DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33

В.Г. Барчуков, О.А. Кочетков, В.Н. Клочков, Н.А. Еремина, П.П. Сурин, А.А. Максимов, Д.И. Кабанов, В.К. Величко, Н.А. Богданенко, Ж.И. Алсагаев

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УГЛЕРОДА-14 В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КУРСКОЙ АЭС

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Валерий Гаврилович Барчуков, e-mail: barchval@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Введение: Радионуклид ¹⁴С входит в число пятнадцати радионуклидов, определяющих не менее 99 % дозы облучения критической группы населения от источников выбросов АЭС. Непрерывный рост суммарной мощности работающих АЭС приводит к значительному увеличению количества ¹⁴С, выбрасываемого в окружающую среду при эксплуатации АЭС. Эффективное улавливание и захоронение ¹⁴С, обладающего периодом полураспада 5760 лет, — очень трудоемкое мероприятие. При этом за счет высокой подвижности этого радионуклида локальные очаги загрязнения ¹⁴С могут оказаться как вблизи АЭС на расстоянии 1—2 км от ее вентиляционной трубы, так и в почве и растениях, находящихся от АЭС на расстоянии 20—30 км за счет переноса воздушных масс. Поэтому контроль образования радионуклида ¹⁴С при работе АЭС, его содержания в выбросах и сбросах АЭС, а также распределения в окружающей среде является на сегодняшний день актуальной проблемой.

<u>Цель:</u> Анализ загрязнения окружающей среды за счет выбросов и сбросов радионуклида ¹⁴С при эксплуатации Курской АЭС. <u>Материал и методы:</u> При проведении исследований использована разрабатываемая специалистами лаборатории Радиационной безопасности персонала методика определения удельной активности радионуклида ¹⁴С в почве и растительности. Для исследования содержания радионуклида ¹⁴С в воздухе был использован метод барботирования воздуха через расходомер-пробоотборник TASC-HT-HTO-C-14 (Overhoff Technology, США) и метод кондиционирования воздуха с помощью осушителя воздуха фирмы Ballu BDH-15L (Ballu, Россия). Для подготовки счетных образцов из отобранных проб почвы и продуктов питания был использован метод сжигания отобранных проб в системе каталитического разложения Pyrolyser-6 Trio. Все подготовленные счетные образцы, в том числе из проб поверхностных вод и биосубстрата персонала Курской АЭС и населения, были измерены методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии на спектрометре Tri-Carb 3180TR/SL.

<u>Результаты:</u> На основе комплексного подхода к оценке содержания радиоуглерода в воздухе, воде, почве и пищевых продуктах выполнен анализ формирования загрязнения окружающей среды за счет выбросов и сбросов радионуклида ¹⁴С при эксплуатации Курской АЭС.

Выводы: Показано повышенное содержание радионуклида ¹⁴С в пробах почвы, пищевых продуктах и растительности в районе расположения Курской АЭС с ядерным реактором (ЯР) РБМК-1000 как по сравнению с содержанием естественного ¹⁴С, так и с АЭС, эксплуатирующими ЯР БН-600,800 и ВВЭР-1000. Подтверждена необходимость учета выбросов радиоуглерода с АЭС в окружающую среду в задаче оптимизации радиационной защиты населения в условиях нормальной эксплуатации АЭС.

Ключевые слова: радиоуглерод, радиоуглерод в почве, радиоуглерод в растительности, выброс радиоуглерода, АЭС

Для цитирования: Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Клочков В.Н., Еремина Н.А., Сурин П.П., Максимов А.А., Кабанов Д.И., Величко В.К., Богданенко Н.А., Алсагаев Ж.И. Распространение углерода-14 в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Курской АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 1. С. 25–33. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33

DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33

V.G. Barchukov, O.A. Kochetkov, V.N. Klochkov, N.A. Eremina, P.P. Surin, A.A. Maximov, D.I. Kabanov, V.K. Velichko, N.A. Bogdanenko, Zh.I. Alsagaev

Distribution of Radiocarbon in the Environment under Normal Conditions of Operating of Kurskaya Nuclear Power Plant

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: V.G. Barchukov, e-mail: barchval@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction: ¹⁴C is one of the fifteen radionuclides that account for at least 99 % of the radiation dose to the critical group of the population from NPP emission sources. The continuous growth of the total capacity of operating NPPs leads to a significant increase in the amount of ¹⁴C emitted into the environment during NPP operation. Efficient capture and disposal of ¹⁴C, which has a half-life of 5760 years, is a very laborious undertaking. At the same time, due to the high mobility of this radionuclide, local foci of contamination with ¹⁴C can appear both near the NPP at a distance of 1–2 km from its ventilation pipe, and in soil and plants located at a distance of 20–30 km from the NPP due to the transfer of air masses. Therefore, the control of the formation of ¹⁴C during the operation of nuclear power plants, its content in emissions and discharges of nuclear power plants, as well as distribution in the environment is an urgent problem today.

<u>Purpose:</u> Analysis of the environmental pollution due to emissions and discharges of radiocarbon from the Kurskaya nuclear power plant. <u>Material and methods:</u> During the research, a method being developed by specialists of the Laboratory for Radiation Safety of Personnel was used to determine the specific activity of ¹⁴C in soil and vegetation. To explore the ¹⁴C content in the air, the method of bubbling air through a TASC-HT-HTO-C-14 flow meter-sampler (Overhoff technology, USA) and the method of air conditioning through a Ballu BDH-15L air dryer (Ballu, Russia) were used. To prepare counting samples from selected soil and food samples, a method based on the

combustion of selected samples in a Pyrolyser-6 Trio catalytic decomposition system was used. All prepared counting samples, including samples from surface water and biosubstrate of the personnel of the Kursk NPP and the population, were measured by liquid scintillation spectrometry on a Tri-Carb 3180 TR/SL alpha, beta spectrometer.

<u>Results:</u> On the basis of an integrated approach to assessing the content of ¹⁴C in air, water, soil and food, an analysis of the formation of environmental pollution due to emissions and discharges ¹⁴C from the Kurskaya NPP was carried out.

Conclusions: An increased content of the ¹⁴C radionuclide in soil samples, food products and vegetation in the area of the Kursk NPP with RBMK-1000 nuclear reactors is shown, both in comparison with the content of natural ¹⁴C and NPPs operating BN-600,800 and VVER-1000 nuclear reactors. The necessity of taking into account radiocarbon emissions from NPPs into the environment in the problem of optimizing the radiation protection of the population under the conditions of normal operation of NPPs is confirmed.

Keywords: radiocarbon, radiocarbon in soil, radiocarbon in vegetation, emission of radiocarbon, nuclear power plant

For citation: Barchukov VG, Kochetkov OA, Klochkov VN, Eremina NA, Surin PP, Maximov AA, Kabanov DI, Velichko VK, Bogdanenko NA, Alsagaev ZhI. Distribution of Radiocarbon in the Environment under Normal Conditions of Operating of Kurskaya Nuclear Power Plant. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(1):25–33. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33

Введение

Углерод играет важнейшую роль во всех формах жизни и участвует в большинстве биогеохимических процессов на Земле, являясь структурной основой всей органической материи: содержание углерода в молекулах белков составляет около 52 %, в молекулах ДНК и РНК – около 37 % [1].

Среди 13 радиоактивных изотопов углерода наибольший интерес с точки зрения радиационной опасности представляет долгоживущий изотоп 14 С с периодом полураспада 5760 лет. Максимальная величина периода полураспада других изотопов составляет примерно 20 мин. 14 С образуется в природе естественным путем в результате взаимодействия нейтронов космического происхождения с земной атмосферой, а именно с атомами азота в стратосфере и в верхней тропосфере по реакции (14 N + $n \rightarrow ^{14}$ C + p) [1, 2].

В 1950–1960-х гг. 20-го века появился новый, искусственный источник образования ¹⁴С – ядерные взрывы, которые привели к тому, что содержание ¹⁴С в биосфере, в том числе в живых организмах, удвоилось. Значительный рост содержания ¹⁴С в живых организмах актуализировал вопрос о возможных опасных последствиях, в том числе и об отдаленных, влияющих на многие поколения людей. Это связано с тем, что ¹⁴С, попадая в организм путем ингаляции или с пищей, концентрируется в различных тканях, включается в состав жиров, углеводов, молекул белков и генетических структур, и является источником внутреннего облучения. Именно поэтому вопрос контроля содержания ¹⁴С является важным и актуальным.

После прекращения ядерных испытаний основным источником техногенного ¹⁴С является атомная энергетика. ¹⁴C образуется в активной зоне ядерных реакторов любого типа, где существуют мощные потоки нейтронов, которые взаимодействуют с материалами конструкций реактора, с веществом теплоносителя, замедлителя, топлива и имеющимися в них примесями по реакциям: 14 N $(n, p)^{14}$ С; 17 O $(n, \alpha)^{14}$ С; 13 C $(n, \gamma)^{14}$ С; 235 U $(n, f)^{14}$ С (тройное деление урана-235 в топливе) [2]. Непрерывный рост суммарной мощности работающих АЭС приводит к значительному увеличению количества ¹⁴С, выбрасываемого в нижние слои атмосферы, поверхностные воды или накапливаемого внутри ядерных реакторов АЭС. При этом эффективное улавливание и захоронение ¹⁴С, обладающего большим периодом полураспада, - очень трудоемкое мероприятие. Образовавшийся в активной зоне ¹⁴С выделяется из теплоносителя первого контура в газообразной форме в виде диоксида углерода (СО₂), оксида углерода (СО), метана (СН₄) и в конечном итоге выбрасывается через систему вентиляции [3]. Возможен выход ¹⁴С в окружающую среду в составе сбросов в виде растворенного в воде диоксида углерода или в виде растворенных карбонатов. Однако исследования специалистов Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) показывают, что наибольший вклад в облучение населения, проживающего в районе расположения объектов атомной энергетики, создается за счет ¹⁴С, содержащегося в газоаэрозольных выбросах атомных станций [4].

Годовой удельный выброс ¹⁴С на единицу произведенной энергии различен для АЭС с разными типами реакторных установок. По этому показателю АЭС располагаются в следующей последовательности: GCR > AGR > LWGR (PБМК) > BWR > PHWR > PWR (BBЭP) [5,6].

В настоящее время на территории Российской Федерации в 11 АЭС эксплуатируются 38 энергоблоков с реакторами типа ВВЭР, РБМК, БН и другими. ЯР ВВЭР аналогичны соответствующим типам зарубежных реакторов (PWR и BWR) по скорости генерации ¹⁴С и его выходу в окружающую среду. Реакторы РБМК аналогичны зарубежным канальным реакторам LWGR. Их основная особенность — наличие большого количества азота в активной зоне, используемого в смеси с гелием для охлаждения замедлителя, и большой массы углерода в материале самого замедлителя — графите. Это приводит к скорости генерации ¹⁴С, на порядок большей, чем в реакторах типа ВВЭР [7]. Значения поступления в атмосферу ¹⁴С с газоаэрозольными выбросами и удельная активность ¹⁴С в приземном слое для различных АЭС РФ представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Значения поступления в атмосферу ¹⁴С с газоаэрозольными выбросами и удельная активность ¹⁴С в приземном слое для различных АЭС РФ

Values of ¹⁴C entering the atmosphere with gas-aerosol emissions and specific activity of ¹⁴C in the surface layer for various NPPs of the Russian Federation

АЭС	Тип ЯР	Выброс ¹⁴ С, Бк/с	Удельная активность 14 С в приземном слое, $\overline{\text{Бк/м}}^3$
Нововоронежская	ВВЭР-1000	3,4.104	2,0.10-3
Кольская	ВВЭР-440	4,0.104	2,4·10-3
Балаковская	ВВЭР-1000	6,6.104	4,0.10-3
Калининская	ВВЭР-1000	1,4.104	0,8:10-3
Ростовская	ВВЭР-1000	0,9.104	0,57·10-3
Курская	РБМК-1000	88.104	53·10-3
Смоленская	РБМК-1000	26.104	16.10-3
Ленинградская	РБМК-1000	23.104	14.10-3
Белоярская	БН-600,800	0,9.104	54·10-3
Билибинская	ЭГП-6	3,2.104	1,9·10-3

Из табл. 1 видно, что наибольшее значение выброса и удельной активности в приземном слое ¹⁴С отмечается на Курской АЭС с ЯР РБМК-1000. При этом работа по

повышению уровня радиационного контроля выбросов трития и радионуклида ¹⁴С в окружающую среду ведется на Курской АЭС только с 2015 г. [9].

Время пребывания в организме 14С, поступившего с пищевыми продуктами, значительно больше (от нескольких часов пребывания его в лейкоцитах до нескольких лет в костной ткани), чем поступившего воздушным путем [1]. Из этого следует, что наиболее актуальной является задача определения удельной активности радионуклида ¹⁴С в растительности, пищевых продуктах и почве в районе расположения атомных станций, где эти продукты были выращены. Однако для получения полной картины распределения и накопления ¹⁴С в окружающей среде вокруг АЭС важно оценить его содержание также в пробах воздуха и поверхностных вод как на территории промплощадки АЭС, так и в районе ее расположения, а для оценки влияния ¹⁴С на организм человека провести исследование содержания 14С в пробах биосубстрата персонала АЭС и населения.

Таким образом, целью настоящей работы стали исследования по оценке содержания радиоуглерода в объектах окружающей среды в районе расположения Курской АЭС. Помимо этого результаты измерения активности ¹⁴С в пробах, отобранных в районе Курской АЭС, сравнивались с результатами измерения активности ¹⁴С в пробах, отобранных в районе Белоярской АЭС (в 2015 г.) и Калининской АЭС (в 2018 г.), эксплуатирующих ЯР БН и ВВЭР соответственно.

Материал и методы исследования

Для получения картины распределения и накопления в окружающей среде ¹⁴С, поступающего с АЭС, в сентябре 2021 г. были проведены натурные исследования на Курской АЭС, эксплуатирующей реакторы РБМК-1000. В ходе исследований были отобраны пробы воздуха, воды из поверхностных водоемов, скважин на территории промплощадки АЭС, а также пробы воздуха, поверхностных вод, воды из скважин, почвы и пищевых продуктов в населенных пунктах в районе расположения Курской АЭС. Помимо этого, взяты биопробы (моча) у персонала Курской АЭС и у жителей населенных пунктов, расположенных вблизи АЭС.

За счет высокой подвижности ¹⁴С локальные очаги загрязнения могут оказаться как вблизи АЭС на рассто-

янии 1-2 км от ее вентиляционной трубы, так и в почве и растениях, находящихся от АЭС на расстоянии 20-30 км, за счет переноса воздушных масс [10]. В связи с этим пробы отбирались в населенных пунктах вокруг АЭС в пределах зоны наблюдения: на расстоянии от 1 до 12 км от АЭС по прямой.

При разработке плана работ в населенных пунктах учитывалась и роза ветров в районе расположения Курской АЭС (рис. 1) [11].

Населенные пункты и предприятия, в которых проводился отбор проб, представлены на рис. 2.

Из рис. 1 и 2 видно, что в течение года в районе расположения Курской АЭС преобладают ветры западного, восточного и южного направлений: роза ветров направлена на Восток (в сторону с. Успенка, с. Мосолово), на Запад (в сторону с. Макаровка) и на Север (в сторону с. Дроняево). По остальным направлениям роза ветров направлена практически одинаково.

Отбор проб и подготовка счетных образцов из отобранных проб осуществлялись на основе разработанных в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России методических указаний:

- 1) «Методика определения концентрации органических и неорганических соединений трития в воздухе окружающей среды и производственных помещений» (МУК 4.3.047–2017) [12].
- «Методика определения удельной активности радионуклида ¹⁴С в почве и растительности» (Свидетельство об аттестации № 04-22/4.RA.RU.311295-2022).
- «Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии» (МУК 4.3.044 – 2012) [13].

Для определения объемной активности ¹⁴С в воздухе был использован расходомер-пробоотборник TASC-HT-HTO-C14 (Overhoff Technology Corporation, США), позволяющий одновременно производить отбор воздуха для определения содержания трития и радиоуглерода [14]. Внешний вид панели отбора ¹⁴С расходомера-пробоотборника TASCHT-HTO-C14 представлен на рис. 3.

Через шланги воздуховода проба поступает на панель пробоотбора радионуклида ¹⁴С и проходит через четыре колонки (1), содержащие осушитель Drierite для полного удаления влаги в образце, и далее через картридж, содержащий абсорбирующий материал Ascarite (смесь ги-

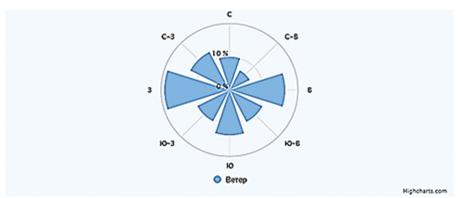


График ветра (направление - откуда дует ветер) в Курчатове

С ∀ Северный	C-B ▲ Cesepo-8o	В ≺ Восточный	Ю-В ⊁ Юго-Восто		Ю-3 ⊀ Юго-Запад	3 ≻ Западный	C-3 ▲ Cesepo-3a
10%	6.6%	16.3%	10.8%	13.7%	10.6%	19.1%	12.9%

Рис. 1. Роза ветров в г. Курчатове в 2021 г.

Fig.1. Annual wind rose (Kurchatov, 2021)

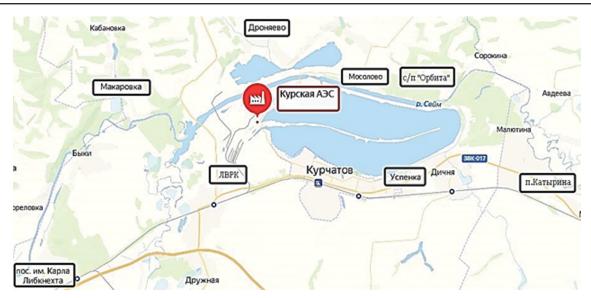


Рис. 2. Расположение населенных пунктов вокруг Курской АЭС Fig.2. Location of settlements around the Kursk NPP

дроксида натрия на инертном носителе кремнезема) (2), в котором углекислый газ превращается в карбонат натрия.



Рис. 3. Панель пробоотбора $^{14}{\rm C}$ расходомера-пробоотборника TASC-HT-HTO-C14

Fig.3. TASC-HT-HTO-C14 14C sampling panel

Измерение объемной активности ¹⁴С в отобранных пробах воздуха осуществлялось после извлечения ¹⁴С из картриджей с Ascarite на установке десорбции углерода. Схема установки десорбции ¹⁴С приведена на рис. 4.

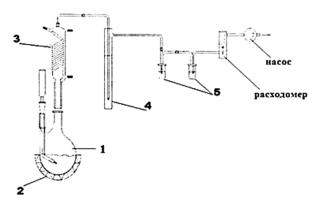


Рис. 4. Схема установки извлечения (десорбции) ¹⁴C, накопленного в картридже с Ascarite

Fig.4. Diagram of the setup for the extraction of ¹⁴C accumulated in the cartridge with Ascarite

Картридж с отобранной пробой воздуха снимается с пробоотборника и помещается в колбу (1), содержащую 500 мл дистиллята и 20 мл концентрированной азотной кислоты, нагревается с помощью нагревателя (2) в течение 2–3 ч и окисляется с выделением углекислого газа:

$$Na_2CO_3 + 2HNO_3 = 2NaNO_3 + H_2O + CO_2$$

Выделившийся углекислый газ проходит через конденсатор (3), промывается раствором 0,6N HCl в скруббере (4) и поглощается в коктейле-абсорбенте для улавливания углерода CarbonTrap в двух виалах (5). Содержимое виал смешивается с жидкосцинтилляционным коктейлем для измерения на жидкостном сцинтилляционном альфа — бета спектрометре Tri-Carb в соответствии с [15].

Также для сравнения пробы воздуха отбирались методом конденсации влаги из воздуха с помощью осушителя воздуха Ballu BDH-15L (Россия). Отбор проб воздуха с помощью расходомера-пробоотборника TASC-HT-HTO-C14 осуществлялся в течение 24 ч в каждой точке, а с помощью осушителя воздуха Ballu BDH-15L – в течение 3–4 ч.

Пробы почвы, растительности и пищевых продуктов отбирались в каждом населенном пункте в 5 удаленных друг от друга точках для получения обширной репрезентативной картины распределения и накопления радионуклида ¹⁴С в окружающей среде в районе Курской АЭС. Пробы почвы отбирались из верхнего (0–5 см) горизонта, в котором накапливается максимальная концентрация загрязняющих веществ, поступающих из приземных слоев атмосферы.

В качестве проб растительности была исследована хвоя ели, так как ель благодаря длительному (более одного года) периоду обновления хвойного покрова способна накапливать радиоуглерод в течение долгого времени, большего, чем вегетационный период подземных и наземных плодов.

В качестве проб пищевых продуктов были исследованы картофель и яблоки с целью оценки накопления радиоуглерода в подземных и наземных плодах.

Для оценки вклада ¹⁴С в эффективную дозу внутреннего облучения населения и персонала при работе АЭС были отобраны пробы биосубстрата (моча) персонала Курской АЭС, а также населения города Курчатов: 19 проб биосубстрата персонала, 74 пробы биосубтрата населения.

Тип и количество отобранных проб на Курской АЭС представлены в табл. 2.

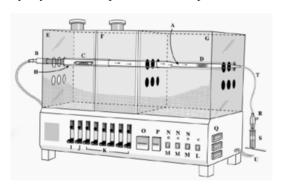
Таблица 2

Тип и количество проб, отобранных на промплощадке Курской АЭС и в населенных пунктах в районе расположения АЭС

Type and number of samples taken at the industrial site of the Kursk NPP and in settlements in the vicinity of the NPP

№	Тип пробы	Место отбора	
		Промплощадка КуАЭС/ персонал	ОС/ население
1	Вода	19	15
2	Воздух	8	12
3	почва	16	25
4	Хвоя ели	4	13
5	Картофель	-	15
6	Яблоко	-	17
7	Сливы	_	2
8	Биосубстрат (моча)	19	74

Измерение удельной активности ¹⁴С в счетных образцах, подготовленных из отобранных проб почвы, растительности и пищевых продуктов, осуществлялось после предварительной пробоподготовки на основе сжигания проб в кислороде в системе каталитического разложения Pyrolyser-6 Trio. Данный метод пробоподготовки позволяет улавливать до 95 % ¹⁴С [16]. Схема устройства прибора Pyrolyser-6 Trio представлена на рис. 5.



Puc. 5. Схема устройства Pyrolyser-6 Trio Fig. 5. Diagram of the Pyrolyser-6 Trio device

Принцип работы Pyrolyser-6 Trio заключается в том, что навески пробы помещаются в лодочки из кварцевого стекла, которые помещаются внутри кварцевой рабочей трубки в центр зоны загрузки пробы. Воздух пропускается через навески проб, которые постепенно нагреваются до максимальной температуры. В зоне каталитического разложения продукты сгорания проб пропускаются через платино-глиноземный катализатор, нагретый до 900 °С, при этом все ионы ¹⁴С окисляются до диоксида углерода, который улавливается в ловушках с коктейлем-сорбентом CarbonTrap (или его аналогом Carbo-Sorb E, также можно использовать раствор 1М NaOH). Из полученных в ловушках растворов готовят счетные образцы путем смешения 10 мл сцинтилляционного коктейля и 5 мл раствора.

Измерение активности ¹⁴С в счетных образцах, подготовленных из всех отобранных проб после предварительной пробоподготовки, выполнялись методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС) на жидкостном сцинтилляционном спектрометре Tri-Carb 3180 TR/SL.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения содержания ¹⁴С в пробах воздуха представлены в табл. 3.

Таблица 3

Объемная активность ¹⁴С в пробах воздуха в районе расположения Курской АЭС

Volumetric activity of ¹⁴C in air samples in the area of the Kursk NPP

volumetrie uetviey of a main sumpress in the area of the fault in the							
M	Расстояние	Объемная активность ${}^{14}\mathrm{C},$ Бк/м 3					
Место отбора	до АЭС, км	Осушитель воздуха	Overhoff				
БЩУ-1		$1 \pm 0,1$	< МДА				
опер.ЦЗ-4		$2 \pm 0,3$	< МДА				
опер.ЦЗ-1	Промплощадка АЭС	5 ± 0.7	< МДА				
БЩУ-4		7 ± 1	< МДА				
ЛВРК		$1 \pm 0,1$	< МДА				
с. Успенка	7,6 на В	0.5 ± 0.1	< МДА				
с/п Орбита	7,6 на С-В	$1 \pm 0,1$	< МДА				
с. Дроняево	4 на С	21 ± 3	< МДА				
с. Макаровка	5,5 на 3	16 ± 2	< МДА				
г. Курчатов	2 на В	$1 \pm 0,1$	< МДА				

Примечание: МДА = 0,1 Бк/м³ –минимальная детектируемая активность 14 С в пробах воздуха

Как видно из табл. 3, значения объемной активности 14 С в пробах воздуха, отобранных на территории промплощадки Курской АЭС, оказались в диапазоне $1\div7$ Бк/м³ (в среднем на уровне 3 Бк/м³), что значительно меньше допустимой среднегодовой объемной активности воздуха, равной 55 Бк/м³, установленной в НРБ-99/2009.

Значения объемной активности ¹⁴С в пробах воздуха, отобранных в районе расположения АЭС в населенных пунктах Северо-восточного и Юго-восточного направлений (Успенка, Орбита, Курчатов), оказались в среднем на уровне 1 Бк/м³. Однако в населенных пунктах Северо-западного направления (с. Макаровка, с. Дроняево) значения оказались наибольшими — 16 и 21 Бк/м³ соответственно.

При этом объемная активность 14 С в воздухе в районе Курской АЭС оказалась на 1-2 порядка больше, чем в районе Белоярской и Калининской АЭС, эксплуатирующих ЯР БН и ВВЭЭР соответственно (в среднем на Белоярской АЭС – <МДА, Калининская АЭС – 0,1 Бк/м 3).

Результаты измерения содержания ¹⁴С в пробах поверхностных вод представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что значения объемной активности $^{14}\mathrm{C}$ в пробах поверхностных вод , отобранных на промплощадке АЭС, оказались в среднем на уровне 6 Бк/л, а в окружающей среде в районе расположения станции – 7,5 Бк/л. При этом максимальное значение объемной активности $^{14}\mathrm{C}$ отмечено в пробах воды из скважин в с. Дроняево – 12 Бк/л. Объемная активность $^{14}\mathrm{C}$ в пробах поверхностных вод в районе расположения Курской, Белоярской и Калининской АЭС оказалась практически на одном уровне, в среднем 7 Бк/л.

В табл. 5 приведены медианные значения удельной активности 14 С в отобранных пробах почвы, растительности и пищевых продуктов для всех населенных пунктов, в которых проводился отбор проб, а также медианные значения удельной активности 14 С для каждого типа проб. Погрешность медианных значений была рассчитана с помощью коэффициента Стьюдента в силу малого числа измерений для каждого типа проб (n=3...5).

Медианные значения для каждого типа проб в каждом населенном пункте, где проводился отбор проб, представлены на рис. 6.

Таблица 4
Объемная активность ¹⁴С в пробах поверхностных вод в районе расположения Курской АЭС
Volumetric activity of ¹⁴C in surface water samples in the area of the Kursk NPP

Место отбора	Расстояние до АЭС, км	Объемная активность ¹⁴ С, Бк/л
скважина 1		2 ± 0,3
скважина 2		7 ± 1
скважина 3		7 ± 1
скважина 4		4 ± 0,6
скважина 5		6 ± 1
скважина 6	Промпло-	$4 \pm 0,6$
скважина 7	щадка АЭС	8 ± 1
скважина 8		8 ± 1
скважина 9		6 ± 1
скважина 10		9 ± 1,5
скважина 11		8 ± 1
скважина 12		5 ± 0.8
скважина 13		$4 \pm 0,6$
скважина 14		7 ± 1
скважина 15		6 ± 1
скважина 16	Промпло- щадка АЭС	8 ± 1
пруд-охладитель	надка 710 с	5 ± 0,8
отводной канал		6 ± 1
подводной канал		$10 \pm 1,5$
ЛВРК, водопровод	2,5 на Ю	6 ± 1
с. Успенка, вода из скваж. Т.2	7.6 D	7 ± 1
с. Успенка, вода из скваж. Т.1	7,6 на В	7 ± 1
с/п «Орбита», водопровод	7,6 на С-В	5 ± 0.8
с. Макаровка, скваж. т. 1	5,5 на 3	5 ± 0.8
с. Макаровка, скваж, т. 3	5,5 на 5	9 ± 1,5
р. Сейм, д. Катырина	14 на В	5 ± 0.8
р.Сейм, р.п. им. К. Либкнехта	14 на Б	8 ± 1
д. Мосолово, скваж, т. 1		8 ± 1
д. Мосолово, скваж, т. 2	5,6 на С-В	5 ± 0,8
д. Мосолово, скваж, т. 3		9 ± 1,5
р. Сейм, Орбита	7,6 на С-В	7 ± 1
с.Дроняево, т.2, скваж		12 ± 2
с.Дроняево, т.3, скваж	4 на С	6 ± 1
с.Дроняево, т.4, скваж		12 ± 2

Из рис. 6 и табл. 5 видно, что измеренная удельная активность ¹⁴С в отобранных пробах каждого типа по всем пунктам отбора оказалась примерно на одном уровне. Это можно объяснить тем, что роза ветров в районе г. Курчатова в течение года распределена практически равномерно. Исключением является юго-западное направление, где доля северо-восточного ветра составляет 6,6 %. В юго-западном направлении от Курской АЭС расположены пункты отбора: лаборатория внешнего радиационного контроля (ЛВРК) и п. им. К. Либкнехта, где значения удельной активности ¹⁴С для проб почвы, хвои ели и фруктов оказались одними из наименьших: 50, 55 Бк/кг для почвы, 150 Бк/ кг для хвои ели, 55 Бк/кг для фруктов. В с. Дроняево значения активности ¹⁴С в пробах почвы и пищевых продуктов оказались одними из наибольших. Таким образом, в с. Дроняево активность ¹⁴С во всех типах отобранных проб оказалась наибольшей, что согласуется с данными отдела радиационной безопасности Курской АЭС.

В табл. 6 представлены медианные значения удельной активности ¹⁴С в пробах, отобранных в районе рас-

Таблица 5

Медианные значения удельной активности ¹⁴С в пробах почвы, растительности и пищевых продуктов Median values of the ¹⁴C specific activity in soil, vegetation and food samples

vegetation and food samples						
Населенный пункт	Расстояние от АЭС, км	Медианное значение уд. активности ¹⁴ С, Бк/кг для проб:				
		почвы	хвои ели	наземных частей растений	корне- плодов	
Пром- площадка Курской АЭС	_	70 ± 20	150	-	-	
ЛВРК	2,5 на юг	55	150	55	_	
с. Дроняево	4 на север	90 ± 50	140 ± 40	170 ± 125	115 ± 40	
с. Макаровка	5,5 на запад	50 ± 15	190 ± 30	100	70 ± 40	
с. Мосолово	5,6 на с-в	75 ± 30	200 ± 60	80 ± 44	60 ± 50	
с. Успенка	7,6 на в	45 ± 13	230 ± 130	155 ± 40	120	
с/п «Орбита»	7,6 на с-в	60	270	-	_	
р.п. им. К. Либкнехта	10	50 ± 15	-	-	_	
д. Катырина	12	40 ± 7	_	_	_	
Медианное значение удельной активности ¹⁴ С по всем населенным пунктам, Бк/кг		55 ± 13	190 ± 45	100 ± 60	90 ± 45	

Примечание: Погрешность медианного значения не указана для единичных измерений. Значения удельной активности ¹⁴С в случае единичного измерения типа пробы приведены для наглядности

Таблица 6

Медианные значения удельной активности ¹⁴С в пробах, отобранных в районе расположения Курской АЭС, содержание естественного ¹⁴С в некоторых пищевых продуктах и оценка вклада техногенного ¹⁴С

Median values of the specific activity of $^{14}\mathrm{C}$ in samples taken in the area of the Kursk NPP, the content of natural $^{14}\mathrm{C}$ in some food products and the assessment of the contribution of technogenic $^{14}\mathrm{C}$

Тип пробы	Содер- жание угле-	Содержание естественного ¹⁴ С		Удельная активность ¹⁴ С, Бк/кг	Удельная активность техногенного
	рода, %	Бк/кг	Бк/кгС	(Курская АЭС)	¹⁴ С, Бк/кг (Курская АЭС)
Почва	2	5	227	55	50
Хвоя ели	37	84	227	190	106
Картофель	9,5	22	227	90	68
Фрукты	5,2	12	227	100	88

положения Курской АЭС, содержание естественного 14 С в пробах [2,17], а также оценка вклада техногенного 14 С.

Медианные значения удельной активности ¹⁴С для проб хвои ели в каждом пункте отбора оказались наибольшими относительно других типов проб (почва, наземные и подземные части растений). Это подтверждает наше предположение, что ель благодаря длительному (более одного года) периоду обновления хвойного покрова способна накапливать ¹⁴С в течение долгого времени, большего, чем вегетационный период наземных и подземных плодов. Полученные результаты также подтверждают литературные данные [2] о том, что в растительности в зоне распространения выбросов ядерных реакторов наблюдается повышенное содержание ¹⁴С.

Из табл. 6 видно, что значения удельной активности ¹⁴С во всех типах проб, отобранных в районе расположения Курской АЭС, оказались больше значения содержания естественного ¹⁴С в соответствующих типах проб. Это демонстрирует наличие вклада техногенного ¹⁴С, образующегося при работе АЭС, в формирование

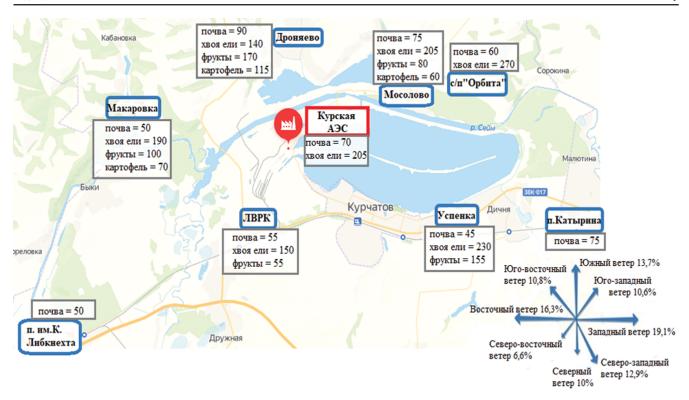


Рис. 6. Медианные значения удельной активности углерода-14 для каждого пункта отбора проб, Бк/кг Fig. 6. Median values of ¹⁴C specific activity for each sampling point, Bq/kg

загрязнения окружающей среды в районе расположения станции.

Значения удельной активности ¹⁴С в пробах почвы, растительности и пищевых продуктов в районе расположения Курской АЭС оказались больше значений удельной активности ¹⁴С почвы и пищевых продуктов Белоярской и Калининской АЭС.

Предварительная консервативная оценка годового поступления 14 С для населения за счет потребления картофеля и фруктов, выращенных в районе Курской АЭС, составляет $2\cdot10^4$ Бк/год, что на порядок меньше значения предела годового поступления 14 С для населения, регламентированного в HPБ-99/2009 — $6.3\cdot10^5$ Бк/год.

Объемная активность ¹⁴С в биосубстрате (моче) персонала Курской АЭС и населения, проживающего в районе расположения станции, оказалась примерно на одном уровне: среднее значение объемной активности и для персонала станции и для населения составило 50 Бк/л. Из этого вывода можно предположить, что путь поступления радионуклида ¹⁴С у персонала АЭС и населения один и тот же. Согласно [2], таким путем поступления является поступление ¹⁴С в организм человека с пищевыми продуктами местного производства.

Значения объемной активности ¹⁴С в моче персонала Курской АЭС и населения оказались больше, чем у персонала Белоярской АЭС, Калининской АЭС и населения, проживающего в районе этих станций: 50 Бк/л – Курская АЭС, 4,5 Бк/л – Калининская АЭС, 24 Бк/л у населения и 29 Бк/л у персонала – Белоярская АЭС. Значения объемной активности ¹⁴С в моче персонала и населения, живущего в районе Белоярской АЭС, оказались близки к значениям объемной активности ¹⁴С в моче персонала и населения, живущего в районе Курской АЭС. Это может быть объяснено тем, что на Белоярской АЭС до 1983 и 1990 гг. эксплуатировались водографитовые канальные ядерные реакторы АМБ-100 и АМБ-200 соответственно. Величина выброса ¹⁴С при эксплуатации данных реакто-

ров была сопоставима и даже больше, чем при эксплуатации реактора РБМК-1000: $5,4\div11,5$ ТБк/(ГВтэ·год) для АМБ-100,200 и 4,8ТБк/(ГВтэ·год) для РБМК-1000.

В табл. 7 представлены результаты оценки вклада в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения от перорального поступления радионуклида ¹⁴С с пищевыми продуктами для населения, проживающего в районе расположения Курской, Белоярской и Калининской АЭС, рассчитанные по значениям удельной активности ¹⁴С в пищевых продуктах (корнеплодах и наземных плоды растений: яблоки, слива и т.п.), отобранных специалистами ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в ходе натурных исследований

Таблица 7

Вклад в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения от перорального поступления радионуклида ¹⁴С с пищевыми продуктами для населения, проживающего в районе расположения Курской, Белоярской и Калининской АЭС Contribution to the committed effective dose of internal exposure

Contribution to the committed effective dose of internal exposure from oral intake of ¹⁴C radionuclide with food for the population living in the area of the Kursk, Beloyarsk and Kalinin NPPs

	_		
№	Населенный пункт	АЭС (Тип ЯР)	Средняя доза от поступления ¹⁴ С, мкЗв/год
1	Дроняево	Курская (РБМК-1000)	17 ± 5
2	Макаровка	Курская (РБМК-1000)	$4,7 \pm 1,4$
3	Мосолово	Курская (РБМК-1000)	5,4 ± 1,6
4	Успенка	Курская (РБМК-1000)	14 ± 4
5	Белоярская	БН-800	2 ± 1
6	Калининская	BBЭP-1000	$0,1 \pm 0,05$

В табл. 8 представлены оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения персонала Курской, Белоярской, Калининской и Балаковской АЭС и населения, проживающего в районе расположения этих станций, рассчитанные по значениям удельной активности ¹⁴С в моче.

Таблииа 8

Оценки ожидаемой эффективной дозы от перорального поступления ¹⁴С с пищевыми продуктами для населения, проживающего в районе Курской, Белоярской и Калининской АЭС

Estimates of the committed effective dose from oral intake of ¹⁴C with food for the population living in the area of Kursk, Beloyarsk and Kalinin NPPs

№	АЭС	Тип ЯР	Средняя доза от поступления ¹⁴ С, мкЗв/год	
			Персонал	Население
1	Курская	РБМК-1000	14 ± 1	14 ± 1
2	Белоярская	БН-800	$8 \pm 0,5$	$6,5 \pm 0,4$
3	Балаковская	ВВЭР-1000	9 ± 0.7	9 ± 0.7
4	Калининская	ВВЭР-1000	$1,2 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$

Результаты, представленные в таблицах 7–8, подтверждают литературные данные [2] о том, что наибольшие дозовые нагрузки могут получить жители, проживающие в районах размещения АЭС с ядерным реактором типа РМБК-1000, в связи с наибольшими выбросами ¹⁴С с АЭС с данным типом ядерного реактора.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что в районе расположения Курской АЭС, эксплуатирующей ядерные реакторы РБМК-1000, формируется содержание радио-

нуклида ¹⁴С большее, чем в районе расположения АЭС, эксплуатирующих реакторы другого типа – БН и ВВЭР. Это создает большую дозовую нагрузку на персонал и население за счет поступления ¹⁴С в организм с пищевыми продуктами. Полученные результаты подтверждают литературные данные – как зарубежные [4], так и отечественные [2] – о том, что наибольшие дозовые нагрузки могут получить жители, проживающие в районах размещения АЭС с ядерным реактором типа РМБК-1000, в связи с наибольшими выбросами ¹⁴С с АЭС с данным типом ядерного реактора.

Однако при расчете ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от перорального поступления радионуклида ¹⁴С с пищевыми продуктами для населения, проживающего в районе расположения атомных станций, были учтены только две составляющие пищевой корзины населения — корнеплоды и фрукты. Для получения более репрезентативной картины формирования ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от перорального поступления радионуклида ¹⁴С необходимо провести дополнительные исследования с отбором проб пищевых продуктов каждого типа (молоко, мясо и др.) из среднестатистической пищевой корзины населения, проживающего в конкретном районе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1. Рублевский В.П., Яценко В.Н. Особенности радиационного и биологического действия ¹⁴С на живые организмы и опасность его накопления в биосфере Земли // Атомная энергия. 2018. Т.12, № 5. С. 301–306.
- Рублевский В.П., Яценко В.Н., Чанышев Е.Г. Роль углерода-14 в техногенном облучении человека / Под ред. Кочеткова О.А. М.: ИздАТ, 2004. 197 с. ISBN 5-86656-160-3.14.
- 3. Radionuclide Fact Sheet. Carbon-14 and the Environment. IRSN, 2010. 19 p. URL: www.irsn.fr.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation // Report to the General Assembly UNSCEAR. V.1: Sources. New York: United Nations, 2000.
- Назаров Е.И., Екидин А.А., Васильев А.В. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т.61, № 12–2. С. 67–73.
- 6. Екидин А.А., Жуковский М.В., Васянович М.Е. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС // Атомная энергия. 2016. Т.120, № 2. С. 106–108.
- Крышев А.И., Крышев И.И., Васянович М.Е. и др. Оценка дозы облучения населения от выброса 14С АЭС с РБМК-1000 и ЭГП-6 // Атомная энергия. 2020. Т.128, № 1. С. 48-52.
- 8. Панченко С.В., Линге И.И. и др. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под ред. Линге И.И., Крышева И.И. М.: САМ полиграфист. 2015. С. 296.

- Отчет об экологической безопасности за 2015 год. Росэнергоатом, Курская АЭС. URL: http://фцп-ярб2030.pф/upload/ iblock/4a2/4a2288b0372c09ebf0a78d5c47718105.pdf.
- Vay S.A., Tyler S.C., Choi Y., Blake D.R., Blake N.J., Sachse G.W., Diskin G.S., Singh H.B. Sources and Transport of C-14 in CO2 Within the Mexico City Basin and Vicinity // Atmos. Chem. Phys. 2009. No. 9. P. 4973–4985.
- 11. URL: https://world-weather.ru/archive/russia/kurchatov/.
- Методика определения концентрации органических и неорганических соединений трития в воздухе окружающей среды и производственных помещений: Методические указания по методам контроля. МУК 4.3.047 – 2017. М., 2017.
- Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии: Методические указания по методам контроля. МУК 4.3.044 -2012. М., 2012.
- 14. Выполнение измерений при радиационном контроле трития и углерода-14 в помещениях АЭС с применением расходомера-пробоотборника TASC-HT-HTO-C14 (МВК): Методика МТ 1.2.1.15.002. 0238-2014.
- 15. Руководство пользования прибором Tri-Carb 3180 TR/SL.
- 16. Руководство пользования прибором Pyrolyser-6 Trio.
- 17. Щепащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2, с.125.

REFERENCES

- Rublevskiy V.P., Yatsenko V.N. Features of the Radiation and Biological Effects of ¹⁴C on Living Organisms and the Danger of its Accumulation in the Earth's Biosphere. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 2018;12;5:301–306 (In Russ.).
- Rublevskiy V.P., Yatsenko V.N., Chanyshev E. Rol Ugleroda-14
 v Tekhnogennom Obluchenii Cheloveka = The Role of
 Carbon-14 in Human Technogenic Exposure. Ed. Kochetkov
 O.A. Moscow, IzdAT Publ., 2004. 197 p. ISBN 5-86656-160 3.14 (In Russ.).
- 3. Radionuclide Fact Sheet. Carbon-14 and the Environment. IRSN, 2010. 19 p. URL: www.irsn.fr.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly UNSCEAR. 2000. V.1. Sources. New York, United Nations, 2000.
- Nazarov E.I., Yekidin A.A., Vasilyev A.V. Assessment of the Atmospheric Carbon-14 Caused By Npp Emissions. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedeniy. Fizika*. 2018;61;12–2:67–73 (In Russ.).
- 6. Yekidin A.A., Zhukovskiy M.V., Vasyanovich M.E. Identification of the Main Dose-Forming Radionuclides in NPP Emissions. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 2016;120;2:106-108 (In Russ.).

- 7. Kryshev A.I., Kryshev I.I., Vasyanovich M.E., et al. Assessment of Public Exposure Dose from 14C Release from NPPs with RBMK-1000 and EGP-6. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 2020;128;1:48-52 (In Russ.).
- 8. Panchenko S.V., Linge I.I., et al. *Radioekologicheskaya Obstanovka v Regionakh Raspolozheniya Predpriyatiy Rosatoma* = Radioecological Situation in the Regions Where Rosatom Enterprises Are Located. Ed. Linge I.I., Kryshev I.I. Moscow, Sam Poligrafist Publ., 2015. P. 296 (In Russ.).
- 9. Environmental Safety Report 2015. Rosenergoatom, Kursk NPP. URL: http://фцп-ярб2030.pф/upload/iblock/4a2/4a2288 b0372c09ebf0a78d5c47718105.pdf (In Russ.).
- Vay S.A., Tyler S.C., Choi Y., Blake D.R., Blake N.J., Sachse G.W., Diskin G.S., Singh H.B. Sources and Transport of C-14 in CO2 Within the Mexico City Basin and Vicinity. Atmos. Chem. Phys. 2009;9:4973–4985.
- 11. URL: https://world-weather.ru/archive/russia/kurchatov/ (In Russ.).
- 12. Metodika Opredeleniya Kontsentratsii Organicheskikh i Neorganicheskikh Soyedineniy Tritiya v Vozdukhe Okruzhayushchey Sredy i Proizvodstvennykh Pomeshcheniy = Method for Determining the Concentration of Organic and

- Inorganic Tritium Compounds in the Air of the Environment and Industrial Premises. Guidelines for Control Methods. MUK 4.3.047 -2017. Moscow Publ., 2017 (In Russ.).
- 13. Metodika Opredeleniya Obyemnoy Aktivnosti Organicheskikh i Neorganicheskikh Soyedineniy Tritiya v Vodnykh Obyektakh Metodom Zhidkostsintillyatsionnoy Spektrometrii = Method for Determining the Volumetric Activity of Organic and Inorganic Tritium Compounds in Water Bodies by Liquid Scintillation Spectrometry. Guidelines for Control Methods. MUK 4.3.044 -2012. Moscow Publ., 2012 (In Russ.).
- 14. Vypolneniye Izmereniy pri Radiatsionnom Kontrole Tritiya i Ugleroda-14 v Pomeshcheniyakh Aes s Primeneniyem Raskhodomera-Probootbornika Tasc-Ht-Hto-C14 (Mvk) = Carrying Out Measurements During Radiation Monitoring of Tritium and Carbon-14 in NPP Premises Using a TASC-HT-HTO-C14 (MVK) Flow Meter-Sampler. Technique MT 1.2.1.15.002. 0238-2014 (In Russ.).
- 15. Manual Tri-Carb 3180 TR/SL (In Russ.).
- 16. Manual Pyrolyser-6 Trio (In Russ.).
- 17. Schepaschenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Reserves of organic carbon in the soils of Russia // Pochvovedenie. 2013. № 2, P.125.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. Участие авторов. Концепция работы — Барчуков В.Г., Кочетков О.А. Сбор и обработка данных — Еремина Н.А., Сурин П.П., Алсагаев Ж.И., Барчуков В.Г., Величко В.К., Кабанов Д.И.

Написание текста и редактирование — Еремина Н.А., Клочков В.Н., Максимов А.А., Богданенко Н.А.

Поступила: 20.09.2022. Принята к публикации: 25.11.2022.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. **Financing.** The study had no sponsorship.

Contribution. Research concept – Barchukov V.G., Kochetkov O.A.

Data collection and processing – Eremina A.A., Surin P.P., Alsagaev Zh.I.,
Valery G. Barchukov, Valerya K. Velichko, Dmitryi I. Kabanov.

Text writing and editing – Eremina N.A., Klochkov V.N., Aleksei A.
Maximov, Natalya A.Bogdanenko.

Article received: 20.09.2022. Accepted for publication: 25.11.2022.