



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-39-46>
УДК 539.16.04+539.16.07



СОДЕРЖАНИЕ ПРИРОДНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} В ТИТАНОВЫХ РУДАХ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ ПИЖЕМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Б. МАКЕЕВ

ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук»
35, Старомонетный пер., Москва 119017, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Важной обязательной характеристикой для руд всех месторождений, позволяющей безопасно их изучать, разрабатывать, обогащать и получать товарные продукты, является оценка содержания в них природных радионуклидов.

Цель — оценить содержание естественных радионуклидов в породах и рудах Пижемского титанового месторождения и определить их минералы-концентраторы.

Материалы и методы. Исследование 15 керновых проб скважин в пределах Пижемского титанового месторождения проведено в лабораториях Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН) и Всероссийском институте минерального сырья (ФГБУ ВИМС) с использованием полупроводникового гамма-спектрометра «Ortec-65195-P/DSPecPlus».

Результаты. Впервые проведена оценка радиационной безопасности и определена концентрация естественных радионуклидов Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} в титановых рудах и вмещающих породах Пижемского месторождения (Средний Тиман). Концентратором Ra^{226} является циркон, Th^{232} — монацит (куларит), K^{40} — гидромусковит-иллит. Наименьшие содержания радионуклидов установлены для кварцевых (D_2pz) и кварц-каолиновых (PR_3mr^3) песчаников стекольного качества. Титановые руды месторождения относятся к I классу минерального сырья ($A_{эфф} < 0,74$ кБк/кг), они совершенно безвредны для человека.

Заключение. Низкие содержания радионуклидов позволяют безопасно проводить обогащение титановых руд, а песчаники вскрыши стекольного качества использовать без ограничений.

Ключевые слова: Пижемское месторождение, радионуклиды Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} , минералы-концентраторы циркон, монацит, гидромусковит-иллит

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена в соответствии с госзаданием по теме FMMN-2021-0005ИГЕМ РАН.

Для цитирования: Макеев А.Б. Содержание природных радионуклидов Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} в титановых рудах и вмещающих породах Пижемского месторождения. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(2):39—46. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-39-46>

Статья поступила в редакцию 15.12.2021

Принята к публикации 05.09.2022

Опубликована 15.09.2022

CONTENT OF Ra^{226} , Th^{232} AND K^{40} NATURAL RADIONUCLIDES IN THE TITANIUM ORES AND HOST ROCKS OF THE PIZHEMSKOYE DEPOSIT

ALEXANDER B. MAKEYEV

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia*

ABSTRACT

Background. The value of natural radionuclide content in ores is a fundamental characteristic of any ore deposit, determining the possibility of studying, developing and enriching these ores, as well as manufacturing commercial products on their basis.

Aim. To evaluate the content of natural radionuclides in the rocks and ores of the Pizhem titanium deposit and to determine their mineral concentrators.

Materials and methods. A study of 15 core samples from wells within the Pizhem titanium deposit was carried out in the laboratories of IGEM RAS and VIMS using an “Ortec-65195-P/DSpecPlus” semiconductor gamma spectrometer.

Results. For the first time, a radiation safety assessment was carried out and the concentration of Ra^{226} , Th^{232} and K^{40} natural radionuclides in the titanium ores and host rocks of the Pizhemskeye deposit (the Middle Timan) was determined. The mineral concentrators for Ra^{226} , Th^{232} and K^{40} were found to be zircon, monazite (kularite) and hydromuscovite-illite, respectively. The lowest content of radionuclides was established for quartz (D_2pz) and quartz-kaolinite (PR_3mr^3) sandstones of glass quality. The titanium ores of the deposit belong to the I class of mineral raw materials ($A_{eff} < 0.74$ kBq/kg), thereby being completely harmless to humans.

Conclusion. The low content of radionuclides in the studied ores allows them to be safely enriched, and the overburden sandstones of glass quality to be used without restrictions.

Keywords: Pizhemskeye deposit, Ra^{226} , Th^{232} , and K^{40} radionuclides, mineral concentrators, zircon, monazite, hydromuscovite-illite

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Funding: The work was carried out in accordance with the state task on the topic FMMN-2021-0005 IGEM RAS.

For citation: Makeyev A.B. The content of natural radionuclides Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} in titanium ores and host rocks of the Pizhemskeye deposit. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(2):39—46. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-39-46>

Manuscript received 15 December 2021

Accepted 5 September 2022

Published 15 September 2022

Одно из крупнейших в России Пижемское титановое (псевдуртил-лейкоксен-кварцевое) месторождение, запасы которого по категориям C_1 и C_2 утверждены ГКЗ в 2020 г. в количестве 300 млн т руды и 12,8 млн т TiO_2 (по борту 3 мас.% TiO_2), расположено в северной периклинальной части Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана (Республика Коми). Геологическое строение, вещественный и минеральный состав руд и вмещающих пород хорошо изучены [2, 3]. Титаноносная малоручейская толща PR_3mr с лейкоксен-псевдурти-

ловым оруденением с угловым несогласием субгоризонтально залегает на рифейских глинистых сланцах PR_3lv и также с угловым несогласием перекрывается терригенно-осадочными и вулканогенно-осадочными породами среднего-верхнего девона. Руды и породы не содержат остатков руководящей биоты. Среднее содержание TiO_2 в пижемских сероцветных песчаниках средней малоручейской толщи (PR_3mr^2) — 5,7 мас.%, при средней мощности пласта 5,6 м, в красноцветных песчаниках нижней малоручейской толщи

(PR_3mr^1), соответственно, 3,5 мас.% (35 м). На восток и северо-восток мощность рудных пластов значительно увеличивается, до 40 и 100 м соответственно.

В рудах Пижемского месторождения диагностировано 40 минералов и их разновидностей: ильменит, пикроильменит, рутил, Fe-рутил, псевдорутил — $(Fe^{2+}, Fe^{3+})_{2-n}Ti_3O_9 \cdot SiO_2$, лейкоксен — $TiO_2 \cdot SiO_2$, Nb-рутил («ильменорутил»), Ta-Nb-рутил («стриверит»), колумбит, циркон, монацит, куларит, ксенотим, флоренсит, хромит и другие. Главные рудные титановые минеральные фазы — лейкоксен и псевдорутил — не имеют строгой ориентировки и сортировки в песчаниках, как и остроугольные зерна кластогенного кварца. Цементом рудных песчаников являются гематит, сидерит, гидромусковит, каолинит. Сидерит часто образует гидротермальные прожилки толщиной до 1—2 мм. По классификации ВИМС кварц-лейкоксеновые титановые месторождения относятся к гидротермально-метаморфогенным коренным месторождениям [14]. В них на месте происходит ступенчатое гидротермально-метаморфическое преобразование ильменита в рутиловый лейкоксен с выносом железа при участии флюида и углекислоты: ильменит → Fe-рутил → псевдорутил → лейкоксен + сидерит + рутил [3].

Важной обязательной характеристикой для руд всех месторождений, позволяющей безопасно их изучать, разрабатывать, обогащать и получать товарные продукты, является оценка содержания в них природных радионуклидов [12, 13]. Цель настоящей работы: оценить содержание естественных радионуклидов в породах и рудах Пижемского титанового месторождения и определить их минералы-концентраторы.

Материалы и методы

Исследования 15 керновых проб проведены в лабораториях ИГЕМ РАН и ВИМС по единой методике измерения удельной активности естественных радионуклидов в твердых и сыпучих пробах с использованием полупроводникового гамма-спектрометра «Ortec-65195-P/DSPec-Plus» (США).

Материал для исследования был получен из керна разведочных и поисковых скважин в пределах южной части Пижемского месторождения. Основная часть материала, 12 проб, для исследования была отобрана из керна скважины 392, находящейся (рис.) на самом северном профиле L-940 [3] лицензионной площади АО «РУСТИТАН». Эта выборка была дополнена тремя пробами керна из других скважин (табл.). Таким образом, были

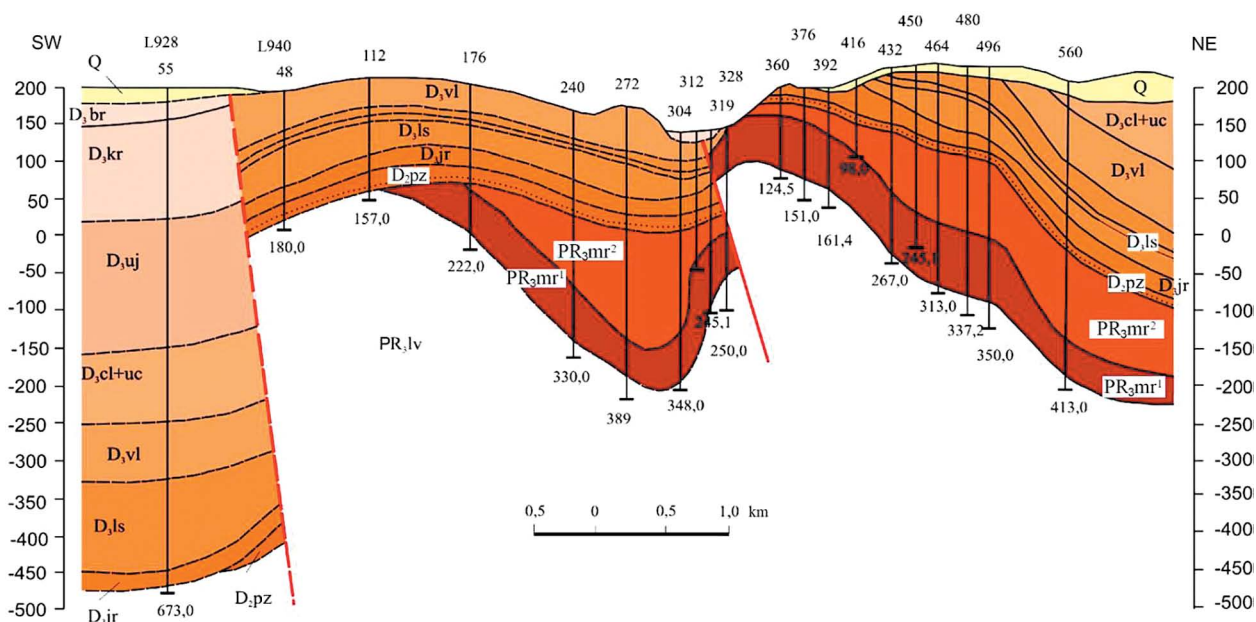


Рис. Геологический разрез L-940 через Пижемское титановое месторождение по данным Ухтинской геолого-разведочной экспедиции (1992). Малоручейская титаноносная толща обозначена индексами PR_3mr^2 — сероцветные песчаники, PR_3mr^1 — красноцветные песчаники

Fig. Geological section L-940 through the Pizhemskeye titanium deposit according to the Ukhinskaya geological survey (1992). The Malorucheykaya titanium-bearing strata is indicated by the PR_3mr^2 — gray-colored sandstones, PR_3mr^1 — red-colored sandstones

Таблица. Результаты определения природных радионуклидов в пробах титановых руд малоручейской толщи PR₃mr и вмещающих пород — вышезалегающих среднедевонских песчаниках (D₂pz) и нижезалегающих глинистых сланцах рифея (PR₃lv)
Table. Results of the determination of natural radionuclides in samples of titanium ores of the Maloruchey'skaya thickness PR₃mr and host rocks — overlying Middle Devonian sandstones (D₂pz) and underlying clay shales of the Riphean (PR₃lv)

№ пробы	Название породы	Вес, кг	Ra ²²⁶ , з/м	Th ²³² , з/м	K ⁴⁰ , з/м	±	Ra ²²⁶ , Бк/кг	±	Th ²³² , Бк/кг	±	K ⁴⁰ , Бк/кг	±	Возраст, толщи	Содержание компонентов, %				
														Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Zr, ppm	Sr, ppm	
3918-2	Песч. кварц.	1,000	0,77	0,20	0,80	0,52	0,54	10	3,0	10	3,0	<40	-	D ₂ pz	0,58	0,15	119	45
392-36	Песч. каолин.	0,164	0,80	0,21	0,51	<0,26	-	10,6	2,8	8,4	1,9	21	26	PR ₃ mr ³	0,25	0,92	96	157
392-35	Песч. сер.	0,230	4,74	0,68	15,94	2,04	0,14	63	7,7	60	7,7	170	42	PR ₃ mr ²	2,15	7,06	836	263
392-34	Песч. сер.	0,245	4,83	0,61	16,55	1,97	0,15	65	8,1	62	7,4	230	44	- « -	3,46	5,71	808	268
392-32	Песч. крас.	0,230	3,74	0,49	11,86	1,50	0,16	50	6,5	45	5,5	320	44	PR ₃ mr ¹	12,00	3,42	364	212
392-26	Аргиллит	0,215	4,05	0,58	13,49	1,68	0,20	54	7,8	51	6,3	410	59	- « -	8,26	1,78	365	303
392-25	Аргиллит	0,200	4,85	0,69	14,97	1,88	0,30	65	9,3	56	7,1	700	90	- « -	8,40	1,10	404	371
392-21	Аргиллит	0,175	4,77	0,63	14,46	1,81	0,32	64	8,5	55	6,8	720	95	- « -	10,29	1,40	460	440
392-15	Песч. крас.	0,230	4,42	0,57	11,31	1,39	0,80	59	7,6	43	5,3	240	43	- « -	5,25	3,21	246	203
392-14	Песч. крас.	0,225	3,27	0,43	10,56	1,30	0,78	44	5,8	40	4,9	230	39	- « -	6,31	2,90	193	164
392-13	Алевролит	0,154	4,11	0,56	12,42	1,58	0,27	55	7,5	47	6,0	580	80	- « -	8,90	2,16	324	190
392-3	Аргиллит	0,190	4,31	0,59	15,45	1,96	0,24	58	7,9	58	7,0	540	72	- « -	8,76	2,22	336	305
M-209	Песч. крас.	0,227	5,19	0,64	14,33	1,78	0,51	69	8,6	54	6,7	150	40	- « -	9,13	5,84	297	61
2515-18	Сланцы глин.	1,000	3,51	0,52	14,02	1,88	2,71	47	7,0	53	7,0	825	105	PR ₃ lv	5,69	1,60	144	54
2517-12	Сланцы глин.	1,000	3,21	0,45	14,97	1,88	3,61	43	6,0	56	7,0	1100	140	- « -	7,98	0,89	139	54
Сред-нее	Сероцветы	0,237	4,77	0,64	16,25	2,01	0,66	64,0	7,9	61,0	7,5	200,0	43,0	PR ₃ mr ²	2,80	6,38	822	265
	Красноцветы	0,205	4,30	0,58	13,21	1,65	0,21	57,6	7,7	49,9	6,2	432,2	62,4	PR ₃ mr ¹	8,59	2,67	332	250

Примечание. Эффективная удельная активность природных радионуклидов (A_{эфф}) в минеральном сырье и товаров, произведенных из этого сырья, определяется по формуле: A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 × A_{Th} + 0,09 × A_K, Бк/кг [13], где A_{Ra} и A_{Th} — удельная активность Ra²²⁶ и Th²³², находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами рядов U²³⁸ и Th²³² соответственно; A_K — удельная активность K⁴⁰, Бк/кг.

Note: The effective specific activity of natural radionuclides (A_{eff}) in mineral raw materials and goods produced from these raw materials is determined by the formula: A_{eff} = A_{Ra} + 1.3 × A_{Th} + 0.09 × A_K, Bk/kg [13], where A_{Ra} and A_{Th} are the specific activity of Ra²²⁶ and Th²³², which are in radioactive equilibrium with the rest members of the series U²³⁸ and Th²³², respectively; A_K — specific activity K⁴⁰, Bk/kg.

впервые получены сведения о содержании радионуклидов в полном вертикальном профиле пород: от перекрывающих месторождение среднедевонских кварцевых песчаников, через всю трехчленную титаносную малоручейскую толщу (PR_3mr), до подстилающих рифейских глинистых сланцев.

Результаты и обсуждение

Полные результаты исследования, а также частичные данные по химическому составу пород (рентгенофлуоресцентный метод, стандартная методика, лаборатория ИГЕМ) размещены в таблице. Наименьшие содержания радионуклидов установлены для кварцевых (D_2pz) и кварц-каолиновых (PR_3mr^3) песчаников стекольного качества.

Известно обязательное требование при проведении разведочных буровых работ, которые должны сопровождаться геофизическими исследованиями — каротажем скважин. При проведении геолого-разведочных работ (ГРП) в пределах Пижемского месторождения основным видом каротажа был гамма-картаж, который позволял точно отбивать литологические разности пород: кварцевые песчаники пород вскрыши, конглобрекчиевый горизонт полиминерального проявления Ичетью [7]; титановые руды малоручейской толщи; подстилающие рифейские глинистые сланцы. Источником γ -излучения является радионуклид Ra^{226} , который накапливается в древних зернах циркона и малакона при α -распаде в нем примеси урана [6, 10]. Установлено, что примерно 10% зерен циркона в проявлении Ичетью и малоручейской титаносной толщи содержат аномально высокие примеси иттрия, фосфора, урана и других некогерентных компонентов, которые отличают эту гидротермально измененную разновидность циркона от обычного магматического циркона. Геофизиком И.И. Зальцманович было предложено использовать данные γ -каротажа для экспрессной оценки содержания TiO_2 в титан-циркониевых песчаниках и песках (в том числе и в пижемских рудах) вместо дорогостоящих химических анализов. Предполагалось, что существует корреляция между значениями γ -излучения (или содержанием циркона) и содержанием титановых минералов в руде. Это предположение не оправдалось из-за неоднозначности и низкой корреляции между ZrO_2 и TiO_2 ($r = 0,579$) в сероцветных песчаниках и ($r = -0,632$) в красноцветных песчаниках [3].

Концентратором природного радионуклида Th^{232} является монацит (куларит),

в котором содержание тория варьирует от следов до нескольких процентов, это обстоятельство позволило радиоизотопными и химическими методами оценить возраст монацита [2, 4, 5, 11]. Кроме этого минерала в крайне малых количествах (в единичных зернах) в конглобрекчиевом горизонте проявления Ичетью обнаружены торианит $(Th,U,Pb)O_2$ и неназванная фаза $ThPO_4$ — фосфат тория [9], но эти два последних минерала не могут заметно повлиять на концентрацию радионуклида Th^{232} в рудах проявления Ичетью.

Природный радионуклид K^{40} концентрируется в калиевых минералах. Главным концентратом калия в пределах Пижемского месторождения является гидромусковит-иллит, содержащий 9—11 мас.% K_2O , который вместе с каолинитом слагает глинистый цемент в псевдорутил-лейкоксен-кварцевых титановых рудах, он же является главным породообразующим минералом глинистых сланцев рифейских пород фундамента [8]. Содержание калия и его радионуклида K^{40} возрастает в литологическом разрезе пород месторождения сверху вниз.

Все три охарактеризованных выше природных радионуклида имеют большое значение и используются при проведении аэрогеофизических радиоизотопных исследований. Такая аэросъемка 1:50000 масштаба уже была проведена ранее в исследуемом регионе — Среднем Тимане [1]. Ее результаты были использованы при геологическом картировании и поисках месторождений. Еще более полезной оказалась бы крупномасштабная радиоизотопная съемка 1:10000 и 1:5000 в пределах самого Пижемского месторождения. Она могла бы уточнить геологические границы разномасштабных образований: выявить мелкие аномалии (Ra^{226} и Th^{232}), связанные с выходами конглобрекчиевого горизонта полиминерального проявления Ичетью; четко провести границы между выходами пород рифейского фундамента и титаносной толщей под рыхлыми маломощными четвертичными ледниковыми отложениями.

Заключение

Природный радионуклид радий (Ra^{226}) концентрируется в минерале цирконе $ZrSiO_4$, которого больше всего в сероцветных песчаниках (PR_3mr^2), а также частично в монаците. Природный радионуклид торий (Th^{232}) содержится в минерале монаците (куларите) — фосфате редких земель $(Ce,Nd,La)PO_4$, этот минерал

концентрируется в сероцветных и красноцветных титаноносных песчаниках. Природный радионуклид калий (K^{40}) содержится в основном в калиевой слюде (гидромусковите-иллите), который вместе с каолинитом, сидеритом и гематитом образует поровый межзерновой цемент титановых руд в песчаниках, алевролитах и аргиллитах, этого минерала больше всего в цементе пород нижней красноцветной толщи (PR_3mr^1) и глинистых сланцах (PR_3lv) фундамента. При переработке титановых руд по разработанной в ИМЕТ РАН технологии калийсодержащая слюда — гидромусковит-иллит уходит в шламовую фракцию, а монацит и циркон — в мелкую тяжелую фракцию ($d \approx 4,0 \text{ г/см}^3$). Таким образом, получаемые концентраты титановых минералов, состоящие из ильменита, псевдорутила и лейкоксена, и их обескремненные товарные продукты будут

почти полностью свободны от природных радионуклидов.

Впервые определенные показатели содержания природных радионуклидов в титановых рудах и вмещающих породах Пижемского месторождения оказались минимальными, они характеризуют все изученные пробы как содержащие природные радионуклиды (радий Ra^{226} , торий Th^{232} и калий K^{40}) в фоновых количествах и ниже фона (табл.), такие содержания безвредны для человека. Титановые руды относятся к I классу минерального сырья ($A_{эфф} < 0,74 \text{ кБк/кг}$) и могут быть использованы в качестве сырья в технологических процессах для получения концентратов и товарной продукции, а кварцевые и кварц-каолиновые песчаники стекольного качества — в строительной промышленности без ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Контарович Р.С.* Отчет об аэрогеофизических поисках бокситов и других твердых полезных ископаемых на Пижменской и Вольско-Вымской площадях Тимана партией №36 в 1977—78 гг. 1979. Росгеолфонд.
2. *Макеев А.Б.* Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // *Минералогия*. 2016. № 1. С. 24—49.
3. *Макеев А.Б.* Пижемское титановое месторождение новый объект ближайшего освоения в Арктической зоне России // *Арктика: экология и экономика*. 2021. № 4 (39). С. 541—556. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-4-541-556>.
4. *Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Красоткина А.О.* Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман) // *Георесурсы*. 2020. 22(1). С. 22—31. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31>
5. *Макеев А.Б., Вирюс А.А.* Монацит проявления Ичетью (состав, морфология, возраст) // *Изв. вузов. Геология и Разведка*. 2013. № 3. С. 10—15.
6. *Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г.* Геохимия и изотопный U-Pb возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016. № 5. С. 38—52. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-5-38-52>
7. *Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г.* Новые данные о U-Pb возрасте и составе циркона (SHRIMP-II, SIMS) из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 11. С. 28—42. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-11-28-42>
8. *Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г.* Глинистые сланцы лунвожской свиты Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман): состав, возраст, акцессорный циркон // *Материалы Минералогического семинара с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2018)»*. Сыктывкар, 2018. С. 40—41.
9. *Макеев А.Б., Макеев Б.А., Борисовский С.Е.* Новая минеральная фаза — фосфат тория (Средний Тиман, Республика Коми) // *Региональная геология и металлогения*. 2021. № 87. С. 110—117. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_87_110-117
10. *Макеев А.Б., Скублов С.Г.* Иттриево-редкоземельные цирконы Тимана: геохимия и промышленное значение // *Геохимия*. 2016. № 9. С. 821—828. <https://doi.org/10.1134/S0016702916080070>
11. *Макеев А.Б., Скублов С.Г., Красоткина А.О., Борисовский С.Е., Томсен Т.Б., Серре С.Х.* Возраст монацита из полиминерального проявления Ичетью (SHIME и LA-ICP-MS методы) // *Записки российского минералогического общества*. 2020. Ч. CXLIX. № 1. С. 76—95. <https://doi.org/10.31857/S0869605520010086>
12. Приложение. Санитарные правила и нормы СанПин 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47).
13. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка минеральных удобрений и агрохимикатов по показателям радиационной безопасности. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2014. 20 с.

14. Тигунов Л.П., Быховский Л.З., Зубков Л.Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения / «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая. № 17. М.: ВИМС. 2005. 104 с.

REFERENCES

- Kontarovich R.S. Report on aerogeophysical searches for bauxite and other solid minerals on the Pizhenskaya and Volsko-Vymskaya areas of Timan by party No. 36 in 1977—78, 1979. Rosgeofond (In Russian).
- Makeyev A.B. Typomorphic features of minerals of titanium ores of the Pizhenskoye deposit // Mineralogiya. 2016. No 1. P. 24—49 (In Russian).
- Makeyev A.B. The Pizhenskoye titanium deposit is a new object of the nearest development in the Arctic zone of Russia] // Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy. 2021. V. 11. No 4. P. 541—556 (In Russian). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-4-541-556>
- Makeyev A.B., Borisovskiy S.E., Krasotkina A.O. The chemical composition and age of monazite and kularite from titanium ore of Pizhenskoye and Yarega deposits (Middle and Southern Timan) // Georesources. 2020. V. 22. No 1. P. 22—31 (In Russian). <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31>
- Makeyev A.B., Viryus A.A. Monazit of the Ichetyu occurrence (composition, morphology, age) // Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 2013. No 3. P. 10—15 (In Russian).
- Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Skublov S.G. Geochemistry and U-Pb-age of zircon from Pizhenskoe titanium deposit (Middle Timan) // Vestnik IG Komi SC UB RAS. 2016. No 5. P. 38—52 (in Russian). <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-5-38-52>
- Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Skublov S.G. New data on the U-Pb age and composition of zircon (SHRIMP-II, SIMS) from the Ichetyu polymineral ore occurrence (Middle Timan) // Vestnik IG Komi SC UB RAS. 2017. No 11. P. 28—42 (In Russian). <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-11-28-42>
- Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Skublov S.G. Clay shales of the Lunvozhskaya formation of the Volsko-Vymskaya ridge (Middle Timan): composition, age, accessory zircon. Materials of the Mineralogical seminar with international participation “Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy” (Yushkin readings — 2018). Syktyvkar, 2018, P. 40—41 (In Russian).
- Makeyev A.B., Makeyev B.A., Borisovskiy S.E. Thorium phosphate: New mineral phase (Middle Timan, Komi Republic) // Regional Geology and Metallogeny. 2021. No. 87. P. 110—117 (In Russian). https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_87_110-117
- Makeyev A.B. and Skublov S.G. Y-REE-Rich Zircons of the Timan Region: Geochemistry and Economic Significance // Geochemistry International, 2016, V. 54. No 9. P. 788—794. <https://doi.org/10.1134/S0016702916080073>
- Makeyev A.B., Skublov S.G., Krasotkina A.O., Borisovskiy S.E., Thomsen T.B., Serre S.H. The age of monazite from the Ichet'yu occurrence, Middle Timan (Chime and LA—ICP—MS Methods) // Geology of Ore Deposits. 2020. V. 62. No 8. P. 773—786. <https://doi.org/10.1134/S1075701520080103>
- Application. Sanitary rules and regulations SanPIN 2.6.1.2523-09 “Norms of radiation safety NRB-99/2009” (approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated July 7, 2009. No 47) (In Russian).
- Radiation control and sanitary-epidemiological assessment of mineral fertilizers and agrochemicals according to radiation safety indicators. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2014. 20 p. (In Russian).
- Tigunov L.P., Bykhovskiy L.Z., Zubkov L.B. Titanium ores of Russia: state and prospects of development, in Mineral Raw Materials, Geological and Economic Series. Ed. by L.P. Tigunov, (VIMS, Moscow, 2005). No. 17. 104 p. (in Russian).

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Макеев А.Б. — работая в ФГБУН «ИГЕМ РАН» и проводя геолого-минералогические исследования на данной территории, собрал полевой каменный материал для статьи из керна скважин, разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Alexander B. Makeyev — working at the IGEM RAS and conducting geological and mineralogical research in this area, collected field stone material from the core of wells for the article, developed the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Макеев Александр Борисович — доктор геолого-минералогических наук; ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук»; профессор по специальности минералогия, кристаллография.

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

E-mail: abmakeev@mail.ru

SPIN-код: 6640-1703

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8815-0959>

Alexander B. Makeyev — Dr. of Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; Professor in Mineralogy and Crystallography.

35, Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russia

E-mail: abmakeev@mail.ru

SPIN-code: 6640-1703

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8815-0959>