

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

АГЛЯДЫ
REVIEWS

УДК 504.06
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-487-504>

Поступила в редакцию 16.02.2018
Received 16.02.2018

Т. И. Кухарчик

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ:
ПРОИЗВОДСТВО, ПРИМЕНЕНИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ**

Аннотация. Обобщена информация о производстве и использовании фторсодержащих пенообразователей, предназначенных для пенного тушения пожаров с участием нефтепродуктов и других легковоспламеняющихся жидкостей, и экологических последствиях. Показано, что использование при их производстве поли- и/или перфторированных соединений привело к появлению в окружающей среде большой группы опасных химических веществ, в том числе перфтороктановой сульфоновой кислоты (ПФОС), пентадекафтороктановой кислоты (ПФОК), перфторгексановой сульфоновой кислоты (ПФГСК). Приведены общие сведения о фторсодержащих пенообразователях, их производителях и маркировках, свойствах, возможных объемах производства и применения в глобальном масштабе. Показано, что применение фторсодержащих пенообразователей при тушении пожаров, а также во время учебных тренировок приводит к непосредственному поступлению ПФОС, ПФОК и других фторсодержащих соединений в окружающую среду. Обсуждаются результаты исследований, выполненных в различных странах ЕС, Норвегии, США, Канаде и Австралии, свидетельствующие о высоких концентрациях ПФОС, ПФОК и других фторсодержащих соединений в подземных и поверхностных водах, а также в почвах. Наиболее высокие уровни загрязнения выявлены в местах применения фторсодержащих пенообразователей. Показана опасность поступления фторсодержащих соединений в организм человека с загрязненной питьевой водой и продуктами питания.

Ключевые слова: фторсодержащие пенообразователи, пожаротушение, перфтороктановая сульфоновая кислота (ПФОС), пентадекафтороктановая кислота (ПФОК), стойкие органические загрязнители, загрязнение окружающей среды

Для цитирования. Кухарчик, Т. И. Фторсодержащие пенообразователи для тушения пожаров: производство, применение, экологические последствия / Т. И. Кухарчик // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, №4. – С. 487–504. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-487-504>

T. I. Kukharchyk

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**FLUORINATED FIRE-FIGHTING FOAMS: MANUFACTURE, APPLICATIONS, ECOLOGICAL
CONSEQUENCES**

Abstract. Information on the production and use of fluorine-containing foaming agents intended for foam extinguishing of fires with oils and other flammable liquids as well as ecological consequences are reviewed in the article. It is shown that poly- and/or perfluorinated compounds usage for fire-fighting foam production led to the emergence of a large group of hazardous chemicals in the environment, including perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS). General information about fluorine-containing foaming agents, their manufacturers and labelling, properties, possible volumes of production and application on a global scale are given. It is shown that the use of fire-fighting foam to extinguish fires, as well as during training, leads to direct discharges of PFOS, PFOA and other fluorine-containing compounds into the environment. The results of studies carried out in various EU countries, Norway, the USA, Canada and Australia, which testify to high concentrations of PFOS, PFOA and other fluoride-containing compounds in groundwater and surface waters as well as in soils, are discussed. The highest levels of contamination are found in the sites

where fluorine-containing foaming agents are used. The danger of fluoride-containing compounds entering the human body with contaminated drinking water and food products is shown.

Keywords: fluorine-containing foaming agents, fire fighting, perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), pentadecafluorooctanoic acid (PFOA), persistent organic pollutants, environmental pollution

For citation. Kukharchyk, T. I. Fluorinated fire-fighting foams: manufacture, applications, ecological consequences. Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 487–504 (In Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-487-504>

Введение. Фторсодержащие пенообразователи, зарекомендовавшие себя как эффективные препараты для оперативного тушения пожаров при горении нефтепродуктов и других видов легковоспламеняющихся жидкостей, на протяжении почти двух десятилетий рассматриваются с точки зрения их негативного воздействия на природные экосистемы и здоровье человека. Применение таких пенообразователей, содержащих в составе полностью (пер-) или частично (поли-) фторированные соединения, привело к появлению в окружающей среде большой группы опасных химических веществ, в том числе перфтороктановой сульфоновой кислоты (ПФОС), пентадекафтороктановой кислоты (ПФОК), перфторгексановой сульфоновой кислоты (ПФГСК) и других. К настоящему времени получены доказательства негативного воздействия указанных веществ на здоровье человека, обусловленные их токсичностью и способностью к биоаккумуляции. Установлено, что содержащиеся в пенообразователях фторсодержащие ПАВ при поступлении в окружающую среду не деградируют, накапливаются в живых организмах и являются токсичными [1–3].

В настоящее время ПФОС, ПФОК и другие фторсодержащие соединения обнаруживаются практически повсеместно в различных компонентах природной среды, в том числе в биотических компонентах и организме человека. Однако наиболее высокие уровни загрязнения поверхностных и подземных вод, донных отложений и почв выявлены в местах тушения пожаров, а также как результат проведения испытаний/тренировок на военных базах, в аэропортах и на других объектах [4–8 и др.]. При этом высокие концентрации ПФОС, ПФОК, ПФГСК и других фторсодержащих соединений сохраняются в компонентах природной среды даже спустя десятилетия после прекращения применения пенообразователей. Кроме того, загрязнение окружающей среды зафиксировано в случаях применения пенообразователей, не содержащих ПФОС и ПФОК в коммерческих продуктах; их появление в компонентах природной среды явилось следствием деградации прекурсоров указанных соединений, которые считались безопасными. Во многих странах ЕС, США и Австралии выполнены исследования и получены доказательства поступления ПФОС, ПФОК и других опасных веществ в организм человека с питьевой водой, оказавшейся загрязненной вследствие применения фторсодержащих пенообразователей [9].

Осознание опасности ПФОС и ПФОК привело к значительному ограничению их производства и прекращению применения для получения фторсодержащих пенообразователей. ПФОС, ее соли и перфтороктановый сульфонилафторид включены в Стокгольмскую конвенцию о СОЗ в 2009 г. [10]. ПФОК, ее соли и родственные ПФОК соединения в октябре 2017 г. на 13-м заседании Комитета по рассмотрению СОЗ рекомендованы Конференции Сторон для включения в Приложение А или В [11]. С 2017 г. как кандидаты в СОЗ рассматриваются ПФГСК, ее соли и родственные ПФГСК соединения [12].

Однако несмотря на принимаемые меры, проблемы предотвращения поступления фторсодержащих соединений в окружающую среду с пенообразователями сохраняют актуальность. С одной стороны, это связано с продолжающимся использованием имеющихся запасов пенообразователей, произведенных в разные годы с разными фторсодержащими ПАВ, с другой – со способностью к трансформации фтортеломеров в более токсичные соединения по сравнению с исходными техническими продуктами (с образованием ПФОС, ПФОК, ПФГСК и других веществ).

В Беларуси и России производятся и используются фторсодержащие пенообразователи, однако сведения о них очень ограничены и касаются лишь некоторых их свойств [13–16]. Данных о содержании ПФОС, ПФОК, других фторсодержащих соединений в технических смесях и в компонентах природной среды нет.

Все это свидетельствует об актуальности обобщения доступной информации о производстве и составах фторсодержащих пенообразователей в разных странах, а также уровнях и особен-

ностях загрязнения компонентов природной среды пер- и полифторированными соединениями в местах применения пенообразователей.

Информационной основой данной работы явились научные публикации, справочная информация, документы и отчеты Секретариата Стокгольмской конвенции о СОЗ, Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Европейского химического агентства (ЕХНА), сайты предприятий и компаний – поставщиков продукции, другая доступная информация.

Общие сведения о фторсодержащих пенообразователях. Пенное тушение пожаров с использованием фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей признано одним из самых эффективных способов их ликвидации на объектах, связанных с возгоранием нефтепродуктов или других горючих жидкостей. Различают фторсодержащие водные, спиртоустойчивые, фторпротеиновые и спиртоустойчивые фторпротеиновые пенообразователи. Все они относятся к пенообразователям целевого назначения и применяются для тушения пожаров с участием больших объемов легковоспламеняющихся жидкостей (пожары класса В) или некоторых видов твердых материалов (пожары класса А) [7, 17, 18]. Фторсодержащие пенообразователи используются также для подслоного тушения пожаров, с подачей пены в резервуары.

Пенные растворы на основе фторсодержащих пенообразователей не тонут после разрушения пены, а образуют на поверхности топлива пленку, которая изолирует его от горючих паров, препятствует окислению и вторичному возгоранию. Пер- и полифторированные поверхностно-активные вещества (ПАВ), применяемые при производстве пенообразователей, снижают поверхностное натяжение и способствуют образованию устойчивой пленки при высоких температурах. Эти свойства пер- и полифторированных ПАВ обеспечиваются за счет прочности фторуглеродных связей в молекуле.

Перфторированные (полностью) и полифторированные (частично) ПАВ – синтетические вещества, производство которых осуществлялось с помощью метода электрохимического фторирования и теломеризации; используемая аббревиатура для обозначения данных веществ – ПФАВ (в англоязычной литературе – PFASs). В перечне фторированных ПАВ, которые применялись для производства фторсодержащих пенообразователей, выделяются две группы соединений: перфторкарбоксилаты (англоязычная аббревиатура – PFCAs) и перфторсульфонаты (PFSAs) [19–22]. Перфторкарбоксилаты включают пентадекафтороктановую кислоту (ПФОК), хотя собственно ПФОК не применялась для производства пенообразователей. Применялись так называемые прекурсоры ПФОК, или родственные ПФОК соединения, которые способны к образованию ПФОК при деградации. Среди перфторсульфонатов выделяются перфтороктановая сульфоновая кислота (ПФОС) и перфторгексановая сульфоновая кислота (ПФГСК). К фторированным ПАВ относятся также фтортеломеры с различной длиной углеродной цепи, которые нашли широкое применение при производстве пенообразователей.

Производители и марки продукции. Впервые фторсодержащие пенообразователи, получившие название Light Water (Легкая вода), были запатентованы в 1960-х годах в США; их промышленное производство осуществлялось компанией 3М [23]. Данная компания оставалась единственным в мировом масштабе производителем фторсодержащих пенообразователей до середины 1973 г. [24]. Впоследствии такие пены производились во многих странах и регионах [19, 25–28]; среди известных компаний-производителей в США выделяются следующие (в скобках приведены марки фторсодержащих пенообразователей): 3М Company (Light Water, FC-203, 206, 600, 602), Ansul Fire Protection (Ansul, Ansulite), National Foam Systems, Inc. (Aer-O-Water, Universal), Angus Fire Anmour (Tridol, Petrosel, Alcoseal, Niagara, FR-70), Chemguard (Chemguard AFFF, Ultraguard), Buckeye (Buckeye), Dynax Corporation (Dynax), Fire Service Plus, Inc. В Европе производителями фторсодержащих пенообразователей являются: в Германии – Dr. Richard Sthamer (Moussol APS, Foamusse, Sthamer), в Швеции – Fomtec (Fomtec), в Норвегии – Solberg (Arctic Foam), в Швейцарии – Chemours (Forafac, Capstone), в Великобритании – Tycos Park (Towalex, Comet Extract, Expyrol) и Oil Technics (Aberdine Foam), во Франции – Kidde; имеются компании также в Италии, Испании и других странах. В Индии производство фторсодержащих пенообразователей осуществляется компаниями Integrated Fire Protection (Unilight AR), Amprex Safety Solution (Amplex AFFF Foam), в Китае – Langchao Fire, Shenzhen Winan Industrial Development, Xiamen Eastex, Yunlong RRE Equipment, Zhengzhou Yuheng Industry и многими другими.

В России производство фторсодержащих пенообразователей было начато гораздо позже: только в 1984 г. состоялись испытания спиртового пенообразователя ФОРЭТОЛ; имеются данные о разработке «Пленкообразующего» и «Универсального» пенообразователей, хотя из-за низкой эффективности их производство осуществлялось недолго [29]. С 1990-х годов появилась возможность использовать импортное сырье, на основе которого начали производиться различные марки пенообразователей. Согласно [15, 30], в последние годы для производства пенообразователей используются Fofagac и NOVEC. Выпускаемые виды фторсодержащих пенообразователей включают: ПО-РЗФ, ПО-6А3Ф, Меркуловский, Заполярный, Аквафом и др.

К фторсодержащим пенообразователям, сертифицированным на территории Республики Беларусь, относится «Барьер пленкообразующий», который производится в Беларуси на ООО «Спландор». Как и в России, для производства данного пенообразователя используются зарубежные фторированные ПАВ [14].

Приведенный перечень наименований продукции и производителей не является исчерпывающим, он лишь свидетельствует о разнообразии первых и многочисленности вторых. Следует принимать во внимание также и те обстоятельства, что компании-производители имеют представительства во многих странах, а возможности торговых отношений практически не ограничены. Этим объясняется глобальный характер распространения фторсодержащих пенообразователей. Например, в Австралии используется продукция компании 3М, США [31]; в России – фторсодержащие пенообразователи от производителей Германии, Швеции, Франции, США и др. [32].

Состав и свойства фторсодержащих пенообразователей. Фторсодержащие пенообразователи представляют собой водные концентраты, которые помимо фторированных ПАВ, содержат другие ингредиенты, такие как растворители, углеводородные ПАВ, стабилизирующие, бактерицидные, противокоррозионные и др. добавки [13, 18, 23, 27, 33]. Содержание воды в пенообразователях варьирует от 68 до 93 %, растворителей – от 3 до 25 %, углеводородных ПАВ – от 2 до 12 %, фторированных ПАВ – от 1 до 5 %, других добавок – от менее 1 до 1,5 % [27]. По данным [34], для продления срока службы пенообразователей в них добавляют такие компоненты, как гликолевые эфиры и этилен или пропиленгликоли.

Наибольший интерес с точки зрения последствий применения и поступления загрязняющих веществ в окружающую среду представляют именно фторированные ПАВ. Вместе с тем, что касается идентификации пенообразователей, содержащих ПФОС, ПФОК или другие пер- и полифторированные ПАВ, то на основании их маркировок это сделать не представляется возможным. По сути, аббревиатура AFFF (Aqueous Film Forming Foam), принятая еще в 1960-е годы, или в русскоязычной терминологии «фторсодержащие» является основным индикатором принадлежности пенообразователей к фторсодержащим.

Получение информации о содержании конкретных соединений в пенообразователях проблематично в связи длительным периодом их производства, наличием большого перечня производителей, а также в связи с коммерческой тайной производимой продукции. Так, компания 3М в период с 1965 по 1975 г. использовала перфторированные карбоксилаты, с 1975 по 2001 г. – перфторированные сульфонаты (ПФОС) и родственные соединения [20]. С 1970-х годов начали широко применяться фтортеломеры с различной длиной углеродной цепи. В период с 2000 по 2002 г. компания 3М на добровольных началах прекратила производство фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей, что было обусловлено опасностью ПФОС и ПФОК для природных экосистем и здоровья человека. Однако не все компании присоединились к этой программе; кроме того, продолжали использоваться уже имеющиеся запасы пер- и полифторированных соединений. В работе [35] указано, что в Китае продолжается производство таких пен на основе ПФОС.

Ограничения, коснувшиеся ПФОС, привели к необходимости поиска экологически безопасных альтернатив, способных в то же время поддерживать качество пенообразователей на нужном уровне по эффективности пожаротушения. Что касается фтортеломеров, то поскольку они также сильно фторированы, то многие соединения, так же как ПФОС и ПФОК, оказались устойчивыми к разложению и способными к биоаккумуляции [34]. Некоторые соединения деградируют в окружающей среде с образованием ПФОС, ПФОК или родственных им соединений.

В последние годы в качестве альтернативы начали применяться модифицированные фторированные (или полифторированные) фтортеломеры, зачастую представляющие собой смеси фторированных ПАВ с различными добавками. Результаты эколого-гигиенических характеристик ряда современных фторсодержащих пенообразователей, представляющих собой смеси фторированных ПАВ, алкилсульфата натрия и других добавок (например, Forafac® 1157N, FiniflamA3F и др.) показали, что они уступают по эффективности тушения пожаров, но представляют опасность с точки зрения фитотоксичности и остаются неразлагаемыми [16].

К настоящему времени установлено, что на практике применялись и применяются как короткоцепочные фтортеломеры (С6:2), так и их смеси С8/С6 [21]. Переход исключительно на короткоцепочные фтортеломеры типа С6 сдерживается недостаточно высокой эффективностью пенообразователей на их основе и необходимостью увеличения расходных материалов до 20 % [36]. Согласно [22], на рынке наиболее распространены смеси фторированных ПАВ с длиной углеродной цепи в диапазонах С8-14 и С4-8 (вероятно, этим также могут быть обусловлены их наличие в составах пенообразователей). Общее же количество поли- и/или перфторированных соединений, имеющих номер КАС, превышает 2000 наименований; предполагается, что имеется еще около 2000 соединений, не имеющих номера КАС. Это существенно осложняет их идентификацию, выявление, мониторинг и регулирование.

Согласно обобщению [36], в настоящее время имеется один производитель в США и два в Европе, чьи продукты изготовлены с использованием короткоцепочных фтортеломеров. Большинство же производителей, включая ряд крупных, приняли сознательное решение использовать смесь фтортеломеров С8/С6. В частности, фтортеломерные ПАВ (CAS 70969-47-0, С8-С20-γ-ω-перфтор теломер тиолы с акриламидом) продолжают использовать, несмотря на значительный потенциал воздействия на окружающую среду; при такой длине углеродной цепи (С8-С20) возможно образование ПФОК, при этом чем длиннее цепь, тем токсичнее продукты распада.

Следует подчеркнуть, что количественные данные о содержании поли- и/или перфторированных соединений в пенообразователях немногочисленны. Судя по имеющейся информации, верхний предел содержания ПФОС и ПФОК ограничен 3 %, нижний находится на уровне 1 % [37, 38]. Содержание фтора варьирует в более широком диапазоне (0,36–8,42 %), что связывают с различиями процессов производства фторированных ПАВ (электрохимического фторирования и теломеризации), а также требованиями к пенообразователям в зависимости от их назначения [25, 28]. Согласно [27], в ПАВ, полученных на основе электрохимического фторирования, на 30–60 % содержится больше фтора, чем в продукции на основе фтортеломеризации.

В последние годы активно развиваются исследования, направленные на изучение состава пленкообразователей разных производителей и совершенствовании химико-аналитических процедур для улучшения идентификации опасных веществ в окружающей среде [39–41].

Так, по результатам исследований в Швеции в 2014 г., которые включали отбор и химико-аналитические исследования 8 различных типов пленкообразователей, были зафиксированы поли- и/или перфторированные соединения во всех пробах [40, 42]. В отдельных пробах содержание перфторгексановой кислоты (PFHxA, С6) достигало 14 мг/кг, фтортеломерной сульфоновой кислоты (6: 2 FTS) – 10 мг/кг. Биоаккумулирующие перфторированные кислоты (С 1 7) и перфторированные сульфоновые кислоты обнаруживались реже и в значительно меньших концентрациях (10–100 мкг/кг). На основании полученных результатов сделано заключение, что в торговых марках пенообразователей не использовались перфторированные соединения с длиной цепи С8, которые приводят к появлению ПФОС или ПФОК. Однако их присутствие может быть обусловлено примесями или перекрестным загрязнением ранее использовавшихся продуктов.

По результатам анализа 9 различных пенных концентратов во Франции были зафиксированы 3 соединения пер- и полифторированных алкильных соединений (ПФАВ) в высоких концентрациях (от 22,5 до 3188 мг/л) [41]. Всего были идентифицированы тринадцать соединений ПФАВ. При этом каждая пена представляла собой смесь по меньшей мере двух классов рассматриваемых веществ.

В работе [28] приведены данные о результатах исследований проб пенообразователей семи компаний, которые были произведены в период с 1984 по 2011 г. и продолжают использоваться на военных объектах в США. Общее количество отобранных проб – 74. Было установлено, что

в пенах обнаруживается 10 различных классов фторхимических соединений, которые включают анионные, катионные и амфотерные ПАВ с длиной перфторалкильной цепи от 4 до 12.

Исследования в Канаде [43] показали, что фтортеломер меркаптоалкиламидосульфонат (Fluorotelomermercaptoalkylamido sulfonate – 6:2 FTSAS) был обнаружен во всех проанализированных пенообразователях (F-500, Tridol S3 %, Anslite 3 % AFFF-DC-3, Niagara 1-3 и Ansul Ansulite ARC); указано, что ранее он был обнаружен в пенообразователях типа Forafac 1157, F-500, Niagara 1-3, and Tridol S. 6:2 FTSAS). Опасность его присутствия связывают со способностью к образованию в окружающей среде стойких перфторированных алкильных кислот (перфторалкилкарбоксилатов) при деградации [8, 43, 44], хотя вопросы воздействия на живые организмы и здоровье человека продолжают обсуждаться [45]. На стойкость фторсодержащих ПАВ, используемых в России, указано в ряде работ [15, 16].

Объемы применения и пути поступления в окружающую среду. Общие объемы производства фторсодержащих пенообразователей неизвестны, так же как неизвестны и общие накопленные их запасы. Имеющиеся оценки для отдельных стран свидетельствуют о достаточно значительных их количествах. Так, по данным [27, 46], в США в 2004 г. было выявлено около 9,9 млн галлонов (или 37,5 тыс. м³) фторсодержащих пенообразователей, из которых примерно половина приходилась на долю ПФОС-содержащих. В 2011 г. ПФОС-содержащие пенообразователи составляли около 2 млн галлонов или 7,5 тыс. м³. В странах ЕС имеющиеся запасы пенообразователей оценены в 22,2 тыс. т, в которых ПФОС может составлять 122 т [26]. В Великобритании запасы пенообразователей составляют примерно 2,44 тыс. т, в Норвегии – 1,7 тыс. т [26, 47]. В Японии запасы концентрированных пенообразующих составов, содержащих ПФОС, составляют около 21,0 тыс. т, из которых около 11,4 содержат ПФОС, а в остальных 9,6 тыс. т – производные ПФОС [35]. По данным [21], в целом в пределах Азиатско-Тихоокеанского региона на долю ПФОС-содержащих пенообразователей приходится 30–40 % от их общего объема.

Данных об объемах фторсодержащих пенообразователей в странах СНГ нет. Согласно [48], в России ежегодные закупки пенообразователей целевого назначения (т.е. фторсодержащих) несколько превышают 3,0 тыс. т; ожидается, что в перспективе они вырастут до 15 тыс. т.

Учитывая сферу назначения пенообразователей, сложно ожидать точных данных об объемах их применения и поступления в окружающую среду. Считается, что общие исторические поступления перфторкарбоксилатов в почву и воду в глобальном масштабе от использования фторированных пенообразователей на основе ПФАВ варьируют от 50 до 100 т [20]. Что касается производных ПФОС, то их объемы поступления за период 1970–2002 гг. оцениваются в 9150 т.

Оценки для ряда Североевропейских стран свидетельствуют, что ежегодные поступления ПФОС и ПФОК в окружающую среду могут варьировать от килограммов до тонн. Например, объем их поступления в Норвегии в 2002 г. оценивается в 5–7 т [47]. В Финляндии с пленкообразующими пенообразователями в поверхностные воды в период 2005–2011 гг. ежегодно поступали 90–142 кг ПФОС и 5–8 кг ПФОК, в почву 30–48 кг ПФОС и 14–22 кг ПФОК [49]. В гораздо больших объемах возможно поступление опасных веществ при аварийных ситуациях, наподобие произошедшей в 2000 г. в международном аэропорту в Торонто, штат Огайо, когда в окружающую среду попало 22,0 тыс. л пенообразователей [50].

По сути, выявление запасов фторсодержащих пенообразователей является необходимым этапом для оценки поступления содержащихся в них загрязняющих веществ в окружающую среду; в этом смысле первый опыт зарубежных стран и полученные результаты могут быть положены в основу последующих региональных или глобальных инвентаризаций.

Уровни загрязнения окружающей среды в результате применения фторсодержащих пенообразователей. Использование пен на основе фторсодержащих пенообразователей при тушении пожаров, а также во время учебных тренировок приводит к непосредственному поступлению содержащихся в них ПФОС, ПФОК и других фторсодержащих соединений в окружающую среду. По сути, весь объем пенообразователей в результате их применения оказывается в окружающей среде. Поскольку они поступают с большим количеством воды (соотношение воды и пенообразователей может варьировать от 94:6 до 99:1 соответственно), то имеются предпосылки распро-

странения опасных веществ в подземные и поверхностные воды. Даже разовое применение фторсодержащих пенообразователей может привести к загрязнению компонентов природной среды, хотя наибольшие уровни характерны для мест многократного их использования, а также при аварийных ситуациях, сопровождающихся разливами непосредственно концентратов.

Как известно, основными объектами применения фторсодержащих пенообразователей являлись и являются военные базы, аэропорты, нефтеперерабатывающие предприятия, нефтехранилища, буровые платформы [7]. В частности, применение фторсодержащих пенообразователей для тушения пожаров в аэропортах (гражданских и военных) регулировалось на национальном уровне в США, Великобритании, Норвегии и др. странах, где были разработаны стандарты их применения [25]. По данным [23], 75 % фторсодержащих пенообразователей в США используются на объектах военной промышленности, оставшиеся 25 % – на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии, в аэропортах гражданской авиации.

О последствиях применения пен для окружающей среды долгое время ничего не было известно. В 1999 г. появились результаты исследования подземных вод в США, отобранных на учебном полигоне и участке аварийного разлива пенообразователей [4]. За прошедшее время во многих странах, помимо США, (Великобритании, Германии, Норвегии, Швеции, Австралии, Франции и других) проведены исследования для оценки масштабов загрязнения и последствий, которые особенно активизировались в последнее десятилетие [5–7, 9, 21, 36, 50–57].

Некоторые из опубликованных результатов замеренных концентраций ПФОС, ПФОК или других соединений в местах применения фторсодержащих пенообразователей приведены в табл. 1.

Как уже отмечалось, ПФАВ – группа синтезированных химических веществ, не встречающихся в естественных условиях. Между тем в настоящее время они относятся к загрязняющим

Т а б л и ц а 1. Содержание пер- и полифторированных соединений в компонентах природной среды в местах применения фторсодержащих пенообразователей

T a b l e 1. The content of per- and polyfluorinated compounds in the environment at the sites of fluorinated fire-fighting foam utilization

Объект исследования	Тип субстрата	Вещество	Концентрация, единица измерения	Источник
Учебные полигоны на военно-морских и военно-воздушных базах в двух штатах, США (через 7–10 лет после применения пен)	Подземные воды	ПФАВ	125–7090 мкг/л	[4]
Военно-воздушная база в штате Мичиган, США, испытательный полигон (1950-е – 1993)	Подземные воды	Сумма четырёх ПФАВ (включая ПФОС)	3–120 мкг/л	[51]
Аэропорт в Торонто, Канада; аварийная утечка (22,0 тыс. л пены), 2000 г.	Поверхностные воды	Сумма ПФАВ	< 10–17000 мкг/л	[50]
Военные базы, Австралия	Поверхностные воды	ПФОК	0,01–1,74 мкг/л	[57]
	Подземные воды	ПФОК	< 0,02–22,6 мкг/л	
Военная авиационная база, Австралия	Подземные воды (63 пробы)	ПФОК	н.о.–45,5 мкг/л	[58]
	Поверхностные воды (25 проб)	ПФОК	н.о.–15,5 мкг/л	
Дания, 8 объектов	Подземные воды	ПФАВ	до 1,0 мкг/л и более	[54]
Аэропорт Гардермуена вблизи Осло, Норвегия	Почвы	Перфтор-карбоксилаты, включая ПФОК	4 мкг/кг	[36]
	Почва	ПФОС	959 мкг/кг	
Военный аэропорт и его окрестности в Стокгольме, Швеция, учебный полигон до 1994 г.	Почва	ПФОС	2,18–8520 мкг/кг	[6]
	Почва	ПФОК	< 0,12–287 мкг/кг	
	Поверхностные воды	Сумма ПФАВ	н.о.–0,08 мкг/л	
	Подземные воды	Сумма ПФАВ	0,74–51,0 мкг/л	

Продолжение табл. 1

Объект исследования	Тип субстрата	Вещество	Концентрация, единица измерения	Источник
Нефтехранилище, США (2014, 2015 г.)	Подземные воды	Сумма 13 ПФАВ, включая и ПФОК	4,3–5,4 мкг/л	[41]
		ПФОС	0,46–0,56 мкг/л	
		ПФОК	0,09 мкг/л	
Гражданский аэропорт, США, 2014	Подземные воды	ПФОС	0,02–0,06 мкг/л	
		ПФОК	0,005–0,02 мкг/л	
Учебный полигон вблизи аэропорта Арланда, Швеция	Поверхностные воды (канал)	ПФОК	0,21 мкг/л	[5]
		ПФОС	2,34 мкг/л	
	оз. Хальмсьон (2009–2013 гг.)	Сумма четырех ПФАВ, включая ПФОС и ПФОК	0,14–0,35 мкг/л	
Учебный полигон вблизи предприятия по производству пенообразователей, Норвегия	Поверхностные воды, ручей	ПФОС	68,9 мкг/л	[36]
Учебный полигон для тренировок по пожаротушению вблизи бухты Росерсберг, Швеция (2001–2002 г.)	Донные отложения	ПФОС	0,05–6,5 мкг/кг	[19]
	Поверхностные воды	ПФОС	0,03–2,1 мкг/л	
	Подземные воды	ПФОК	< 0,001–0,09 мкг/л	
Военные базы и учебные полигоны (Ревидже, Сандо, Розенберг и Скоувед); использование пенообразователей (1985–2003 гг.)	Подземные воды	ПФОС	до 910 мкг/л	[53]
Учебный полигон в Тулинге, Швеция	Подземные воды	ПФОС	до 42,2 мкг / л	[6]
		ПФОК	до 4,5 мкг/л	
Учебный полигон, штат Квинсленд, Австралия	Подземные воды	ПФОС	< 0,17–14 мкг/л	[9]

веществам, имеющим глобальный характер распространения. В районах же применения фторсодержащих пенообразователей зафиксированы высокие концентрации ПФОС, ПФОК или суммы ПФАВ. Например, содержание ПФОС в поверхностных водах в районе испытательного полигона вблизи предприятия по производству пенообразователей (Норвегия) достигает 68,9 мкг/л [36]. Максимальное из представленных в таблице значений для суммы ПФАВ (17000 мкг/л) зафиксировано в пробах воды, отобранных в районе аэропорта в Торонто (Канада), как следствие аварийных утечек пенообразователей [50]. Приведенные данные свидетельствуют о многократном превышении фоновых значений, которые по данным [20], оцениваются в 0,1–10 нг/л. В воде Канадских арктических озер концентрация ПФОК составила 0,6–17 нг/л [59], в воде Великих озер (США) – от менее 2 до 59 нг/л [60]. Также на уровне нанограм на литр зафиксировано содержание ПФОС в поверхностных водах ряда водоемов Европейского региона: от менее 0,02 до 56 нг/л [60].

В подземных водах концентрации загрязняющих веществ достаточно высоки: например, содержание ПФОС составило 42,2 мкг/л в районе учебного полигона, Швеция [6] и 910 мкг/л в районе военных баз в Норвегии [53], ПФОК – 45,5 мкг/л в районе военной авиабазы в Австралии [58]. Экстремально высокие концентрации суммы ПФАВ в подземных водах выявлены в районах военных баз в США: до 7090 мкг/л [4]. По данным [51], на испытательном полигоне, где пены применялись в период с 1950-х по 1993 г., максимальные значения составили 120 мкг/л. Для сравнения отметим, что содержание ПФОС в подземных водах в ряде Европейских стран вне локальных источников загрязнения находится в диапазоне от менее 2 до 22 нг/л, ПФОА – от 1 до 4 нг/л [60].

Полученные значения существенно превышают нормативы для питьевых вод, установленные в разных странах. Например, в США нормативное значение суммы ПФОС и ПФОК принято на уровне 70 нг/л [52], в Австралии для суммы ПФОС и ПФОК в качестве временной нормы

используется значение 0,5 мкг/л [9]. По данным [54], предельные значения 12 пер- и полифторированных алкильных веществ (ПФАВ), включая ПФОК и ПФОС, для питьевой воды, установленной в Дании, составляет 0,1 мкг/л.

Одним из важнейших результатов исследований является доказательство того, что во многих случаях именно наличие прекурсоров в пенообразователях привело к загрязнению подземных вод ПФОС и ПФОК [7, 36, 41]. На примере ряда объектов показано, что содержание перфторированных карбоксилатов и сульфонатов выше в подземных водах и почвах, чем в любых известных рецептурах пенообразователей с маркировкой AFFF. Это означает, что значительная часть прекурсоров, высвобождаемых при применении пенообразователей, превращалась в перфторированные карбоксилаты и сульфонаты.

Несомненный интерес представляют также результаты исследований, выполненных на объектах с различной продолжительностью использования фторсодержащих пенообразователей [4, 6, 51]. Сохраняющиеся высокие концентрации ПФАВ в различных компонентах природной среды в местах, где пенообразователи не применялись 10 и более лет, подтверждают устойчивость фторсодержащих соединений в окружающей среде. На примере исследований в районе аэропорта в Швеции показано отсутствие трендов снижения концентраций пер- и полифторалкильных соединений в поверхностных водах с 2009 по 2013 г. [5]. В работе [55] показано, что концентрации ПФОК уменьшаются только из-за диффузии и разбавления при миграции в водоносных горизонтах.

Применение фторсодержащих пенообразователей приводит также к накоплению ПФАВ в почвах. Максимальные зафиксированные уровни ПФОС в почвах достигают 8520 мкг/кг в районе военного аэропорта вблизи Стокгольма, Швеция [6]. В почве аэропортов вблизи Осло концентрация ПФОС составила 959 мкг/кг, что почти в 10 раз выше, чем на удаленной территории [54].

Как и следовало ожидать, различия в уровнях загрязнения почв ПФОС и ПФОК, как и природных вод, обусловлены разными факторами, включая историю применения пен и периодичность их применения [6]. Отмечается неравномерность распределения ПФОС и ПФОК в почвогрунтах по вертикальному профилю, что может быть связано с различными условиями инфильтрации, помимо объемов и времени поступления пен. На учебном полигоне, где пенообразователи использовались регулярно на протяжении 15 лет (1970–1985 гг.), наиболее высокие концентрации ПФОС характерны до глубины 2 м, где они составляют 2720 мкг/кг (табл. 2). Даже на глубине 3 м их концентрация остается 138 мкг/кг, что многократно превышает установленные нормативы (в Дании, например, для 12 соединений ПФАВ – 0,4 мкг/кг, в Нидерландах для ПФОС – 2,3 мкг/кг) [54].

Т а б л и ц а 2. Распределение ПФОС и ПФОК в почвогрунтах по вертикальному разрезу на участках бывшего военного аэродрома в Швеции, мкг/кг [6]

Table 2. The distribution of PFOS and PFOA in vertical soil profiles at the sites of the former military airfield in Sweden, mkg/kg [6]

Глубина отбора, м	Основной учебный полигон		Учебный полигон по напалму (с зажигательными смесями)		Старая пожарная станция	
	ПФОС	ПФОК	ПФОС	ПФОК	ПФОС	ПФОК
0–0,5	8520	219	20,2	1,11	7,12	0,16
0,5–1,0	5220	234	41,4	0,86	63,2	0,98
1,0–1,5	3960	287	64,96	1,13	69,9	0,33
1,5–2,0	2720	212	91,3	1,51	85,7	1,37
2,0–2,5	118	5,89	140	1,12	7,2	0,22
2,5–3,0	138	6,98	126	1,25	2,6	0,22
3,0–3,5	–	–	71,6	1,35	2,2	k 0,12
3,5–4,0	–	–	6,6	0,51	9,96	2,95

Представленные выше данные и краткий их анализ касается лишь некоторых аспектов загрязнения окружающей среды ПФАВ. Следует отметить, что за последние годы наметился существенный прогресс в химико-аналитическом обеспечении выполнения исследований и идентификации фторсодержащих соединений как в технических смесях (пенообразователях), так и в различных матрицах [7, 28, 41].

Последствия загрязнения окружающей среды и необходимость регулирования. Поиск и анализ доступных источников показал, что проблеме загрязнения окружающей среды пер- и полифторированными соединениями в экономически развитых странах уделяется значительное внимание. К настоящему времени получены достаточно достоверные корреляции между высокими уровнями содержания ПФАВ в поверхностных или подземных водах и почвах, а также биотических компонентах и фактами поступления фторсодержащих пенообразователей при их разливах и/или использовании [4, 28, 50, 51, 56, 61].

Повышенный интерес к локальным источникам воздействия, к которым относятся объекты с применением фторсодержащих пенообразователей, связан с обеспокоенностью поступления опасных веществ в подземные воды, предназначенные для питьевого водоснабжения. Судя по публикациям последних лет, рассматриваются различные аспекты последствий загрязнения окружающей среды ПФАВ [9, 41, 52, 53, 62, 63]. В США ПФАВ включены в Программу мониторинга нерегулируемых загрязняющих веществ (UCMR3) Агентства по охране окружающей среды; по результатам исследований 2013–2015 гг. установлено, что из 66 общественных водозаборов, которыми пользуются около 6 миллионов жителей США, как минимум, одна проба превышает установленные нормы для ПФОС и ПФОК. По итогам широкомасштабных работ в Австралии выявлено 36 участков, которые имеют или подозреваются в наличии остатков перфторированных соединений в результате использования фторсодержащих пенообразователей [58]. Во Франции по результатам выполненных исследований и полученных оценок закрыты некоторые источники водоснабжения в связи с высокими концентрациями ПФАВ [41, 52]. В 2011 г. в связи с высокими концентрациями ПФОС были закрыты некоторые скважины по водоснабжению в Таллинге, Швеция; в 2012 г. в Упсале для снижения загрязнения подземных вод установлены угольные фильтры [53, 63].

Опасность распространения соединений ПФАВ с загрязненными подземными водами в случае их использования для сельскохозяйственных целей связана с аккумуляцией загрязняющих веществ в почвах и последующим их поступлением в растениеводческую и животноводческую продукцию [9]. На основании экспериментальных исследований и моделирования подтверждены негативные последствия применения фторсодержащих пен, выражающиеся в накоплении ПФАВ в организме человека (сыворотке крови) при потреблении рыбы из озер, подвергшихся воздействию пенообразователей [62, 64].

К настоящему времени в ряде стран приняты и реализуются меры, направленные на снижение негативного воздействия ПФОС и ПФОК [11, 35, 65–67]. Во многих странах на законодательном уровне запрещено производство и использование ПФОС/ПФОК для пен в соответствии с Директивой 2006/122 / ЕС и решениями Стокгольмской конвенции о СОЗ. В Австралии разработаны рекомендации и принимаются наилучшие доступные меры по регулированию применения пен, сбору сточных вод, предотвращению загрязнения окружающей среды [31]. Указанные меры не являются исчерпывающими; данный вопрос заслуживает отдельного рассмотрения.

Заключение. Выполненный обзор литературных источников позволяет заключить следующее:

- к фторсодержащим пенообразователям, подлежащим регулированию, в первую очередь относятся запасы «старых» пенообразователей, потенциально содержащих ПФОС и/или ПФОК;
- возможность образования опасных пер- и полифторированных соединений из прекурсоров, которые присутствуют в производимых в настоящее время пенообразователях, свидетельствует о сохраняющейся опасности их поступления в окружающую среду и организм человека;
- потенциальными объектами применения фторсодержащих пенообразователей являются предприятия нефтепереработки, нефтехранилища, гражданские и военные аэропорты, другие военные объекты; являясь точечными источниками с точки зрения поступления загрязняющих

веществ в окружающую среду, такие объекты оказывают влияние на прилегающие территории вследствие способности ПФАВ мигрировать с поверхностными и подземными водами;

– наиболее высоких уровней загрязнения природных компонентов следует ожидать в местах применения фторсодержащих пенообразователей при пожаротушении, а также на испытательных/тренировочных полигонах; при этом необходимо принимать во внимание исторические аспекты применения фторсодержащих пенообразователей;

– накопленные данные свидетельствуют о необходимости рассмотрения максимально доступного спектра загрязняющих веществ, которые могут быть следствием процессов деградации и превращений сложных по структуре фторорганических соединений;

– необходима постановка и развитие исследований в Беларуси, направленных на изучение содержания пер- и полифторированных соединений в компонентах природной среды, выявление мест использования фторсодержащих пенообразователей, оценку опасности загрязнения окружающей среды.

Список использованных источников

1. Revised Draft. Hazard Assessment of Perfluorooctanoic Acid and its Salts [Electronic resource] / U. S. Environmental Protection Agency Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division. – 2002. – Mode of access. <http://fluoridealert.org/wp-content/pesticides/pfoa.epa.nov.4.2002.pdf>
2. Results of Survey on Production and Use of PFOS, PFAS and PFOA, Related Substances and Products/Mixtures Containing these Substances [Electronic resource] // OECD Environment, Health and Safety Publications. Series on Risk Management. – 2004. – № 19. – Mode of access: <http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono%282005%291&doclanguage=en>. – Date of access: 02.12.2017.
3. Analysis of the risks arising from the industrial use of Perfluorooctanoic acid (PFOA) and Ammonium Perfluorooctanoate (APFO) and from their use in consumer articles. Evaluation of the risk reduction measures for potential restrictions on the manufacture, placing on the market and use of PFOA and APFO: Final Report. 2010 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/13037/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>. – Date of access: 18.11.2017.
4. Moody, C. A. Determination of Perfluorocarboxylates in Groundwater Impacted by Fire-Fighting Activity / C. A. Moody, J. A. Field // Environmental Science and Technology. – 1999. – Vol. 33, № 16. – P. 2800–2806. <https://doi.org/10.1021/es981355+>
5. Stockholm Arlanda Airport as a source of per- and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish / L. Ahrens [et al.] // Chemosphere. – 2015. – № 129. – P. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.136>
6. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish / M. Filipovic [et al.] // Chemosphere. – 2015. Vol. 129. – P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.005>
7. Persistence of Perfluoroalkyl Acid Precursors in AFFF-Impacted Groundwater and Soil / E. F. Houtz [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, № 15. – P. 8187–8195. <https://doi.org/10.1021/es4018877>
8. The structure of the fire fighting foam surfactant Forafac®1157 and its biological and photolytic transformation products / M. K. Moe [et al.] // Chemosphere. – 2012. – Vol. 89, № 7. – P. 869–875. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.012>
9. Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater / J. Bräunig [et al.] // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 596–597. – P. 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
10. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Text and Annexes. – 2009 [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.wipo.int/wipolex/ru/treaties/text.jsp?file_id=194846. – Date of access: 10.11.2017.
11. UNEP/POPS/POPRC. 13/7/Add.2. Доклад Комитета по рассмотрению стойких органических загрязнителей о работе его тринадцатого совещания. Добавление. Оценка регулирования рисков в отношении пентадекафтороктановой кислоты (КАС № 335-67-1, ПФОК, перфтороктановая кислота), ее солей и родственных ПФОК составов [Электронный ресурс] / Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Тринадцатое совещание. Рим, 17–20 октября 2017 года. – Режим доступа: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.13-7-Add-2.Russian.pdf>
12. UNEP/POPS/POPRC. 13/4. Предложение о включении перфторгексановой сульфоновой кислоты (КАС №: 355-46-4, ПФГСК), ее солей и родственных ПФГСК составов в приложения А, В и/или С к Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях. Записка секретариата [Электронный ресурс] / Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Тринадцатое совещание. Рим, 17–20 октября 2017 года. Режим доступа: <http://www.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC13/Overview/tabid/5965/ctl/Download/mid/18462/Default.aspx?id=41&ObjID=24663>
13. Исследование коррозионной активности пенообразующих составов для тушения пожаров / О. Д. Навроцкий [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2010. – № 1. – С. 98–105.

14. Лахвич, В. В. Исследование свойств пленкообразующих пенообразователей для тушения горючих жидкостей / В. В. Лахвич, Г. И. Вариков // Вестник Командно-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2014. – № 1 (19). – С. 73–81.
15. Бочаров, В. В. Пенообразователи для тушения пожаров на основе перфторированных ПАВ. Оценка их биоразлагаемости и возможных методов утилизации / В. В. Бочаров, М. В. Раевская // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 1384–1387.
16. Бочаров, В. В. Исследование эколого-гигиенических характеристик пенообразователей для пожаротушения легковоспламеняющихся жидкостей и выбор продуктов с минимальными экологическими рисками для окружающей среды / В. В. Бочаров, М. В. Раевская // Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки. – 2016. – Т. 37, № 25. – С. 88–93.
17. Инструкция о порядке применения пенообразователей для тушения пожаров [Электронный ресурс]: утв. Постановлением М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 24.06.2009, № 32. – Режим доступа: [http://www.pravo.by/pdf/2009-209/2009-209\(043-057\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2009-209/2009-209(043-057).pdf)
18. Порядок применения пенообразователей для тушения пожаров. Рекомендации [Электронный ресурс]: утв. МЧС России, 27.08.2007. – Режим доступа: <https://penoobrazovateli.ru/primenenie.pdf>
19. Perfluoroalkylated acids and related compounds (PFAS) in the Swedish environment: Chemistry, Sources, Exposure [Electronic resource] / U. Järnberg, K. Holmström, B. van Bavel, A. Kärrman. – 2007. – Mode of access: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:657980/FULLTEXT01.pdf>. – Date of access: 05.12.2016.
20. Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates / K. Prevedouros [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2006. – Vol. 40. – N1. – P. 32–44. <https://doi.org/10.1021/es0512475>
21. Seow, J. Fire Fighting Foams with Perfluorochemicals – Environmental Review. Final Version [Electronic resource] / J. Seow ; Department of Environment and Conservation Western Australia // Hemmingfire.com. – 2013. – Mode of access: http://www.hemmingfire.com/news/fullstory.php/aid/1713/Fire_Fighting_Foams_with_Perfluorochemicals. – Date of access: 05.01.2018.
22. Occurrence and use of highly fluorinated substances and alternatives. Report from a government assignment [Electronic resource] / KEMI. Swedish Chemicals Agency. – Arkitektkopia, Stockholm, 2015. – Mode of access: <https://www.kemi.se/global/rapporter/2015/report-7-15-occurrence-and-use-of-highly-fluorinated-substances-and-alternatives.pdf>. – Date of access: 05.05.2017.
23. Moody, C. A. Perfluorinated surfactants and the environmental implications of their use in fire-fighting foams / C. A. Moody, J. A. Field // Environmental Science and Technology. – 2000. – № 34. – P. 3864–3870. <https://doi.org/10.1021/es991359u>
24. FAQs Regarding PFASs Associated with AFFF Use at U. S. Military Sites [Electronic resource] / J. Field, C. Higgins, R. Deeb, J. Conder ; Developed for the Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP). – 2017. – Mode of access: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1044126.pdf>. – Date of access: 05.01.2018.
25. Analysis of Test Criteria for Specifying Foam Fire-fighting for Aircraft Rescue and Firefighting: DOT/FAA/ST-94/04. Final report [Electronic resource]. – 1994. – Mode of access: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a286381.pdf>. – Date of access: 20.11.2016.
26. Perfluorooctane Sulphonate. Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and Drawbacks: Final Report [Electronic resource] / Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Environment Agency for England and Wales. – RPA in association with BRE Environment, 2004. – Mode of access: <http://docplayer.net/25485180-Rpa-in-association-with-bre-environment-perfluorooctane-sulphonate-risk-reduction-strategy-and-analysis-of-advantages-and-drawbacks.html>
27. Estimated Quantities of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) in the United States [Electronic resource] / Fire Fighting Foam Coalition. – Arlington, 2004. – Mode of access: <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC7/POPRC7Followup/Requestsforinformation/RequestsforcommentsbyPOPRC7IWGs/CommentsonPFOS-inopenapplications/tabid/2746/ctl/Download/mid/8994/Default.aspx?id=11&ObjID=14392> – Date of access: 24.11.2016.
28. Place, B. J. Identification of Novel Fluorochemicals in Aqueous Film-Forming Foams (AFFF) Used by the US Military / B. J. Place, J. A. Field // Environmental Science and Technology. – 2012. – Vol. 46, № 13. – P. 7120–7127. <https://doi.org/10.1021/es301465n>
29. Теплов, Г. С. Пенное пожаротушение: история и перспективы / Г. С. Теплов // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 106–119.
30. Тендитный, И. В. Пенообразователь – значит Нижегородский / И. В. Тендитный // Пожарная безопасность. – 2011. – № 5(55). – С. 90–92.
31. Colville, S. Environmental Issues Associated with Defence Use of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) [Electronic resource] / S. Colville, N. McCarron; Environmental Stewardship, Environment, Heritage and Risk Branch. – 2003. – Mode of access: http://www.defence.gov.au/FOI/Docs/Disclosures/387_1415_Document.pdf
32. Импортные пенообразователи в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.penoobrazovateli.ru/index.php?menu=28>. – Дата доступа: 20.11.2016.
33. Pabon, M. J. Fluorinated surfactants: synthesis, properties, effluent treatment / M. J. Pabon, J. M. Corpart // Journal of Fluorine Chemistry. 2002, vol. 114, no 2, pp. 149–156. [https://doi.org/10.1016/S0022-1139\(02\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1139(02)00038-6)
34. The Future of Aqueous Film Forming Foam (AFFF): Performance Parameters and Requirements [Electronic resource] / R. S. Sheinson [et al.]. – Mode of access: https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/fire_research/R0201327.pdf. – Date of access: 24.11.2016.

35. UNEP/POPS/POPRC. 3/20/Add.5. Доклад Комитета по рассмотрению стойких органических загрязнителей о работе его третьего совещания. Добавление Оценка регулирования рисков, связанных с перфтороктановым сульфонатом [Электронный ресурс] / Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Третье совещание. Женева, 19–23 ноября 2007 года. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/80232799-Sc-unesp-pops-popr-3-20-add-5.html>
36. Per- and polyfluorinated substances in the Nordic Countries: Use, occurrence and toxicology / S. Posner [et al.]. – Nordic Council of Ministers, 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-542>
37. Guidance for the Inventory of Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) and related Chemicals under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants [Electronic resource]. – 2012. – Mode of access: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-GUID-NIP-2012-PFOS-Inventory.En.pdf>. – Date of access: 12.09.2017.
38. Background document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), PFOA salts and PFOA-related substances [Electronic resource] / European Chemicals Agency. – 2015. – Mode of access: https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/rest_pfoa_draftbd_en.pdf. – Date of access: 20.11.2016.
39. D'Agostino, L. A. Identification of novel fluorinated surfactants in aqueous film forming foams and commercial surfactant concentrates / L. A. D'Agostino, S. A. Mabury // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – Vol. 48, № 1. – P. 121–129. <https://doi.org/10.1021/es403729e>
40. Chemical Analysis of Selected Fire-Fighting Foams on the Swedish Market 2014 [Electronic resource] / Swedish Chemicals Agency, KEMI. – Stockholm, 2015. – Mode of access: <https://www.kemi.se/global/pm/2015/pm-6-15.pdf>. – Date of access: 18.11.2017.
41. Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams / X. Dauchy [et al.] // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 183. – P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.056>
42. Study of environmental and human health impacts of firefighting agents. A technical report [Electronic resource] / A. Kärrman [et al.]. – Sweden: Örebro University, 2016. – Mode of access: <https://oru.diva-portal.org/smash/get/diva2:1068268/FULLTEXT01.pdf>. – Date of access: 04.11.2017.
43. Organic fluorine content in aqueous film forming foams (AFFFs) and biodegradation of the foam component 6:2 fluorotelomermercaptoalkylamido sulfonate (6:2 FTSAS) / B. Weiner [et al.] // *Environmental Chemistry*. – 2013. – vol. 10, № 6. – P. 486–493. <https://doi.org/10.1071/en13128>
44. 6-2 Fluorotelomer alcohol aerobic biodegradation in soil and mixed bacterial culture/ J. Liu // *Chemosphere*. – 2010. – vol. 78, № 4. – P. 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.044>
45. UNEP/POPS/POPRC. 12/11/Add.2. Доклад Комитета по рассмотрению стойких органических загрязнителей о работе его двенадцатого совещания. Добавление. Характеристика рисков: пентадекафтороктановая кислота (КАС № 335-67-1, ПФОК, перфтороктановая кислота), ее соли и родственные ПФОК составы [Электронный ресурс] / Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Двенадцатое совещание, Рим, 19–23 сентября 2016 года. – Режим доступа: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.12-11-Add.2.Russian.docx>
46. Estimated Inventory of PFOS-based Aqueous Film Forming Foam (AFFF). 2011 update to the 2004 report entitled “Estimated Quantities of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) in the United States” [Electronic resource] / Fire Fighting Foam Coalition, Inc. – Arlington, 2011– Mode of access: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC13FU-SUBM-PFOA-FFFC-3-20180112.En.pdf>. – Date of access: 20.11.2016.
47. UNEP/POPS/POPRC. 2/17/Add.5. Доклад Комитета по рассмотрению стойких органических загрязнителей о работе на его втором совещании Дополнение. Характеристика рисков по перфтороктановому сульфонату [Электронный ресурс] / Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Второе совещание. Женева, 6–10 ноября 2006 года.– Режим доступа: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.2-17-Add.5.Russian.pdf>
48. Брусничкин, Г. Д. Обзор рынка пенообразователей для тушения пожаров / Г. Д. Брусничкин, Е. Н. Новожилов // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2004. – № 5. – С. 47–48.
49. Mehtonen, J. Identification of sources and estimation of inputs/impacts on the Baltic Sea, Summary Report Finland [Electronic resource] / J. Mehtonen, P. Munne, M. Verta. – 2012.– Mode of access: http://www.cohiba-project.net/publications/en_GB/publications/_files/87107384988993099/default/FI%20WP4%20National%20report%20FINAL.pdf. – Date of access: 20.11.2017.
50. Monitoring Perfluorinated Surfactants in Biota and Surface Water Samples Following an Accidental Release of Fire-Fighting Foam into Etobicoke Creek / C. A. Moody [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2001. – Vol. 36, № 4. – P. 545–551. <https://doi.org/10.1021/es011001+>
51. Occurrence and persistence of perfluorooctanesulfonate and other perfluorinated surfactants in groundwater at a fire-training area at Wurtsmith Air Force Base, Michigan, USA / C. A. Moody [et al.] // *Journal of Environmental Monitoring*. – 2003. – Vol. 5, № 2. – P. 341–345. <https://doi.org/10.1039/b212497a>
52. Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U. S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants / C. H. Xindi // *Environmental Science and Technology Letters*. – 2016. – Vol. 3, N 10. – P. 344–350. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00260>
53. A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) / S. Banzhaf [et al.] // *Ambio*. – 2017. – Vol. 46, № 3. – P. 335–346. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0848-8>

54. Perfluoroalkylated substances: PFOA, PFOS and PFOSA. Evaluation of health hazards and proposal of a health based quality criterion for drinking water, soil and ground water: Environmental Project No 1665 [Electronic resource] / The Danish Environmental Protection Agency. – 2015. – Mode of access: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2015/04/978-87-93283-01-5.pdf>. – Date of access: 02.12.2017.

55. Stage 3 Risk Assessment and Remediation Design at Army Aviation Centre Oakey Remediation Action Plan – Perfluorocarbons in Groundwater, Department of Defence [Electronic resource]. – Parsons Brinckerhoff, 2013. – Mode of access: http://www.defence.gov.au/id/_Master/docs/Oakey/0207AACOakey2013EI2-RAP-PFOSGroundwater-PBJun2013.pdf. – Date of access: 04.01.2018.

56. De Solla, S. R. Highly elevated levels of perfluorooctane sulfonate and other perfluorinated acids found in biota and surface water downstream of an international airport / S. R. De Solla, A. O. De Silva, R. J. Letcher // *Environment International*. – 2012. – Vol. 39, № 1. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.09.011>

57. LaSalle, J. L. Defence Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Environmental Management Preliminary Sampling Program: Final Report [Electronic resource] / J. L. LaSalle. – September 2016. – Mode of access: <http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/docs/General/PSPReports/PSPTownville.pdf>. – Date of access: 07.12.2017.

58. Stage 2C Environmental Site Assessment, Army Aviation Centre Oakey. Executive Summary [Electronic resource] / Department of Defence. – AECOM Australia Pty Ltd., 2016. – Mode of access: http://www.defence.gov.au/id/_Master/docs/Oakey/0207AACOakeyEI2-2016Stage2C-ESAFullReport.pdf. – Date of access: 04.01.2018.

59. Perfluorinated and Polyfluorinated Compounds in Lake Food Webs from the Canadian High Arctic / G. Lescord [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2015. – Vol. 49, № 5. – P. 2694–2702. <https://doi.org/10.1021/es5048649>

60. Perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain / European Food Safety Authority (EFSA) // *EFSA Journal*. – 2008. – Vol. 6, № 7. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.653>

61. Long-term environmental fate of perfluorinated compounds after accidental release at Toronto airport / E. Awad [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2011. – Vol. 45, № 19. – P. 8081–8089. <https://doi.org/10.1021/es2001985>

62. Exposure to per- and polyfluoroalkyl substances through the consumption of fish from lakes affected by aqueous film-forming foam emissions – A combined epidemiological and exposure modeling approach. The Saminor 2 Clinical Study / H. Solrunn [et al.] // *Environment International*. – 2016. – Vol. 94. – P. 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.030>

63. Influence of contaminated drinking water on perfluoroalkyl acid levels in human serum – A case study from Uppsala, Sweden / I. Gyllenhammar [et al.] // *Environmental Research*. – 2015. – № 140. – P. 673–683. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.05.019>

64. Identification, Tissue Distribution, and Bioaccumulation Potential of Cyclic Perfluorinated Sulfonic Acids Isomers in an Airport Impacted Ecosystem/ Y. Wang [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 50, № 20. – P. 10923–10932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01980>

65. Directive 2006/122/EC of the European Parliament and of the Council 12.12.2006 amending for the 30th time Council Directive 76/769/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (perfluorooctane sulfonates) [Electronic resource]: Standard EEC/2006/122 / European Union/Commission (EU/EC), December 27, 2006. – Mode of access: <https://standards.globalspec.com/std/1606115/eu-ec-ec-2006-122>.

66. Environmentally Responsible Use of Fluorinated Fire-Fighting Foam [Electronic resource]. – German Federal Agency, UBA, 2013. – Mode of access: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/fluorinated_fire-fighting_foams_schaumloeschmittel_engl_version_25.6.2013.pdf. – Date of access: 15.09.2017.

67. Perfluorooctanoic acid (PFOA) – main concerns and regulatory developments in Europe from an environmental point of view / L. Vierke, C. Staude, A. Biegel-Engler, W. Drost, C. Schulte // *Environmental Sciences Europe*. – 2012. – Vol. 24, № 1. – P. 1–16 <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-16>

References

1. *Revised Draft. Hazard Assessment of Perfluorooctanoic Acid and its Salts*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Pollution Prevention and Toxics Risk Assessment Division, 2002. Available at: <http://fluoridealert.org/wp-content/pesticides/pfoa.epa.nov.4.2002.pdf>

2. Results of Survey on Production and Use of PFOS, PFAS and PFOA, Related Substances And Products/Mixtures Containing These Substances. *OECD Environment, Health and Safety Publications. Series on Risk Management*, 2004, no. 19. Available at: <http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono%282005%291&doclanguage=en>. (accessed 2 December 2017).

3. *Analysis of the risks arising from the industrial use of Perfluorooctanoic acid (PFOA) and Ammonium Perfluorooctanoate (APFO) and from their use in consumer articles. Evaluation of the risk reduction measures for potential restrictions on the manufacture, placing on the market and use of PFOA and APFO. Final Report*. 2010 Available at: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/13037/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>. (accessed 18 November 2017).

4. Moody C. A., Field J. A. Determination of Perfluorocarboxylates in Groundwater Impacted by Fire-Fighting Activity. *Environmental Science and Technology*, 1999, vol. 33, no.16, pp. 2800–2806. <https://doi.org/10.1021/es981355+>

5. Ahrens L., Norström K., Viktor T., Cousins A. P., Josefsson S. Stockholm Arlanda Airport as a source of per- and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish. *Chemosphere*, 2015, no. 129, pp. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.136>
6. Filipovic M., Woldegiorgis A., Norström K., Bibi M., Lindberg M., Österås A.-H. Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. *Chemosphere*, 2015, vol. 129, pp. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.005>
7. Houtz E. F., Higgins C. P., Field J. A., Sedlak D. L. Persistence of Perfluoroalkyl Acid Precursors in AFFF-Impacted Groundwater and Soil. *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47, no. 15, pp. 8187–8195. <https://doi.org/10.1021/es4018877>
8. Moe M. K., Huber S., Svenson J., Hagenaars A., Pabon M., Trümper M., Berger U., Knapen D., Herzke D. The structure of the fire fighting foam surfactant Forafac®1157 and its biological and photolytic transformation products. *Chemosphere*, 2012, vol. 89, no. 7, pp. 869–875. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.012>
9. Bräunig J., Baduel C., Heffernan A., Rotander A., Donaldson E. c, Mueller J. F. Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 596–597, pp. 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
10. *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) Text and Annexes*. 2009. Available at: http://www.wipo.int/wipolex/ru/treaties/text.jsp?file_id=194846. (accessed 10 November 2017).
11. UNEP/POPS/POPRC.13/7/Add.2. *Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its thirteenth meeting. Risk management evaluation on pentadecafluorooctanoic acid (CAS No: 335-67-1, PFOA, perfluorooctanoic acid), its salts and PFOA-related compounds*. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Thirteenth meeting. Rome, 17-20 October 2017. Available at: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.13-7-Add-2-Russian.pdf>. (in Russian).
12. UNEP/POPS/POPRC.13/4. *Proposal to list perfluorohexane sulfonic acid (CAS No: 355-46-4, PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds in Annexes A, B and/or C to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Note by the Secretariat*. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Thirteenth meeting. Rome, 17-20 October 2017. Available at: <http://www.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC13/Overview/tabid/5965/ctl/Download/mid/18462/Default.aspx?id=41&ObjID=24663> (in Russian).
13. Navrotskii O. D., Zanevskaya Yu. V., Emel'yanov V. K., Vas'kovich T. S. A study of the corrosive activity of foam-forming compounds for extinguishing fires. *Chrezvychainye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya* [Emergency prevention and liquidation], 2010, no. 1, pp.98-105 (in Russian).
14. Lakhvich V. V., Varikov G. I. Investigation of the properties of film-forming foaming agents for extinguishing flammable liquids. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2014, no. 1 (19), pp. 73–81 (in Russian).
15. Bocharov V. V., Raevskaya M. V. Aqueous film forming foam contained perfluorinated surfactants. assessment of their biodegradability rate and investigation of utilization methods. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskije nauki = Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*, 2014, vol. 19, is. 5, pp. 1384–1387 (in Russian).
16. Bocharov V. V., Raevskaya M. V. Research of ecological and hygienic of aqueous film forming foam agents and detection of the products with the minimum environmental risks. *Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Estestvennye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*, 2016, vol. 37, no. 25, pp. 88–93 (in Russian).
17. *Instruction on the use of foaming agents for fire extinguishing*: approved by the Decree of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, 24.06.2009, № 32. Available at: [http://www.pravo.by/pdf/2009-209/2009-209\(043-057\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2009-209/2009-209(043-057).pdf) (in Russian).
18. *The procedure for application of foaming agents to fire extinguishing. Recommendations*: approved by MES of Russian Federation, 27.08.2007. Available at: <https://penoobrazovateli.ru/primenenie.pdf>. (in Russian).
19. Järnberg U., Holmström K., van Bavel B., Kärrman A. *Perfluoroalkylated acids and related compounds (PFAS) in the Swedish environment: Chemistry, Sources, Exposure*. 2007 Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:657980/FULLTEXT01.pdf>. (accessed 05 December 2016).
20. Prevedouros K., Cousins I. T., Buck R. C., Korzeniewski S. H. Sources, Fate and Transport of Perfluorocarboxylates. *Environmental Science and Technology*, 2006, vol. 40, no. 1, pp. 32–44. <https://doi.org/10.1021/es0512475>
21. Seow J. *Fire Fighting Foams with Perfluorochemicals – Environmental Review. Final Version*. Department of Environment and Conservation Western Australia, 2013. Available at: http://www.hemmingfire.com/news/fullstory.php/aid/1713/Fire_Fighting_Foams_with_Perfluorochemicals (accessed 05 January 2018).
22. KEMI. Swedish Chemicals Agency. *Occurrence and use of highly fluorinated substances and alternatives. Report from a government assignment*. Arkitektkopia, Stockholm, 2015. Available at: <https://www.kemi.se/global/rapporter/2015/report-7-15-occurrence-and-use-of-highly-fluorinated-substances-and-alternatives.pdf>. (accessd 05 May 2017).
23. Moody C. A., Field J. A. Perfluorinated surfactants and the environmental implications of their use in fire-fighting foams. *Environmental Science and Technology*, 2000, no. 34, pp. 3864–3870. <https://doi.org/10.1021/es991359u>
24. Field J., Higgins C., Deeb R., Conder J. *FAQs Regarding PFASs Associated with AFFF Use at U. S. Military Sites*. Developed for the Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP), 2017. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1044126.pdf>. (accessed 5 January 2018).

25. *Analysis of Test Criteria for Specifying Foam Fire-fighting for Aircraft Rescue and Firefighting*. DOT/FAA/ST-94/04. Final report. 1994. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1044126.pdf>. (accessed 20 November 2016).
26. Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Environment Agency for England and Wales. *Perfluorooctane Sulphonate. Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and Drawbacks: Final Report*. RPA in association with BRE Environment, 2004. Available at: <http://docplayer.net/25485180-Rpa-in-association-with-bre-environment-perfluorooctane-sulphonate-risk-reduction-strategy-and-analysis-of-advantages-and-drawbacks.html>
27. Fire Fighting Foam Coalition. *Estimated Quantities of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) in the United States*. Arlington, 2004. Available at: <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC7/POPRC7Followup/Requestsforinformation/RequestsforcommentsbyPOPRC7IWGs/CommentsonPFOSinopenapplications/tabid/2746/ctl/Download/mid/8994/Default.aspx?id=11&ObjID=14392> (accessed 24 November 2016).
28. Place B. J., Field J. A. Identification of Novel Fluorochemicals in Aqueous Film-Forming Foams (AFFF) Used by the US Military. *Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 46, no. 13, pp. 7120–7127. <https://doi.org/10.1021/es301465n>
29. Teplov G. S. Foam extinguishment: history and prospects. *Pozharnaya bezopasnost = Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 106–119 (in Russian).
30. Tenditnyi I. V. Foaming agent - means Nizhny Novgorod. *Pozharnaya bezopasnost = Fire Safety*, 2011, no. 5, pp. 90–92 (in Russian).
31. Colville S., McCarron N. *Environmental Issues Associated With Defence Use Of Aqueous Film Forming Foam (AFFF)*. Environmental Stewardship, Environment, Heritage and Risk Branch, 2003. Available at: http://www.defence.gov.au/FOI/Docs/Disclosures/387_1415_Document.pdf.
32. *Imported foaming agents in Russia*. Available at: <http://www.penoobrazovatel.ru/index.php?menu=28>. – Date of access: 20.11.2016.
33. Pabon M. J., Corpart J. M. Fluorinated surfactants: synthesis, properties, effluent treatment. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2002, vol. 114, no 2, pp. 149–156. [https://doi.org/10.1016/S0022-1139\(02\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1139(02)00038-6)
34. Sheinson R. S., Williams B. A., Green C., Fleming J. W., Anleitner R., Ayers S., Maranghides A., Barylski D. *The Future of Aqueous Film Forming Foam (AFFF): Performance Parameters and Requirements*. 2002 Available at: https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/fire_research/R0201327.pdf. (accessed 24 November 2016).
35. UNEP/POPS/POPRC.3/20/Add.5. *Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its third meeting. Addendum. Risk management evaluation on perfluorooctane sulfonate*. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Third meeting. Geneva, 19–23 November. 2007. Available at: <https://docplayer.ru/80232799-Sc-unep-pops-poprc-3-20-add-5.html> (in Russian).
36. Posner S., Roos, S., Brunn Poulsen P., Jörundsdóttir H. Ó., Gunnlaugsdóttir H., Trier X., Jensen S. *Per and polyfluorinated substances in the Nordic Countries: Use, occurrence and toxicology*. Nordic Council of Ministers, 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-542>
37. *Guidance for the Inventory of Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) and related Chemicals under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants*. 2011. Available at: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-GUID-NIP-2012-PFOS-Inventory.En.pdf>. (accessed 12 September 2017).
38. European Chemicals Agency. *Background document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on Perfluorooctanoic acid (PFOA), PFOA salts and PFOA-related substances*. 2015 Available at: <http://echa.europa.eu/documents/10162/fa20d0e0-83fc-489a-9ee9-01a68383e3c0>. (accessed 20 November 2016).
39. D'Agostino L. A., Mabury S. A. Identification of novel fluorinated surfactants in aqueous film forming foams and commercial surfactant concentrates. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 121–129. <https://doi.org/10.1021/es403729e>
40. Swedish Chemicals Agency, KEMI. *Chemical Analysis of Selected Fire-Fighting Foams on the Swedish Market 2014*. Stockholm, 2015. Available at: <https://www.kemi.se/global/pm/2015/pm-6-15.pdf>. (accessed 18 November 2017).
41. Dauchy X., Boiteux V., Bach C., Rosin C., Munoz J.-F. Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams. *Chemosphere*, 2017, vol. 183, pp. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.056>
42. Kärman A., Bjurlid F., Hagberg J., Ricklund N., Larsson M., Stableski J., Hollert H. *Study of environmental and human health impacts of firefighting agents. A technical report*. Örebro University, Sweden, 2016. Available at: <https://oru.diva-portal.org/smash/get/diva2:1068268/FULLTEXT01.pdf> (accessed 04 November 2017).
43. Weiner B., Yeung L. W. Y., Marchington E. B., D'Agostino L. A., Mabury S. A. Organic fluorine content in aqueous film forming foams (AFFFs) and biodegradation of the foam component 6:2 fluorotelomermercaptoalkylamido sulfonate (6:2 FTSAS). *Environmental Chemistry*, 2013, vol. 10, no. 6, pp. 486–493. <https://doi.org/10.1071/en13128>
44. Liu J., Wang N., Szostek B., Buck R. C., Panciroli P. K., Folsom P. W., Sulecki L. M., Bellin C. A. 6-2 Fluorotelomer alcohol aerobic biodegradation in soil and mixed bacterial culture. *Chemosphere*, 2010, vol. 78, no. 4, pp. 437–444. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.10.044>
45. UNEP/POPS/POPRC.12/11/Add.2. *Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its twelfth meeting. Addendum. Risk profile on pentadecafluorooctanoic acid (CAS No: 335-67-1, PFOA, perfluorooctanoic acid), its salts and PFOA-related compounds*. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Twelfth meeting. Rome, 19–23 September 2016. Available at: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.12-11-Add.2.Russian.docx>. (in Russian).

46. *Estimated Inventory of PFOS-based Aqueous Film Forming Foam (AFFF). 2011 update to the 2004 report entitled "Estimated Quantities of Aqueous Film Forming Foam (AFFF) in the United States"*. Fire Fighting Foam Coalition, Inc. Arlington, 2011 Available at: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC13FU-SUBM-PFOA-FFFC-3-20180112.En.pdf>. (accessed 20 November 2016).
47. UNEP/POPS/POPRC.2/17/Add.5. *Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its second meeting. Addendum. Risk profile on perfluorooctane sulfonate*. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Second meeting. Geneva, 6–10 November 2006. Available at: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-POPRC.2-17-Add.5.Russian.pdf>. (in Russian).
48. Brusnichkin G. D., Novozhilov E. N. *Market overview of foaming agents for fire extinguishing. Pozharovzryvobezopasnost = Fire and explosion safety*, 2004, no. 5, pp. 47–48 (in Russian).
49. Mehtonen J., Verta M., Munne P. *Summary report Finland - Identification of sources and estimation of inputs/impacts on the Baltic Sea*. 2012. Available at: http://www.cohiba-project.net/publications/en_GB/publications/_files/87107384988993099/default/FI%20WP4%20National%20report%20FINAL.pdf. (accessed 20 November 2017).
50. Moody C. A., Martin J. W., Kwan W. C., Muir D. C. G., Mabury S. A. Monitoring Perfluorinated Surfactants in Biota and Surface Water Samples Following an Accidental Release of Fire-Fighting Foam into Etobicoke Creek. *Environmental Science and Technology*, 2001, vol. 36, no. 4, pp. 545–551. <https://doi.org/10.1021/es011001+>
51. Moody C. A., Hebert G. N., Strauss S. H., Field J. A. Occurrence and persistence of perfluorooctanesulfonate and other perfluorinated surfactants in groundwater at a fire-training area at Wurtsmith Air Force Base, Michigan, USA. *Journal of Environmental Monitoring*, 2003, vol. 5, no. 2, pp. 341–345. <https://doi.org/10.1039/b212497a>
52. Xindi C. H., Andrews D. Q., Lindstrom A. B., Bruton T. A., Schaider L.I A., Grandjean P., Lohmann R., Carignan C. C., Blum A., Balan S. A., Higgins C. P., Sunderland E. M. Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants. *Environmental Science and Technology Letters*, 2016, vol. 3, no. 10, pp. 344–350. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00260>
53. Banzhaf S., Filipovic M., Lewis J., Sparrenbom C. J., Barthel R. A review of contamination of surface-, ground-, and drinking water in Sweden by perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Ambio*, 2017, vol. 46, no.3, pp. 335–346. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0848-8>
54. The Danish Environmental Protection Agency. *Perfluoroalkylated substances: PFOA, PFOS and PFOSA. Evaluation of health hazards and proposal of a health based quality criterion for drinking water, soil and ground water. Environmental Project No 1665*. 2015 Available at: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2015/04/978-87-93283-01-5.pdf>. (accessed 02 December 2017).
55. *Stage 3 Risk Assessment and Remediation Design at Army Aviation Centre Oakey Remediation Action Plan – Perfluorocarbons in Groundwater*. Department of Defence. Parsons Brinckerhoff, 2013. Available at: http://www.defence.gov.au/id/_Master/docs/Oakey/0207AACOakey2013E12-RAP-PFOSGroundwater-PBJun2013.pdf. (accessed 04 January 2018).
56. De Solla S. R., De Silva A. O., Letcher R. J. Highly elevated levels of perfluorooctane sulfonate and other perfluorinated acids found in biota and surface water downstream of an international airport. *Environment International*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.09.011>
57. LaSalle. J. L. *Defence Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Environmental Management Preliminary Sampling Program: Final Report*. September 2016. Available at: <http://www.defence.gov.au/Environment/PFAS/docs/General/PSPReports/PSPTownville.pdf>. (accessed 07 December 2017).
58. *Stage 2C Environmental Site Assessment, Army Aviation Centre Oakey. Department of Defence. AECOM Australia Pty Ltd.*, 2016. Available at: http://www.defence.gov.au/id/_Master/docs/Oakey/0207AACOakeyE12-2016Stage2C-ESAFullReport.pdf. (accessed 04 January 2018).
59. Lescord G. L., Kidd K. A., De Silva A. O., Williamson M., Spencer C., Xiaowa Wang, Muir D. C.G. Perfluorinated and Polyfluorinated Compounds in Lake Food Webs from the Canadian High Arctic. *Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 2694–2702. <https://doi.org/10.1021/es5048649>
60. European Food Safety Authority (EFSA). 60. Perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain. *EFSA Journal*, 2008, vol. 6, no. 7. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.653>
61. Awad E., Zhang X., Bhavsar S. P., Petro S., Crozier P. W., Reiner E. J., Fletcher R., Tittlemier S. A., Braekevelt E. Long-term environmental fate of perfluorinated compounds after accidental release at Toronto airport. *Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 45, no. 19, pp. 8081–8089. <https://doi.org/10.1021/es2001985>
62. Hansen S., Vestergren R., Herzke D., Melhus M., Evensen A., Hanssen L., Brustad M., Sandanger T. M. Exposure to per- and polyfluoroalkyl substances through the consumption of fish from lakes affected by aqueous film-forming foam emissions – A combined epidemiological and exposure modeling approach. The Saminor 2 Clinical Study. *Environment International*, 2016, vol 94, pp. 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.030>
63. Gyllenhammar I., Berger U., Sundström M., McCleaf P., Eurén K., Eriksson S., Ahlgren S., Lignell S., Aune M., Kotova N., Glynn A. Influence of contaminated drinking water on perfluoroalkyl acid levels in human serum – A case study from Uppsala, Sweden. *Environmental Research*, 2015, no. 140, pp. 673–683. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.05.019>
64. Wang Y., Vestergren R., Shi Y., Cao D., Lin Xu, Yaqi Cai, Xiaoli Zhao, Fengchang Wu. Identification, Tissue Distribution, and Bioaccumulation Potential of Cyclic Perfluorinated Sulfonic Acids Isomers in an Airport Impacted Ecosystem. *Environmental Science & Technology*, 2016., vol. 50, no. 20, pp. 10923–10932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01980>

65. Standard EEC/2006/122. *Directive 2006/122/EC of the European Parliament and of the Council 12.12.2006 amending for the 30th time Council Directive 76/769/EEC on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to restrictions on the marketing and use of certain dangerous substances and preparations (perfluorooctane sulfonates)*. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/1606115/eu-ec-eeec-2006-122>

66. *Environmentally Responsible Use of Fluorinated Fire-Fighting Foam*. German Federal Agency, UBA, 2013. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/fluorinated_fire-fighting_foams_schaumloeschmittel_engl_version_25.6.2013.pdf. (accessed 15 September 2017).

67. Vierke L., Staude C., Biegel-Engler A., Drost W., Schulte C. Perfluorooctanoic acid (PFOA) – main concerns and regulatory developments in Europe from an environmental point of view. *Environmental Sciences Europe*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-16>

Информация об авторе

Кухарчик Тамара Иосифовна – д-р геогр. наук, гл. науч. сотрудник, Институт природопользования, Национальная академия наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

Information about the author

Tamara I. Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Leading researcher, Institute for Nature Management, National Academy for Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com