_{эфф}$, Бк/кг	C_i , Бк/кг (вклад, %)			Ra_{eq} , Бк/кг	I_{ex}	I_{γ}	I_{α}
				^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra				
1	ООО «Нерудстройматериалы», Полтавская обл.	20–40	70,4	424 (93,8)	20,0 (4,4)	8,16 (1,8)	–	–	–	–
2	ЗАО «Горняк», Полтавская обл.	20–40	89,2	435 (90,9)	28,3 (5,9)	15,2 (3,2)	–	–	–	–
3	Янцевский карьер, Запорожская обл.	20–40	365	1120 (83,6)	160 (11,9)	59,9 (4,5)	374,9	1,01	1,37	0,3
4	Карьер «Технобуд», Житомирская обл.	20–40	178	934 (91,6)	40,6 (4,0)	45,2 (4,4)	175,2	0,47	0,67	0,23
5	Тельмановский карьер, Донецкая обл.	10–20	134	1160 (97,6)	19,8 (1,7)	9,32 (0,8)	127	0,34	0,52	0,05
6	Коломоевский карьер, Днепропетровская обл.	5–20	62,7	370 (93,6)	19,0 (4,8)	6,35 (1,6)	62	0,17	0,24	0,03
7	Днепропетровский карьер, Днепропетровская обл.	5–20	286	1240 (89,4)	113 (8,2)	33,1 (2,4)	290,2	0,78	1,09	0,17
8	Орликовский карьер, Днепропетровская обл.	5–10	293	1290 (89,8)	121 (8,5)	25,0 (1,7)	297,4	0,80	1,12	0,13
9	Мокрянский карьер-3, Запорожская обл.	5–10	343	1150 (84,4)	108 (7,9)	104 (7,6)	347	0,94	1,27	0,52
10	Новополтавский карьер, Запорожская обл.	5–10	149	1060 (95,6)	33,6 (3,0)	15,4 (1,4)	145,1	0,39	0,57	0,08
11	Хлыстуновский карьер, Черкасская обл.	10–15	187	1110 (93,3)	41,1 (3,5)	39,0 (3,3)	183,2	0,49	0,71	0,2
12	Карьер «Будмайстер», Днепропетровская обл.	0,8–3,0	144	903 (94,2)	36,8 (3,8)	19,3 (2,0)	141,5	0,38	0,55	0,1
13	Карьер «Будмайстер», Днепропетровская обл.	0,65–2,5	129	932 (95,8)	26,9 (2,8)	14,2 (1,5)	124,4	0,34	0,49	0,07
14	Карьер «Карань», Луганская обл.	10–20	109	773 (95,6)	24,0 (3,0)	11,6 (1,4)	105,4	0,28	0,42	0,06
15	Карьер «Карань», Луганская обл.	5–20	83,8	539 (94,5)	22,0 (3,9)	9,2 (1,6)	82,2	0,22	0,32	0,05
16	Карьер «Карань», Луганская обл.	3–10	182	702 (87,4)	70,6 (10,9)	30,3 (3,8)	185,3	0,50	0,69	0,15
17	Спецкарьер «Гайворонский», Кировоградская обл.	11–16	63,8	376 (93,4)	17,7 (4,4)	8,64 (2,1)	62,9	0,17	0,24	0,04
18	Спецкарьер «Гайворонский», Кировоградская обл.	8–11	107	555 (91,9)	34,9 (5,8)	14,2 (2,4)	106,8	0,29	0,41	0,07
19	Спецкарьер «Гайворонский», Кировоградская обл.	5–8	109	579 (92,3)	35,0 (5,6)	13,5 (2,1)	108,1	0,29	0,41	0,07
20	ККУ «Кварц», Полтавская обл.	20–40	70,3	377 (92,2)	20,6 (5,0)	11,3 (2,8)	69,8	0,19	0,27	0,06
21	ККУ «Кварц», Полтавская обл.	5–10	90,2	741 (96,9)	12,3 (1,6)	11,1 (1,5)	85,7	0,23	0,35	0,06

вичный поиск фаз был выполнен по картотеке PDF-1 [6], после чего выполнен расчет рентгенограмм по методу Ритвельда с использованием программы FullProf [7].

Активности радионуклидов

Исследован 21 образец фракций щебней из 15 карьеров 8 областей Украины. Экспериментальные данные по удельным активностям ЕРН щебней и величине $C_{эфф}$ представлены в табл.1.

Гамма-спектрометрическим методом в составе гранитных щебней были обнаружены ЕРН ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Основной вклад в суммарную активность щебней (более 83 %) вносит изотоп ^{40}K . Особо высокой радиоактивностью обладают граниты, содержащие, Бк/кг: ^{40}K — 1070–1110; ^{226}Ra — 95–115; ^{232}Th — 85–480; ^{238}U — 50–110 [8]. Для исследованных гранитов активность ^{40}K образца 11 соответствует указанному интервалу; для образцов 3, 5, 7–9 — превышает максимальное значение; для остальных щебней — ниже минимальной грани-

цы. Активность ^{226}Ra для всех образцов, за исключением образца 9, ниже 95 Бк/кг. Аналогичная ситуация для ^{232}Th : большинство щебней характеризуется активностью по данному радионуклиду меньше 85 Бк/кг, за исключением образцов 3, 7–9.

Оценка радиационной опасности

Согласно величине $C_{\text{эфф}}$, все исследованные образцы щебней относятся к I классу радиационной опасности строительных материалов, используемых в строительстве без ограничения ($C_{\text{эфф}} \leq 370$ Бк/кг). Для всех образцов гранитного щебня, кроме образцов 1, 2, 6, 15, 17, 20, 21, установлено превышение среднего значения $C_{\text{эфф}}$ для строительных материалов по СНГ (93 Бк/кг) и по Украине (106 Бк/кг).

Щебни имеют различные радиоактивные характеристики в зависимости от места их получения. По литературным данным [1], радиоактивность гранитных щебней Украины колеблется в пределах 223–322 Бк/кг. Данному диапазону соответствует $C_{\text{эфф}}$ образцов 7 и 8. Остальные образцы щебней характеризуются либо более низкими значениями $C_{\text{эфф}}$, либо более высокими. Наименьшие величины $C_{\text{эфф}}$ имеют фракции 5–10 мм Коломоевского карьера Днепропетровской обл. (образец 6) и фракции 11–16 мм спецкарьера «Гайворонский» Кировоградской обл. (образец 17). Невысокие значения $C_{\text{эфф}}$ характерны для четырех исследованных щебней Полтавской обл. (< 100 Бк/кг). Наибольшие величины $C_{\text{эфф}}$ зарегистрированы для щебней Запорожской обл.: фракция 20–40 мм Янцевского карьера (образец 3) и фракция 5–10 мм Мокрянского карьера-3 (образец 9), затем для щебней Днепропетровской обл. (образцы 7 и 8).

В целом полученные результаты согласуются с географическим положением областей на определенных тектонических структурах. Запорожская, Днепропетровская, Житомирская, Черкасская и Кировоградская области расположены на Украинском щите, представляющем специализированную радиогеохимическую провинцию. Щебни данных областей имеют повышенный уровень радиоактивности, исключение составляют фракции щебня спецкарьера «Гайворонский» Кировоградской обл. (образцы 17–19). Щебни Донецкой и Луганской областей получены из гранитов Донецко-Днепровской впадины; они имеют меньший уровень радиоактивности. Полтавская обл. расположена на Воронежском кристаллическом массиве. Щебни трех карьеров Полтавской обл. наиболее радиационно-чистые при $C_{\text{эфф}} < 100$ Бк/кг.

Прослеживается некоторое увеличение $C_{\text{эфф}}$ для мелких фракций щебней одного и того же карьера (сравните образцы 14 и 16; 17–19; 20, 21).

По международным нормам, оценка радиационной опасности строительных материалов проводится согласно таким критериям [9–12]: эквивалентная активность радия (индекс радиационной опасности) Ra_{eq} (Бк/кг); индекс внешней опасности I_{ex} ; гамма-индекс I_{γ} ; альфа-индекс I_{α} . Расчетные величины данных индексов для исследованных образцов щебней приведены в табл.2.

Индекс радиационной опасности используется для сравнения эффективных активностей строительных материалов, содержащих разное количество радия, тория и калия. Ra_{eq} рассчитывается по уравнению [9]:

$$Ra_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1,43 C_{\text{Th}} + 0,077 C_{\text{K}}.$$

Величина индекса Ra_{eq} не должна превышать 370 Бк/кг, что соответствует величине дозы внешнего облучения 1,5 мЗв/год [10]. Наибольшее значение Ra_{eq} определено для образца 3 (374,9 Бк/кг), превышающее норматив (см. табл.1).

Индекс внешней опасности I_{ex} рассчитывается по уравнению [9]:

$$I_{\text{ex}} = C_{\text{Ra}}/370 + C_{\text{Th}}/259 + C_{\text{K}}/4810.$$

Этот критерий учитывает только внешнее облучение за счет γ -лучей и соответствует максимальной эквивалентной активности радия в строительных материалах 370 Бк/кг. Индекс I_{ex} используется для оценки уровня γ -радиационной опасности, связанной с присутствием естественных радионуклидов в строительных материалах. Величина I_{ex} должна быть не более единицы [9]. Расчетные значения I_{ex} для большинства исследованных образцов находятся в диапазоне 0,17–0,94, за исключением образца 3, для которого величина I_{ex} превышает 1 (см. табл.1). При величине $I_{\text{ex}} \leq 1$ образцы щебней являются радиационно-безопасными и не представляют радиологической угрозы населению.

Еще одним критерием, характеризующим γ -излучение строительных материалов, является гамма-индекс I_{γ} , рассчитываемый по уравнению [11, 12]:

$$I_{\gamma} = C_{\text{Ra}}/300 + C_{\text{Th}}/200 + C_{\text{K}}/3000.$$

Гамма-индекс используют при скрининге для идентификации материалов, которые могли бы представлять интерес в строительстве. Значения гамма-индекса исследованных щебней ле-

жат в интервале 0,24–1,37 (см. табл.1). Для материалов, используемых в больших объемах, например, для бетона, $I_\gamma \leq 1$ соответствует годовой эффективной дозе меньшей или равной 1 мЗв. $I_\gamma \leq 0,5$ соответствует годовой эффективной дозе меньшей или равной 0,3 мЗв [11]. В первую категорию попадают образцы 4, 5, 10–12, 16; во вторую – образцы 1, 2, 6, 13–15, 17–21. Исключение из данных категорий представляют образцы 3 ($I_\gamma = 1,37$), 7 (1,09), 8 (1,12), 9 (1,27). При их использовании в больших количествах в тяжелых бетонах возможно превышение годовой эффективной дозы более 1 мЗв.

Количественная оценка эксгаляции изотопов радона из строительных материалов может проводиться с помощью альфа-индекса I_α , рассчитываемого по уравнению [11, 12]:

$$I_\alpha = C_{Ra} / 200.$$

Данное соотношение выведено, исходя из того, что при активности ^{226}Ra в строительном материале выше 200 Бк/кг концентрация радона, поступающего в воздух помещения, может быть равной 200 Бк/м³. Индекс $I_\alpha \leq 1$ соответствует активности ^{226}Ra , не более 200 Бк/кг. Разброс значений I_α для исследованных щебней от 0,03 до 0,52 (см. табл.1) свидетельствует об отсутствии опасности ингаляционного поступления радона из щебней внутрь помещения.

Таким образом, согласно величине $S_{\text{эфф}}$, рекомендуемой НРБ Украины в качестве главного критерия радиационной опасности строительных материалов, исследованные щебни могут использоваться в строительстве без ограничений. Имеется некоторая настороженность по поводу использования щебня фракции 20–40 мм Янцевского карьера Запорожской обл. (образец 3). Данный образец имеет завышенные индексы радиационной, внешней опасности

и гамма-индекс, то есть характеризуется повышенным гамма-излучением. Использование данной фракции щебня в качестве заполнителя может привести к возрастанию средней $S_{\text{эфф}}$ готового многокомпонентного бетона, к увеличению $D_{\text{пом}}$ и дозы, получаемой за счет γ -излучения ЕРН строительных материалов ($\Delta D_{\text{ЕРН}}$). Средние величины для стран СНГ $D_{\text{пом}} = 350\text{--}411$ мкЗв/год и $\Delta D_{\text{ЕРН}} = 100$ мкЗв/год [13]. Вредные воздействия природных ионизирующих излучений представляют наибольшую опасность, так как с течением времени могут создать суммарную дозу облучения для человека более значительную, чем от искусственных радионуклидов [14].

Минеральная природа щебней

Результаты рентгенофазового анализа четырех выборочных образцов щебней приведены в табл.2. Найдено несколько фаз, наличие которых нуждалось в подтверждении расчетами по методу Ритвельда ввиду неудовлетворительного соответствия наблюдаемым на дифрактограммах пикам. Расчет по методу Ритвельда проводился с уточнением параметров решетки и параметров, описывающих профиль рентгеновских линий. Для учета инструментальной функции профиля использована рентгенограмма гексаборида лантана, однако дисперсность кристаллитов рассчитать не удалось ввиду множества фаз в образцах.

Основными минералами, входящими в состав всех образцов, являются кварц и полевые шпаты, к которым относятся альбит, микроклин, анортит и другие алюмосиликаты, часто имеющие сходные структуры и являющиеся, как правило, твердыми растворами, которые трудно поддаются рентгенофазовому анализу. Так, например, альбит и микроклин в чистом виде различаются только входящими в них ще-

Таблица 2. Результаты фазового анализа образцов щебней

Фаза	Образец щебня*, карьер			
	№ 3, Янцевский	№ 6, Коломоевский	№ 7, Днепроропетровский	№ 11, Хлыстуновский
Кварц SiO ₂	34,0	37,7	42,2	27,3
Микроклин KAlSi ₃ O ₈	29,7	–	23,0	26,5
Альбит NaAlSi ₃ O ₈	21,4	17,3	17,1	8,0
Анортит CaAl ₂ Si ₂ O ₈	8,3	38,3	11,3	20,3
Мусковит K _{0,94} Na _{0,06} Al _{1,83} Fe _{0,17} Mg _{0,03} (Al _{0,91} Si _{3,09} O ₁₀)(OH) _{1,65} O _{0,12} F _{0,23}	6,0	6,5	6,4	3,3
Псевдо-эвкрипитит LiAlSiO ₄	0,57	0,32	–	–
Мерлиноит Na _{0,68} K _{4,48} Ca _{2,24} (Al _{9,28} Si _{22,72} O ₆₄)(H ₂ O) _{19,44}	–	–	–	14,6
Общее содержание SiO ₂ по всем фазам	70,18	65,18	73,03	63,44
Суммарное содержание полевошпатовых минералов: альбита и микроклина	51,1	17,3	40,1	34,5

*Номера образцов соответствуют табл.1

лочными металлами. Данные изоструктурные минералы могут давать ряд твердых растворов друг с другом и при замещении ионов в катионной подрешетке или в алюминиевых и силикатных тетраэдрах, вследствие чего симметрия решетки может быть и моноклинной, и триклинной с двумя углами, близкими к прямым. При этом каркасом структуры всегда является трехмерная сетка из алюминиевых и силикатных (или алюмосиликатных) тетраэдров, в пустотах которой расположены щелочные или замещающие их катионы. Поэтому наличие подобных твердых растворов в исследованных образцах щербней исключить нельзя, но учесть его при расчетах по методу Ритвельда трудно ввиду ограничения по числу уточняемых фаз, которое не должно превышать восьми. В проведенных расчетах использованы структурные данные для тех составов, которые приведены в табл.2. Полученные результаты полностью согласуются с представлениями о породообразующих минералах магматических горных пород, на долю которых приходится около 99 % их общего состава: кварц, калиевые полевые шпаты, плагиоклазы, слюды.

Щебни разных карьеров имеют свои минералогические особенности. В составе щебня Коломоевского карьера отсутствует микроклин, в щебне Хлыстуновского карьера невелико содержание альбита, а в щебне Янцевского карьера мало анортита. Наибольшее содержание кварца в образцах щебней 3 и 7, в образце 6 содержится почти одинаковое количество кварца и анортита.

Минорные фазы в исследуемых щебнях представлены тремя нижними строками табл.2. Содержание мусковита при расчетах по методу Ритвельда для всех образцов щебней определено с низкой достоверностью. Это может свидетельствовать о заметном отличии состава этой фазы во всех случаях от заданного в структурной модели. Возможно варьирование катионного состава, замещение гидроксильных групп фтором и пр. Не представляется возможным уточнение этих факторов по Ритвельду в многофазной системе, однако следует отметить, что из силикатных фаз только мусковит дает подходящее расположение линий под малыми углами.

Псевдоэвкрипит задавался для расчета по соответствию малоугловых линий на рентгенограммах образцов 3 и 6; его содержание низкое. Можно предположить, что ошибки в определении содержания шпатовых фаз в полученных результатах могут быть около 1–3 % ввиду несоответствия составов, заданных в структурных моделях, что выше содержания псевдоэвкрип-

тита, который на рентгенограммах подходит только по положению малоугловых линий.

Мерлиноит обнаружен в образце 11. Для этой фазы, в отличие от остальных, при уточнении получены заметно отличающиеся значения параметров решетки ($a = 14,275$, $b = 14,356$, $c = 9,923$) от заданных в исходной модели структуры (14,116; 14,229 и 9,946 соответственно). Если мерлиноит идентифицирован правильно, то подобные различия могут свидетельствовать о существенном отличии катионного состава фазы от заданного. При этом только для этой фазы наблюдается заметное уширение линий, свидетельствующее о значительных микронапряжениях или наличии нанокристаллической структуры. Поскольку в гранитах могут встречаться аморфные глинозем и кремнезем, можно предположить, что присутствие мерлиноита связано с этими аморфными компонентами. Мерлиноит, минерал цеолитного типа, является вторичным минералом магматических пород, который мог образоваться в результате преобразования первичных пород за счет процессов вторичного минералообразования.

Кислотность гранитных щербней

В основу классификаций магматических горных пород положен их химический состав. За основу большинства классификаций принято содержание оксида кремния, которое и служит критерием для подразделения горных пород на группы [15]: кислые содержат 64–78 % SiO_2 , средние — 53–64 %. Граниты могут относиться к кислым, иногда к средним по составу породам. Согласно рассчитанному по минеральному составу общему содержанию SiO_2 (см. табл.2), три образца гранитных щербней относятся к кислым породам. Щебень Хлыстуновского карьера (образец 11) занимает пограничное положение между кислыми и средними породами; в данном образце повышено содержание анортита $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

Кварц является типичным минералом кислых пород, хотя он может присутствовать и в средних, и в основных породах. Он образуется, когда содержание SiO_2 в магне превышает то, которое должно вступить в соединение с металлами для образования силикатов. Кислые горные породы пересыщены этим оксидом, что видно из присутствия свободного кварца. Альбит, обнаруженный в составе исследованных гранитов, может образовываться в случае насыщенности магмы кремнеземом. Псевдоэвкрипит LiAlSiO_4 — ненасыщенный SiO_2 минерал, содержится в гранитах в очень малом количестве (см. табл.2).

Связь радиоактивности щебней с минеральным составом

Радиоактивность горных пород определяется их составом, условиями залегания, фаціальными особенностями, генезисом и другими факторами. Наибольшей радиоактивностью обладают магматические породы кислого и щелочного состава (гранит, кварцевый диорит и др.), наименьшей — основные и ультраосновные породы [14]. Минералы, в которых радионуклиды составляют не основной компонент, могут содержать естественные радионуклиды в виде изоморфной примеси, механической примеси (минеральные смеси) или в сорбированном состоянии. Сорбционная способность минералов по отношению к радионуклидам в первую очередь определяется наличием их слоистой или каркасной структуры. Слюды, цеолиты могут проявлять сорбционную активность по отношению к радионуклидам. В составе исследуемых гранитных щебней обнаружены подобные минералы (см. табл.2): слюда — мусковит; минерал цеолитного типа — мерлиноит (образец 11).

Прослеживается четкая корреляция между $C_{эфф}$ щебней и суммарным содержанием полевошпатных минералов: альбита и микроклина (см. табл.2). В работе [16] показано, что иногда повышенной радиоактивностью обладают неактивные по своей природе минералы, кристаллы и агрегаты которых содержат включения радиоактивных минералов: альбит, эгирин, биотит, микроклин, тетраферрибиотит и некоторые другие. Структура альбита предрасполагает к повышенной сорбции им радионуклидов. Альбит представляет собой пластинчато-чешуйчатые, часто скрученные розетки или зернистые, сплошные сахаровидные агрегаты, либо скопления зерен неправильной формы.

Содержание отдельных радионуклидов в горных породах разного минерального состава варьирует в зависимости от различных факторов. Разбросу активностей ^{226}Ra 6,35–104 Бк/кг (см. табл.1) отвечает содержание ^{226}Ra (0,176–2,88)·10⁻⁹ г/кг, или 1,76·10⁻¹¹–2,88·10⁻¹⁰ %. В исследованных гранитах содержится ^{232}Th от 3,03·10⁻⁴ до 3,94·10⁻³ %, а ^{40}K от 1,47·10⁻⁴ до 5,11·10⁻⁴ %. Согласно [17], содержание основных радионуклидов в кислых изверженных породах, %: Ra — 1,4·10⁻⁹; Th — 1,3·10⁻³; K — 2,6·10⁻¹. Для исследованных гранитов содержание ^{226}Ra и ^{40}K занижено, а ^{232}Th одного порядка с содержанием в изверженных породах. Активность ^{40}K варьирует с содержанием калийных минералов (микроклина и мусковита). Так, образец гранитного щебня Коломоевского

карьера, в котором отсутствует микроклин, имеет наименьшую активность ^{40}K (см. табл.2).

Выводы

На основании величины эффективной удельной активности исследованные щебни относятся к I классу радиационной опасности и могут использоваться в строительстве без ограничений. Проведена корреляция величины $C_{эфф}$ с географическим положением карьера и его принадлежностью к определенной тектонической структуре.

Уточнение особенностей гамма-излучения образцов щебней при расчете индексов радиационной, внешней опасности и гамма-индекса показало, что гамма-излучение образца щебня Янцевского карьера Запорожской обл. (фракция 20–40 мм) превышает рекомендуемые пределы и может привести к облучению эффективной дозой больше 1000 мкЗв/год.

Согласно величине удельной активности ^{226}Ra и альфа-индекса, исследованные щебни не представляют опасности повышенной эманации радона и дочерних продуктов его распада в воздух помещения.

Содержание ^{226}Ra и ^{40}K занижено, а ^{232}Th одного порядка в сравнении с изверженными породами.

Выявлена корреляция между $C_{эфф}$ щебней и суммарным содержанием полевошпатных минералов: альбита и микроклина.

Список литературы

1. Коваленко Г.Д., Рудя К.Г. Радиоэкология Украины. — Киев, 2001. — 242 с.
2. Бакка Н.Т., Ильченко И.В. Облицовочный камень. — М.: Недра, 1992. — 303 с.
3. Жуков С.А., Завсегдашний В.А., Перегудов В.В. Минеральная природа радиоактивности строительного сырья железорудных месторождений Криворожского бассейна // Геолого-минералогічний вісник. — 2002. — № 2. — С. 71–73.
4. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. — К., 1998. — 159 с.
5. Бокій Г.Б., Порай-Кошиц М.А. Рентгеноструктурный анализ. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. — Т. 1. — 620 с.
6. JCPDS PDF-1 File [Electronic resource] // ICDD: The International Centre for Diffraction Data, release 1994. PA, USA. — Acces mode: <http://www.icdd.com/>
7. Rodriguez-Carvajal J., Roisnel T. FullProf.98 and WinPLOTR: New Windows 95/NT Applications for Diffraction. Commission for Powder Diffraction, International Union of Crystallography, Newsletter No.20 (May-August) Summer 1998.

8. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов : Учеб. пособие. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. — 300 с.
9. Beretka J., Mathew P. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wasters and by-product // Health. Phys. — 1985. — Vol. 48. — P. 87–95.
10. NEA-OECD 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials Report by Group of Experts of the OECD (Paris: Nuclear Energy Agency (NEA)).
11. Righi S., Bruzzi L. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings // J. Environ. Radioact. — 2006. — Vol. 88. — P. 158–170.
12. EC 1999. Office European Commission Report on Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials Radiation Protection 112, Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg.
13. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 120 с.
14. Тугаринов А.И. Общая геохимия. — М. : Атомиздат, 1973. — 288 с.
15. Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. — М. : Изд. АН СССР, 1955. — 479 с.
16. Лазаренко Е.К., Гершойг Ю.Г., Бучинская Н.И. Минералогия Криворожского бассейна. — Киев : Наукова думка, 1977. — 544 с.
17. Ибрагимов Ш.З. Ядерная геофизика: Пособие для самостоятельного изучения лекционного курса слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». — Казань : Казан. гос. ун-т, 2008. — 90 с.

Поступила в редакцию 13.05.14

Хоботова Е.Б., докт. хім. наук, проф.,
Ігнатенко М.І., канд. техн. наук, **Баумер В.М.,** канд. хім. наук
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет
 вул. Петровського, 25, 61002 Харків, Україна, e-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua

Дослідження радіоактивності щебенів гранітних кар'єрів України, що використовуються для виготовлення багатокомпонентних бетонів

Гамма-спектрометричним методом визначено активність радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th та ^{40}K у гранітних щебенях кар'єрів України. Значення активності змінюються в інтервалах, Бк/кг: ^{226}Ra — 6,35–104; ^{232}Th — 12,3–160; ^{40}K — 370–1290. Вміст ^{226}Ra та ^{40}K нижчий, ніж у вивержених породах. Варіювання ефективної питомої активності зразків від 62,7 до 365 Бк/кг визначає I клас радіаційної небезпеки гранітних щебенів як будівельних матеріалів. Розрахункові величини еквівалентної активності радію, індексу зовнішньої небезпеки, гамма-індексу та альфа-індексу відповідають середнім значенням рекомендованих інтервалів для забезпечення радіаційної безпеки. Гамма-випромінювання щебеню Янцівського кар'єра перевищує рекомендовані межі. Виявлено кореляцію між ефективною питомою активністю гранітних щебенів та загальним вмістом мінералів альбіта та мікрокліна. *Бібл. 17, табл. 2.*

Ключові слова: радіоактивність, гірські породи, гранітні щебені, мінерали.

Hobotova E.B., Doctor of Chemical Science, Professor,
Ignatenko M.I., Candidate of Technical Science,
Baumer V.M., Candidate of Chemical Science

Kharkov National Automobile and Highway University

25, Petrovskogo Str., 61002 Kharkov, Ukraine, e-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua

The Study of Radioactivity Granitic Quarries of Ukraine, Used for the Manufacture of Multi-Component Concrete

The activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in 21 samples of crushed granite of Ukrainian careers were determined using a gamma-ray spectrometer. The mean activity concentrations varied between, Bq/kg: ^{226}Ra – 6,35–104; ^{232}Th – 12,3–160 and ^{40}K – 370–1290. ^{226}Ra and ^{40}K content are lower than in igneous rocks. The samples effective specific radioactivity variation 62,7–365 Bq/kg defines I class of radiation hazard of crushed granites as building materials. The results of the radium equivalent activity, external hazard index, gamma activity index and alpha index calculated were all within the recommended limits for radiation safety. The gamma radiation of Yantsevsky career breakstone exceeds recommended limits. The correlation between C_{ef} of crushed granites and total content of albite and microcline minerals was identified. *Bibl. 17, Table 2.*

Key words: radioactivity, rocks, crushed granites, minerals.

References

1. Kovalenko G.D., Rudja K.G. Radioecology of Ukraine. Kiev, 2001, 242 p. (Rus.)
2. Bakka N.T., Il'chenko I.V. Facing stone. Moscow : Nedra, 1992, 303 p. (Rus.)
3. Zhukov S.A., Zavsegdashnij V.A., Peregudov V.V. Mineral nature of radioactivity of building materials of iron ore deposits of Krivoy Rog basin. *Geologo-mineralogichnij visnik*, 2002, (2), pp. 71–73. (Rus.)
4. Radiation Safety of Ukraine (RSU-97) and basic sanitary rules for dealing with radioactive substances and other sources of ionizing radiation. Kiev, 1998, 159 p. (Rus.)
5. Bokij G.B., Poraj-Koshic M.A. X-ray diffraction analysis. Moscow : Izdatelstvo Moscovckogo unuversiteta, 1964, 1, 620 p. (Rus.)
6. JCPDS PDF-1 File [Electronic resource] // ICDD: The International Centre for Diffraction Data, release 1994. PA, USA. – Acces mode: <http://www.icdd.com/>
7. Rodriguez-Carvajal J., Roisnel T. FullProf.98 and WinPLOTR: New Windows 95/NT Applications for Diffraction. Commission for Powder Diffraction, International Union of Crystallography, Newsletter No.20 (May-August) Summer 1998.
8. Arbuzov S. I. Geochemistry of radioactive elements. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010, 300 p. (Rus.)
9. Beretka J., Mathew P. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wasters and by-product. *Health. Phys.*, 1985, 48, pp. 87–95.
10. NEA-OECD 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials Report by Group of Experts of the OECD (Paris : Nuclear Energy Agency (NEA)).
11. Righi S., Bruzzi L. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings, *J. Environ. Radioact.*, 2006, 88, pp. 158–170.
12. EC 1999. Office European Commission Report on Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials Radiation Protection 112, Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Luxembourg.
13. Krisjuk Ye. M. Background radiation facilities. Moscow : Jenergoatomizdat, 1989, 120 p. (Rus.)
14. Tugarinov A.I. General geochemistry. Moscow : Atomizdat, 1973, 288 p. (Rus.)
15. Zavarickij A.N. Igneous rocks. Moscow : Izdatelstvo AN SSSR, 1955, 479 p. (Rus.)
16. Lazarenko E.K., Gershojg Yu.G., Buchinskaja N.I. Mineralogy of the Krivoy Rog Basin. Kiev : Naukova dumka, 1977, 544 p. (Rus.)
17. Ibragimov Sh.Z. Nuclear Geophysics: A guide for self-study lecture course students refresher courses specialty «Geophysics». Kazan' : Kazanskij gosudarstvennyj universitet, 2008, 90 p. (Rus.)

Received May 13, 2014