

4. Литвинцев, Э.Г. Люминесцентная сепарация неметаллического сырья / Э.Г. Литвинцев, Б.С. Горобец, А.А. Рогожин // Горный журнал. — 1998. — № 3. — С. 50–54.
5. Мальгин, О.И. Разработка технологии крупнопорционной сортировки руд месторождения Мурунтау / О.И. Мальгин, В.Е. Латышев, В.З. Петриенко и др. // Цветные металлы. — 1999. — № 7. — С. 32–34.
6. Мокроусов, В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд / В.А. Мокроусов, В.А. Лилеев. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
7. Освоение и совершенствование обогащения руд в тяжелых суспензиях / Ю.С. Бадеев, Г.И. Иванов, А.В. Богданович и др. // ЦНИИЦветмет экономики и информации; серия: Обогащение руд цветных металлов. — М., 1980. — Вып. 4. — 45 с.
8. Ревнивцев, В.И. Рентгенрадиометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов / В.И. Ревнивцев, Т.Г. Рыбакова, Е.П. Леман. — М.: Недра, 1990. — 220 с.
9. Федоров, Ю.О. Предварительная концентрация при обогащении бедных и забалансовых руд / Ю.О. Федоров, В.П. Цой, О.В. Корень и др. // Горный журнал. — 1998. — № 1. — С. 26–29.
10. Ballantyne, G.R. Early rejection of gangue — How much energy will it cost to save energy? / G.R. Ballantyne, M. Hilden, M.S. Powell // In Comminution '12, ed. Wills, B. Mineral Engineering, Capetown, South Africa. 2012. 12p. (Ресурсы Интернет, [http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2013/02/Com-2012\\_BallantyneHildenPowell.pdf](http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2013/02/Com-2012_BallantyneHildenPowell.pdf), дата обращения 28.11.2020).
11. Bartram, K. Upgrading of low grade silver-lead-zinc ore stockpiles at Volcan Compañía Minera SAA's base metals operations in Peru, using sensor-based ore sorting / K. Bartram, T. Parry, L.-L. Ampuero // Physical Separation 2017 in Cornwall, UK., 13 p.
12. Von Ketelholdt, L. 2017. Ore sorting of low grade gold sulphide deposits, in Proceedings of World Gold 2017 / von Ketelholdt L, Kotelo, L, and Schmalbein, N, (The Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum), Vancouver, 27–30 August 2017, 21p. (Ресурсы Интернет, <https://static1.squarespace.com/static/5abf03562971143214b948e0/t/5b23668f758d463f77f3b948/1529046681634/OreSort-Solutions-Paper-Tony-Parry-ALTA-2018.pdf>, дата обращения 28.11.2020).
13. Kleine, C. XRT sorting of Massive Quartz Sulphide Type Gold Ore / C. Kleine, F. Riedel, Von Ketelholdt L., R. Murray // Sensorgestützte Sortierung 2010: gemeinsame Tagung des Instituts für Aufbereitung der RWTH Aachen und der GDMB, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik e.V. am 9–11. März 2010 in Aachen; Clausthal-Zellerfeld: GDMB, Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik 122, (2010). — 17 p.
14. Klifman, E.H.A. DE-XRT method to separate platinum ore Section for Resource Engineering Department of Geoscience & Engineering Delft University of Technology; / E.H.A. Klifman. The Netherlands, 2013. (Ресурсы Интернет, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uid:8bbf0acf-a992-4835-b2d3-f7fe373c1634/datastream/OBJ/download>, дата обращения 28.11.2020).
15. Kolacz, J. New high definition X-ray sorting system based on X-MINE detection technology / J. Kolacz. To cite this article: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nov. 2019. — Vol. 641. Issue 1. — 24 p.
16. Lessard, J. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics / J. Lessard, de Bakker, J and L. McHugh // Min. Eng., 2014. 65. — P. 88–97.
17. Lessard, J. Bridging the gap — understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit / J. Lessard, W. Sweetser, K. Bartram, J. Figueroa and L. McHugh // Min. Eng., 2015. 91. — P. 92–99.
18. Manouchehri, H.R. Sorting: possibilities, limitations and future In: Konferens i mineralteknik / H.R. Manouchehri // Swedish Mineral Processing Research Association, 2003.
19. Manouchehri, H.R. Techno-economic aspect of ore sorting — is sorting a massing part in mining industry? A case study at Sandvik's Mittersill tungsten mine / H.R. Manouchehri, A. Mosser and F. Gaul // IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings. — 11 p.
20. Murphy, B. 2012. Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation / Murphy, B, van Zyl, J and Domingo, G, / The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, in Proceedings Narrow Vein Mining 2012. — P. 237–244.
21. Neilsen, B. 2017. Sensor-based ore sorting to maximize profit in a gold operation, in Metplant 2017 / D. Neilsen, J. Rohleder, H. Lehto and C. Robben (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), Perth, WA, 11 — 12 September, 2017. — P. 131–146.
22. Parry, A. The upgrading of low-grade nickel ore stockpiles at Western Areas Ltd Forrestania operations, using a mobile ore sorting plant / A. Parry and C. Fitzmaurice // 14th AusIMM Mill Operators' Conference 2018 / Brisbane, Qld, 29–31 August 2018.
23. Parry, A.N., 2016. Upgrading Low-grade Gold Ore Stockpiles by Preconcentration Using Ore Sorting — an Assessment of the Economic Impact and Viability, in Proceedings of the 13th AusIMM Mill Operators' Conference / Parry, A.N., and van Wyk, G, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), Perth, WA, 10–12 October, 2016. — P. 179–189.
24. Robben, M.R. X-ray transmission sorting of tungsten ore / Robben M. R., Knapp H., Dehler M., Wotruba H. (<https://d-nb.info/1172229716/34>).
25. Robben, C. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine In Minerals Engineering / C. Robben, P. Condori, A. Pinto, R. Machaca, A. Takala January 2020 145.
26. Veras, M.M. Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements / M.M. Veras, A.S. Young, C.R. Born, A. Szewczuk, A.C.B. Neto, C.O. Carlos Otávio Petter, C.H. Sampaio Minerals Engineering, 2020. — Volume 147, 1.

© Коллектив авторов, 2021

Сергей Викторович Петров // petrov64@gmail.com  
Алексей Павлович Бороздин // borozdin@lims-lab.com  
Тамара Александровна Головина // t.a.golovina@gmail.com  
Юлия Сергеевна Шелухина // shelukhina@lims-lab.com

УДК 553.982.2

**Бугриева Е.П., Казанцев В.В., Величкина Н.С.  
(АО «ВНИИХТ»), Стародубов А.В., Гулынин А.В.,  
Петрин А.В. (ФГБУ «ВИМС»)**

## О ТЕХНОГЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В БУРОВЫХ ШЛАМАХ

*Рассмотрены проблемы, связанные с повышенным содержанием естественных радионуклидов в шламонакопителях нефтедобывающего предприятия. Определены формы нахождения и концентрации радионуклидов, влияющие на технологию дезактивации и утилизации нефтезагрязненных грунтов. Основным радионуклидом, создающим повышенное  $\gamma$ -излучение, является Ra-226 и его дочерние продукты распада, изоморфно входящие в кристаллическую решетку новообразованного радиобарита. Для решения вопросов утилизации нефтешламов необходимо решение проблемы их радиоактивной безопасности. **Ключевые слова:** нефтешламы, радионуклиды, активность, радий, барит, изотоп, дезактивация, утилизация.*

Bugrieva E.P., Kazancev V.V., Velitchkina N.S. (VNIИХТ), Starodubov A.V., Gulynin A.V., Petrin A.V. (VIMS)

## ON TECHNOGENIC CONCENTRATION OF NATURAL RADIONUCLIDES IN DRILL SLUDGE

*The problems associated with the increased content of natural radionuclides in the sludge accumulators of the oil-producing enterprise are considered. The forms of finding and concentration of radionuclides affecting the technology of decontamination and utilization of oil-contaminated soils are determined. The main radionuclide, that generates increased  $\gamma$ -radiation,*

is Ra-226 and its daughter decay products, is isomorphically included in the crystal lattice of the newly formed radiolarite. To solve the issues of oil sludge disposal it is necessary to solve the problem of their radioactive safety. **Keywords:** oil sludge, radionuclides, activity, radium, barite, isotope, decontamination, utilization.

### Введение

Предприятия нефтедобычи и переработки являются потенциальными токсичными объектами окружающей среды. В полной мере таковыми являются и буровые шламы, миллионы тонн которых образуются при бурении и эксплуатации нефтяных скважин. Шламы, являющиеся техногенными отходами, состоят из нефтепродуктов, твердых механических породных примесей и воды. Как правило, они складываются в открытых промышленных отстойниках, шламохранилищах, которые занимают значительные территории. Это наносит огромный вред природе, так как оказывает негативное воздействие на водные ресурсы, разрушает почву, растительность, загрязняет воздушный бассейн и требует непроизводительных затрат на их хранение. Буровые шламы, кроме того что включают в свой состав вредные, ядовитые вещества буровых растворов и остатки нефтепродуктов, содержат еще и повышенные концентрации естественных радионуклидов, что делает их радиационноопасными техногенными отходами. В связи с чем в отношении них должны быть приняты меры, обеспечивающие экологическую безопасность [6].

Наличие повышенных концентраций радионуклидов в нефтешламах может быть обусловлено как присутствием их непосредственно в нефти, так и в водах, с ней связанных [7]. Несмотря на то что типичные содержания радионуклидов в нефти по литературным данным невелики: U от  $10^{-8}$  до  $10^{-4}$  %, Th от  $10^{-8}$  до  $10^{-7}$  %, Ra от  $10^{-13}$  до  $10^{-12}$  %, повышенные концентрации радионуклидов отмечаются в разновидностях нефти высокой плотности и связаны со смолисто-асфальтовыми компонентами и производными азота [2, 13].

**Таблица 1**  
Содержание естественных радионуклидов в объектах нефтедобычи [5]

Обследованные объекты	Удельная активность пробы, Бк/кг		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Нефть	420	340	4200
Пластовая вода	380	400	2100
Отложения с труб	115000	81500	—
Грунт с поля фильтрации	600	214	555
Грунт в местах пролива нефти и пластовых вод	1040	658	296
Осадок со дна поля фильтрации	83870	52219	—
Фоновые значения	39,2	33,3	659

Наиболее значимым источником радиоактивного загрязнения окружающей среды при добыче нефти являются отложения содержащихся в ней природных радионуклидов на внутренних поверхностях насосно-компрессорных труб, резервуаров и другого оборудования, а также утечки и вынужденные сбросы нефти и пластовых вод на поверхность земли.

В табл. 1 представлены данные по содержанию радионуклидов в пробах с различных объектов нефтепромыслов с неблагоприятной радиационной обстановкой [9].

Приведенные данные указывают на весьма вероятную возможность техногенного накопления радионуклидов в технологическом оборудовании и, собственно, в отложениях нефтешламов. В зависимости от способа образования нефтяные шламы подразделяются на несколько видов [4]:

- 1) образующиеся непосредственно в процессе нефтедобычи и последующего ее очищения;
- 2) грунтовые, появляющиеся при проливах нефти на землю при технологических неполадках и авариях;
- 3) придонные, образующиеся на дне различных водоемов и емкостей после произошедшего разлива нефти;
- 4) резервуарные отходы, которые формируются при хранении и транспортировке нефти в разнообразных резервуарах.

Наиболее объемные и долгоживущие нефтешламы образуются в процессе предварительной промысловой переработки нефти и очистки сточных вод различных технологических участков от нефтепродуктов (1 вид). Нефтешламы получают из механических примесей с нефтью, которые отделяются от базового сырья. В их составе: вода — 30–85 %, нефтепродукты — 10–55 %, твердые примеси — 1–45 %. Объемы отходов нефтешламов и нефтезагрязнений, скопившихся на объектах нефтедобычи и переработки, составляют десятки тысяч кубометров [5].

Для решения вопросов полноценного захоронения, уничтожения, утилизации нефтешламов необходимо решение проблемы их радиоактивной безопасности. Последнее в первую очередь требует выяснения источников, уровня концентрации и определения форм нахождения природных радионуклидов в конкретных регионах нефтедобычи.

### Методика исследований, материалы и методы анализа

Нами были подвергнуты детальному исследованию пробы буровых отходов, отобранные с четырех нефтешламовых накопителей: НШ-1, НШ-2, НШ-3 и НШ-4 на территории деятельности одного из действующих нефтедобывающих предприятий.

В процессе исследований был проведен гранулометрический анализ материала, определены химический и минеральный составы, выполнены инфракрасная спектроскопия (ИКС), термический, рентгенофазовый, гамма-спектрометрический анализы, а также оптико- и электронномикроскопическое изучение проб шламового материала.

**Таблица 2**  
**Результаты химического анализа проб (метод анализа АЭС ИСП), весовые %**

Компонент	Номера проб			
	НШ-1	НШ-2	НШ-3	НШ-4
SiO <sub>2</sub>	47,21	35,81	43,55	69,65
TiO <sub>2</sub>	0,35	0,32	0,50	0,32
ZrO <sub>2</sub>	0,03	0,02	0,03	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,76	5,06	7,56	6,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,44	5,24	3,36	2,00
FeO*	2,75	1,68	2,03	0,68
MnO	0,06	0,06	0,09	0,03
MgO	0,88	1,13	1,44	0,70
CaO	6,95	6,38	12,51	2,92
SrO	1,22	1,48	0,18	0,43
ZnO	0,04	0,26	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	1,11	0,99	1,43	1,39
Na <sub>2</sub> O	1,27	1,09	2,45	5,06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,12	0,11	0,05
Собщ.*	2,44	4,60	0,63	0,79
Сульфат.*	0,35	3,84	0,62	0,79
BaO	0,41	0,16	0,46	0,19
Нераствори- мый остаток	11,69	23,96	—	—
ппп*	16,19	14,25	23,55	9,79
U	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Th	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Сумма компонентов	95,15	92,71	97,86	99,35
H <sub>2</sub> O*	0,32	1,16	0,69	0,99
C*	9,00	6,91	9,56	0,76
CaCO <sub>3</sub> *	11,24	10,76	22,93	4,35

\* — по отдельным методикам

Провести дисперсный анализ исходных проб не удалось из-за наличия в них органической составляющей. В связи с этим пробы предварительно обжигали 2 часа при температуре 700 °С с целью удаления органической фазы, после чего определяли дисперсный состав. Во всех исследуемых образцах медианный диаметр частиц колебался в пределах от 24 до 45 мкм. Самый большой размер частиц был в пробе НШ-2, которая была отобрана непосредственно

возле устья трубопровода, выпускающего сжиженный шлам.

Все изучаемые образцы состояли из органической и минеральной частей. ИК спектроскопией с помощью фурье-спектрометра Prestige-21 было установлено, что органическую часть составляют длинноцепочечные углеводороды парафинового ряда. Основными минералами зернистой части шламов по данным рентгенофазового анализа (РФА), ИКС и химического анализа являются кварц (30–60 %) и кальцит (4,4–23 %); барит (16,8–24 %) и гипс-дигидрат (2,5–3,0 %) присутствуют не во всех пробах; слюды (мусковит), глинистые минералы (каолинит, галлуазит), минералы железа (гетит) и пироксены отмечаются в незначительном количестве. Причем, наибольшая экспозиционная мощность  $\gamma$ -излучения (16,28 мкЗв/ч), измеренная дозиметром «Эксперт» непосредственно на местности по периферии шламохранилища, соответствовала пробе с наибольшим содержанием барита.

Химический состав проб определяли в Центре коллективного пользования ИАЦ АО «ВНИИХТ» методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП) на приборе «Vista-Pro» фирмы «Varian» (табл. 2).

Для выявления изотопного состава и количественного определения природных радионуклидов, содержащихся в шламе, был проведен гамма-спектрометрический анализ. Анализы выполнены в двух независимых лабораториях: на спектрометре ГАММА-1П в лаборатории ВНИИХТ (свидетельство № 95/02 действительно до 16.03.2020, аналитик Прокопчик В.И.) (табл. 3) и на полупроводниковом гамма-спектрометре Ortec-65195 P/D (свидетельство № 21553-01, действительно до 19.01.2019, аналитики Гулынин А.В., Стародубов А.В.) лаборатории ВИМС (табл. 4). Данные измерений показали, что в пробах шламов присутствуют радионуклиды уранового, ториевого ряда и калий.

Как видно из табл. 4 величины активности <sup>224</sup>Ra и <sup>228</sup>Ra имеют близкие значения активностей, следовательно, имеет место небольшое смещение радиоак-

**Таблица 3**  
**Результаты измерений природных радионуклидов проб нефтешламов (АО «ВНИИХТ»)**

Номера проб	Удельная активность, Бк/кг							
	<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>40</sup> K	A <sub>эфф.</sub>
НШ-1	210	160	200	10	12000	2600	700	12279
НШ-2	16000	14000	21000	10	3700	1700	1700	24653
НШ-3	210	230	280	20	270	650	500	588
НШ-4	60	65	60	10	140	60	400	254

**Таблица 4**  
**Результаты измерений природных радионуклидов зернистой составляющей пробы НШ-2 (ФГБУ «ВИМС»)**

Номер пробы	Удельная активность, Бк/г					
	<sup>228</sup> Ra	<sup>224</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra дпр.	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>237</sup> Cs
НШ-2/1	(39±5)·10 <sup>3</sup>	(48±6)·10 <sup>3</sup>	(103±12)·10 <sup>3</sup>	(102±14)·10 <sup>3</sup>	≤0,05	≤0,01

тивного равновесия радионуклидов ториевого ряда. В количественном отношении преобладает изотоп уранового ряда  $^{226}\text{Ra}$  и его дочерние продукты распада. Изотопы  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Th}$  из семейства  $^{232}\text{Th}$  присутствуют в меньшем количестве. Таким образом, при отсутствии урана в составе природных радионуклидов, основная роль в формировании мощности дозы  $\gamma$ -излучения нефтезагрязненных грунтов принадлежит  $^{226}\text{Ra}$ .

В соответствии с принятым в 2010 г. СанПиН 2.6.1.2800-10 в зависимости от эффективной удельной активности природных радионуклидов ( $A_{\text{эфф}}$ ), содержащие природные радионуклиды производственные отходы разделяются на три категории:

I категория — отходы с  $A_{\text{эфф}}$  до 1500 Бк/кг, которые могут направляться для захоронения в места захоронения промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору;

II категория — отходы с  $A_{\text{эфф}}$  от 1500 до 10000 Бк/кг, направляются для захоронения на специально выделенные участки в места захоронения промышленных отходов. Вводится ограничение дозовой нагрузки облучения критической группы населения за счет захоронения таких отходов, которая не должна превышать 0,1 мкЗв/год;

III категория — отходы с  $A_{\text{эфф}}$  более 10000 Бк/кг, обращение с которыми производится в соответствии с требованиями по обращению с низкоактивными радиоактивными отходами.

В более свежих национальных нормативных документах классификация радиоактивных отходов приводится в соответствии с международными стандартами, где помимо активности при классификации учитывается радионуклидный состав и агрегатное состояние отходов. Согласно ОСПОРБ-99/2010 ред. от 16.09.2013 твердые радиоактивные отходы, содержащие только природные радионуклиды, относятся к классу очень низкоактивных радиоактивных отходов (ОНРАО), а жидкие радиоактивные отходы, содержащие природные радионуклиды, относятся к низкоактивным радиоактивным отходам.

Руководство по безопасности МАГАТЭ № GSG-1 определяет ОНРАО как отходы, которые не обязательно соответствуют критериям освобожденных от контроля, но которые в то же время не требуют высокого уровня локализации и изоляции и подходят для

захоронения на установках приповерхностного захоронения (траншеи с земляной засыпкой) с ограниченным регулирующим контролем.

В соответствии с международной практикой национальные регулирующие документы позволяют захоронение ОНРАО в пунктах приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, в том числе и в тех, которые размещены на земельных участках, используемых генерирующими ОНРАО организациями [8, 12].

Для отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов в Федеральном классификаторе отходов (ФККО) [11] введена отдельная группа кодов «7661000000». В эту группу входят:

с кодом 76612131394 — отходы зачистки нефте-, газопромышленного оборудования, содержащие нефтепродукты менее 15 %, дезактивированные с повышенным содержанием природных радионуклидов (эффективная удельная активность природных радионуклидов 1501–10000 Бк/кг), и код 76612132394 (эффективная удельная активность природных радионуклидов не более 1500 Бк/кг);

с кодом 76614611204 — лом и отходы черных металлов, дезактивированные с повышенным содержанием природных радионуклидов (эффективная удельная активность природных радионуклидов 1501–10000 Бк/кг), и 76614612204 (эффективная удельная активность природных радионуклидов не более 1500 Бк/кг).

Вышеперечисленные группы отходов относятся к IV классу опасности — малоопасным отходам.

Таким образом, в соответствии с актуальными на момент написания статьи нормативными документами, пробы нефтешламов НШ-1 и НШ-2 в зависимости от их агрегатного состояния можно отнести к очень низкоактивным радиоактивным отходам или низкоактивным радиоактивным отходам.

Для изучения распределения радионуклидов по различным фракциям была выбрана проба НШ-1, так как в ней самое высокое содержание органики и по содержанию радионуклидов она относится к низкоактивным радиоактивным отходам.

Исходная проба была разделена на минеральную и органическую составляющие для определения в них радионуклидов. Для отделения органической фазы исходную пробу нефтешлама обрабатывали керосином, после чего фильтровали, осадок сушили. Далее

**Таблица 5**

**Результаты гамма-спектрометрического анализа продуктов разделения пробы НШ-1**

Продукт	Удельная активность, Бк/кг							
	$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$A_{\text{эфф}}$
Исходная проба	210	160	200	12000	2600	700	20	12279
Крупная фракция	220	170	350	13200	2800	750	25	13536
Мелкая фракция	190	130	180	6900	3400	400	15	7183
Сернокислотная фракция	40	25	50	170	70	—	10	96
Керосиновая фракция	—	—	—	—	—	—	—	—



**Таблица 6**  
**Результаты измерений пробы воды**

№ пробы	Объемная активность, Бк/л				
	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th	<sup>234</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	Aэфф.
вода	30	< 10	< 10	20	31

осадок гидроциклонированием разделили на легкую и тяжелую фракции. Фильтрат подвергли сернокислотной экстракции, в результате чего органические соединения перешли в сернокислотную фракцию. Во всех полученных фракциях определяли содержание радионуклидов (табл. 5).

Также, с целью определения активности ранее была отобрана проба воды из шламохранилища, находящегося под заливом. Результаты измерения объемной активности пробы воды представлены в табл. 6.

Из полученных результатов видно, что воды шламохранилища превышают установленные уровни вместительства [10], но жидкими радиоактивными отходами не являются.

#### **Формы нахождения природных радионуклидов**

По данным проведенных исследований можно сделать вывод, что радионуклиды концентрируются не в органической, а в минеральной части, следовательно, для дезактивации нефтезагрязненных грунтов необходимо сконцентрировать и удалить минералы-концентраторы радия.

Радий не образует в природе самостоятельных минералов, однако в качестве изоморфной примеси может входить в состав минералов, содержащих катионы с близким к нему радиусом ионов. Являясь по химическим свойствам щелочноземельным элементом, радий по поведению сходен с такими элементами, как барий, кальций и др., с которыми может сокристаллизоваться благодаря изоморфизму [3]. С этим может быть связана повышенная радиоактивность молодых радиевых минералов, не содержащих уран, радиобарита (Ba,Ra)SO<sub>4</sub>, радиокальцита (Ca,Ra)CO<sub>3</sub>, радиофлюорита (Ca,Ra)F<sub>2</sub> и др.

Обогащение радием минералов в нефтешламах может происходить в результате совместного осаждения радия с барием или кальцием из растворов, содержащих повышенные содержания сульфат-ионов. Радий осаждается с BaSO<sub>4</sub> и CaSO<sub>4</sub>, выпадая на поверхности труб, арматуры, резервуаров, где он становится практически нерастворимым постоянным источником гамма-излучения и радона. Наличие большого количества барита на буровом оборудовании и соответственно в шламах связывается с окислением поверхностными водами, попадающими в скважины при бурении растворимого сернистого бария, присутствующего в пластовых водах восстановительной нефтяной среды [1].

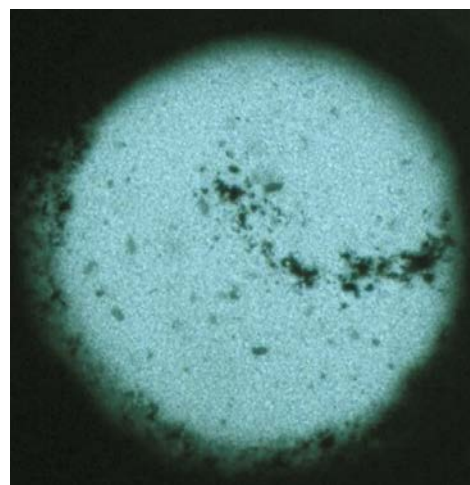
Кроме изоморфного вхождения радия в кристаллическую решетку подходящих минералов возможным представляется также вхождение радия в эти минералы в виде самостоятельной фазы RaSO<sub>4</sub> в виде микронных включений.

Для установления форм нахождения радия в шламах были использованы специальные методы исследований. При определении радиоактивности минеральных образований был применен радиографический метод. Для чего отобранный под бинокуляром зернистый агрегат шламов помещался в синтетическую смолу, и после отвердевания препарат полировался. В результате минеральные зерна в виде вкрапленников оказывались рассеяны в синтетическом цементе. Для получения радиографии в качестве детектора использовалась рентгеновская пленка, время экспозиции 4–5 суток. При проявлении пленки в площади препарата обнаружались точечные засвечивания, по расположению соответствующие вкрапленным минеральным зернам, что указывает на их радиоактивность (рис. 1).

Дальнейшее изучение полированных препаратов проводилось с помощью методов электронной микроскопии. Использовался сканирующий микроскоп Zeiss EVOLS10 (Zeiss, Германия), снабженный энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50 (Oxford, Великобритания). Изображение и рентгеновский спектр зерна радиобарита приведены на рис. 2, результаты энергодисперсионного анализа — в табл. 7.

Электронномикроскопические изображения и элементный состав показывают, что зернистые минеральные образования шламов представляют собой агрегатные сростки тонкодисперсных индивидов, представленных в различных соотношениях: кварцем, карбонатом, баритом и незначительным количеством алюмосиликатов. Основным минералом-концентратором радионуклидов является новообразованный барит, содержащий до 2 % стронция. Из радионуклидов в агрегатных сростках устанавливается радон, содержание которого неравномерно и варьирует от 0,00 до 0,80 вес. %.

Радон <sup>222</sup>Rn является радиоактивным инертным газом, дочерним продуктом распада <sup>226</sup>Ra и может покидать матрицу материала (эманировать), содержащего материнский радионуклид. Результаты гамма-



**Рис. 1. Радиография полированного препарата зернистого агрегата шлама**

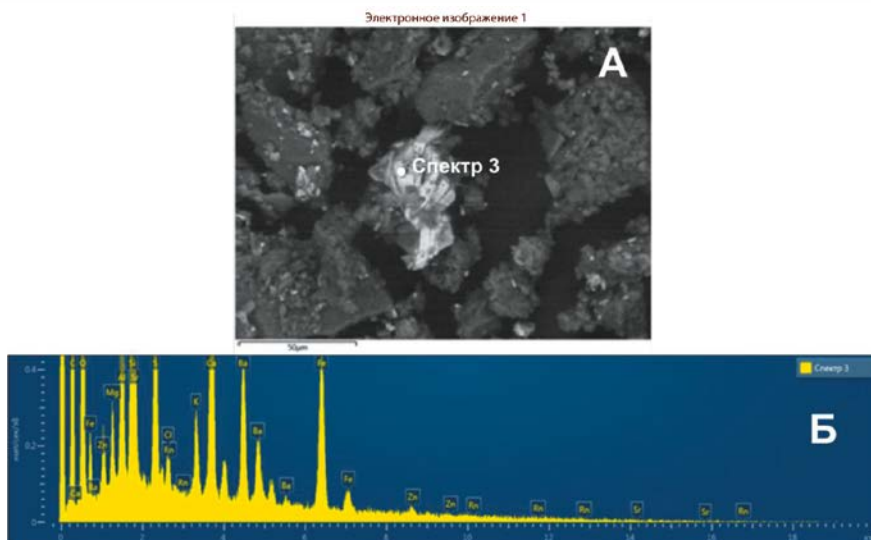


Рис. 2. А — выделения радиобарита в пробе НШ-2. Изображение в BSE. Б — рентгеновский спектр в точке 3

Таблица 7

Результаты энергодисперсионного анализа зерна радиобарита в точке 3 (сканирующий микроскоп Zeiss EVOLS10 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50), весовые %

Элемент	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S
Содержание	0,02	33,99	1,4	1,78	7,74	16,66	0,17	4,41
Элемент	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Sr	Ba	Rn
Содержание	0,64	1,89	7,54	9,31	0,87	1,28	12,3	0,0

спектрометрического анализа (табл. 4) показали высокие уровни активности гамма-излучающих дочерних продуктов распада  $^{226}\text{Ra}$  в пробе:  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , равных активности материнского радионуклида в пределах аналитической неопределенности. Соответственно материал этой пробы можно отнести к малоэманирующему, что характерно для соединений радия с барием. Таким образом, высокий уровень активности шлама обусловлен накоплением гамма-излучающих продуктов распада в матрице материала из-за низкого уровня эманирования.

Так как механические природные частички изначально содержались в нефти, то полученный в процессе предварительной переработки шлам содержит определенную часть нефтепродуктов. Оптико-микроскопические наблюдения сухого шлама показывают, что практически каждое зерно шламового агрегата покрыто черной нефтяной коркой. Затвердевшая нефтяная пленка не позволяет радону мигрировать за пределы объема зерен, радон остается как бы заперт в межзерновых интерстициях минеральной матрицы под нефтяной пленкой, что также уменьшает эманирование. При нарушении пленки радон быстро улетучивается, что было отмечено при проведении анализов. Радиоактивность больших классов крупности была выше, чем измельченного материала. Также был отмечен тот факт, что гамма-активность образцов сни-

жалась за время проведения анализа, что также, вероятно, связано с возрастанием эманиции после нарушения целостности препарата.

### Выводы

Таким образом, при проведении исследований радиационной обстановки на ряде накопителей бурового шлама было установлено, что некоторые из них являются радиационноопасными объектами. На производственных площадках нефтедобычи, предварительной переработки и складирования нефтешламов радиационную опасность представляют главным образом радионуклиды  $^{226}\text{Ra}$  и дочерние продукты его распада  $^{232}\text{Th}$ .

Вероятной формой нахождения радионуклидов в шламе является изоморфное вхождение их в кристаллическую решетку таких минералов, как барит, кальцит и гипс, а также, возможно, микровключения в виде собственных фаз.

Органическая составляющая нефтешламов и вода шламохранилищ не являются радиационноопасными отходами.

Для обеспечения экологической безопасности участков нефтедобычи в процессе разработки технологии переработки или захоронения шлама необходимо учитывать наличие в них повышенных содержаний естественных радионуклидов и действовать согласно нормам действующего законодательства [8, 10–12].

*Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику ФГБУ «ВИМС» доктору геолого-минералогических наук Бахуру А.Е. за ценные замечания и консультации при написании статьи.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов, В.И. Радиометрия / В.И. Баранов. — М.: Изд-во АН СССР, 1955.
2. Берман, Ю.С. Взаимосвязь микроэлементов сырых нефтей и вмещающих пород / Ю.С. Берман // Отечественная экология. — 1994. — № 2.
3. Бетехтин, А.Г. Минералогия / А.Г. Бетехтин. — М.: Изд-во геологической литературы, 1950. — 956 с.
4. Калинина, Е.В. Методы обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов нефтеперерабатывающих предприятий / Е.В. Калинина, Д.Э. Меншагиев // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2018. — Т. 1. — С. 74–77.
5. Коленчуков, О.А. Комплексная технология утилизации отходов нефтепродуктов / О.А. Коленчуков // Вопросы развития мировых научных процессов: Материалы Международной научно-практической конференции. — 2018. — С. 93–95.
6. Ларичев, Н.А. Нефтешламы. Перспективы переработки / Н.А. Ларичев, Н.А. Аверина // Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки: Материалы Международной научно-практической конференции. — Уфа: Изд-во ООО «Агентство международных исследований», 2017. — С. 4–8.

7. Нуриев, А.Н. Микроэлементы нефтяных вод и возможности их комплексного извлечения / А.Н. Нуриев. — Баку: ЭЛМ, 1981.
8. О недрах (в редакции Федерального закона от 3 марта 1995 года N 27-ФЗ) (с изменениями на 28 декабря 2013 года) (редакция, действующая с 1 июля 2014 года).
9. Смыков, В.В. О проблеме утилизации нефтесодержащих отходов / В.В. Смыков, Ю.В. Смыков, А.И. Ториков // Нефтяное хозяйство. — 2005. — № 3. — С. 30–33.
10. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» ред. от 16.09.2013.
11. Федеральный закон от 11.07.2011 N 190-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
12. Федеральный классификационный каталог отходов (редакция от 02.11.2018г.), Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.
13. Yermolayev, Y.V. Study of the mechanism of mechanical activation processing of viscous high paraffin oil and sludge from them which optimize their physical and chemical properties / Y.V. Yermolayev, K.K. Ut-kilbaev, A.R. Nurmukhametova, V.N. Yermolayev, S.S. Shelepanov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. — 2015. — С. 815–822.

© Коллектив авторов, 2021

Бугриева Елена Павловна // otдел-a@vniiht.ru  
 Казанцев Вадим Владимирович // otдел-a@vniiht.ru  
 Величина Наталья Сергеевна // nefertari.88@mail.ru  
 Стародубов Алексей Валерьевич // sav@u238.ru  
 Гулынин Александр Викторович // alexgu@u238.ru  
 Петрин Анатолий Васильевич // petrin-vims1@yandex.ru

УДК (696.6+628.9 622.143)(075.8)

Оливетский И.Н., Соловьев А.М., Башкуров А.Ю.  
 (МГРИ-РГГРУ)

### АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕРЕГУЛИРУЕМОГО И ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Целью работы является анализ энергетических показателей при бурении геологоразведочных скважин с применением нерегулируемого и частотно-регулируемого асинхронного электропривода. **Ключевые слова:** модель бурильной колонны, переходные процессы, энергетические показатели.

Olivetskiy I.N., Solovjev A.M., Bashkurov A.Yu. (MGRI-RGGRU)

ANALYSIS OF ENERGY PERFORMANCE IN DRILLING EXPLORATION WELLS USING UNREGULATED AND FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

The aim of the work is to analyze energy performance in drilling exploration wells using unregulated and frequency-controlled asynchronous electric drive. **Keywords:** drill string model, transients, energy indicators.

Анализ энергетических показателей ( $U$  — напряжение питающей сети,  $B$ ;  $I_c$  — ток статора,  $A$ ;  $M_{дв}$  — момент приводного двигателя,  $Hm$ ) электропривода бурового станка для переходных процессов выполнялся при основных тяжелых режимах бурения (пуск, приложение нагрузки, прихват колонны бурильных труб).

Моделирование производилось на персональном компьютере по методике [1] для двух систем:

1. Нерегулируемый асинхронный электропривод — колонна бурильных труб (НАЭ — КБТ);
2. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод — колонна бурильных труб (ЧРАЭ — КБТ).

Условная глубина бурения скважины принята 1000 м. Расчеты проводились на базе буровой установки ЗИФ 1200 МР. Результаты фиксировались в виде графиков, на которых отображались величины, характеризующие энергетические показатели такие, как:  $U(T)$  — изменение напряжения питающей сети от времени переходных процессов,  $B$ ;  $I_c(T)$  — изменение тока статора от времени переходных процессов,  $A$ ;  $M_{дв}(T)$  — изменение момента приводного двигателя от времени переходных процессов,  $Hm$ .

#### 1.1 Пуск колонны бурильных труб.

Процесс пуска при бурении геологоразведочных скважин за счет наличия колонны бурильных труб (КБТ) является одним из наиболее тяжелых режимов. При исследовании процесса пуска в моделях принимались нулевые начальные условия. Процесс пуска в системе НАЭ — КБТ разбивается на два этапа: пуск вхолостую асинхронного электродвигателя (АД) до номинальной скорости, подключение КБТ при поднятой над забоем коронкой. В системе ЧРАЭ — КБТ пуск производился вхолостую совместно с КБТ при поднятой над забоем коронкой.

На рис. 1 представлены энергетические показатели в электроприводе (ЭП) бурового станка при пуске КБТ для систем:

- а) НАЭ;
- б) ЧРАЭ.

Анализ графиков (рис. 1) позволяет сделать следующие выводы:

1. При пуске электродвигателя в системе НАЭ — КБТ происходит значительный бросок тока статора (1000 А) и момента приводного двигателя (3000 Нм).

2. В системе ЧРАЭ — КБТ, в отличие от системы НАЭ — КБТ, при пуске электродвигателя практически отсутствуют броски тока статора и момента приводного двигателя. Разгон электродвигателя сопровождается плавным увеличением тока статора и момента приводного двигателя, что объясняется плавным возрастанием частоты вращения приводного двигателя и возможностью данного привода увеличивать время пуска.

#### Прикладывание нагрузки на коронку.

При моделировании прикладывания нагрузки рассматривается наиболее тяжелый случай, когда нагрузка прикладывается скачком и остается постоянной по величине, равной номинальному моменту электродвигателя. Скачкообразное прикладывание постоянной нагрузки на коронку вызывает колебания момен-