

Перфторуглеродные соединения как потенциальные риски для окружающей среды и состояния здоровья человека (обзор)

© 2025. В. А. Козвонин^{1,2}, к. м. н., с. н. с., доцент,

Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с.,

Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Кировский государственный медицинский университет,

610998, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,

³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: va_kozvonin@vyatsu.ru

Одним из существенных аспектов воздействия человека на окружающую среду является синтез и применение веществ, ранее не встречающихся в природе в естественном виде. Проблема нарастает с появлением всё новых видов соединений и имеет тенденцию к дальнейшему неконтролируемому развитию. В статье рассматриваются вопросы, связанные с применением перфторуглеродных соединений (ПФУ) и их влиянии на окружающую среду как в глобальном плане (разрушение фреонами озонового слоя), так и в более узком аспекте (влияние на состояние здоровья человека). Перфторуглеродные соединения получают всё более широкое распространение в различных сферах деятельности: в промышленности, пищевой отрасли, медицине. При этом оценка их воздействия достаточно неоднозначна – мнения исследователей могут отличаться достаточно кардинально, от «ПФУ абсолютно инертны и не представляют никакого вреда», до «фторорганика – это ксеногенные вещества с потенциально высокими рисками». В связи с этим обзор литературы по данному вопросу – это актуальное исследование, представляющее анализ современного состояния проблемы на основании статей в ведущих отечественных и зарубежных изданиях, монографиях, документах нормативно-правовой базы и иных источниках.

Ключевые слова: фторуглероды, встречаемость, распространение, токсичность, деструкция.

Perfluorocarbon compounds as potential environmental and human health risks: a review

© 2025. V. A. Kozvonin^{1,2}

ORCID: 0000-0002-2447-6949^{*}

T. I. Kutyavina¹

ORCID: 0000-0001-7957-0636^{*}

T. Ya. Ashikhmina^{1,3}

ORCID: 0000-0003-4919-0047^{*}

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Kirov State Medical University,

112, K. Marksa St., Kirov, Russia, 610998,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: va_kozvonin@vyatsu.ru

The article discusses the problem of perfluorocarbon compounds (PFCs) application and their impact on the environment both globally (ozone layer destruction by freons, soil and water pollution) and narrowly (human health impact). PFCs have unique physical and chemical properties: extremely high chemical and thermal stability (do not decompose at temperatures up to 400–500 °C), resistance to acids and oxydation, non-flammability. PFCs are becoming increasingly widespread in industry, including the food industry, and even in medicine. Medical aspects of PFCs application are a highly promising research area. In clinical practice, PFCs are widely used primarily as inhalation anesthetics, prepara-

tions for diagnostics in Dopplerography, and magnetic resonance methods, as oxygen-carrying modules (in artificial blood substitutes), and as materials for implants. In scientific research, the possibility of using PFCs as components of wound coatings is being considered. The main attention of scientists is paid to the fact of long-term elimination of this type of compounds from the body and the possibility of remote effects. At the same time, the assessment of their effects is quite ambiguous – the opinions of researchers can differ quite dramatically, from “PFCs are absolutely inert and do not pose any harm” to “organofluorine are xenogenic substances with potentially high risks”. In this regard, the literature review on this issue is an up-to-date study that analyzes the current state of the problem based on articles in leading domestic and foreign publications, monographs, regulatory documents and other sources. The conducted literature review shows that the current research area is the study of PFCs toxicity for various living organisms. This research area is being developed on the basis of an interdisciplinary approach combining toxicology, medicinal chemistry and ecology.

Keywords: fluorocarbons, occurrence, distribution, toxicity, destruction.

Перфторуглеродные соединения (ПФУ) представляют собой класс органических соединений, в которых атомы водорода в углеводородной структуре заменены атомами фтора. Эти соединения обладают уникальными физическими и химическими свойствами: чрезвычайно высокой химической и термической стабильностью, не взаимодействуют с кислотами и сильными окислителями, устойчивы к кислороду, не горят и не разлагаются до температур 400–500 °C, что делает их широко используемыми в различных отраслях [1].

Применение ПФУ в различных отраслях промышленности, быту и медицине получает всё более широкое распространение: в производстве хладонов, средств пожаротушения, красок; в изготовлении печатных плат; применение в электронике; синтезе фторопластов, смазок и гидравлических жидкостей; как газ пропеллент в аэрозольных баллончиках; для борьбы с вредителями (пестициды и т.д.). Фтор является ключевым компонентом в производстве политетрафторэтилена (ПТФЭ), более известного как тефлон. Данный материал используется для производства посуды с антипригарным покрытием из-за способности тефлона выдерживать высокие температуры без разрушения и выделения вредных веществ. Кроме этого, ПТФЭ широко применяется при производстве одежды, придавая ей свойства водонепроницаемости [2]. В медицине ПФУ представлены ингаляционными анестетиками (севофлуран, энфлуран, изофлуран), материалами для сосудистой хирургии и искусственных сердечных клапанов, а также офтальмохирургии (лечение разрывов и отслоек сетчатки). Очень перспективными являются направления по разработке препаратов, используемых в качестве кровезаменителей (перфторан) и высокотехнологичных диагностических средств, применяемых в доплерографии и магнитно-резонансной томографии [3, 4].

Уникальность свойств ПФУ обуславливает их высокую востребованность в различных

сферах деятельности. Вместе с тем существуют потенциальные риски загрязнения окружающей среды чрезвычайно устойчивыми к естественным деструкторам веществами, что может привести к ухудшению состояния здоровья человека и других живых организмов.

Цель данной работы – систематизация данных о воздействии перфторсоединений на окружающую среду и оценка их влияния на здоровье человека.

Объекты и методы исследования

Поиск информации по применению ПФУ и их воздействию на окружающую среду проводили в базах данных Scopus (<http://www.scopus.com/>), Академия Google (<https://scholar.google.ru>), PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU (<http://www.elibrary.ru>), на поисковой платформе Роспатента (<https://searchplatform.rospatent.gov.ru/>). Для поиска использовали названия широко распространённых ПФУ, а также следующие слова и словосочетания, и их комбинации: «производство», «токсичность», «деструкция», «почва», «вода», «растения», «бактерии». Основное внимание уделялось работам, опубликованным за последние 25 лет. Анализ собранных данных представлен в соответствующих разделах обзора.

Методы обнаружения фторуглеродных соединений в окружающей среде

Среди аналитических методов определения ПФУ в объектах окружающей среды и продуктах питания наиболее широко применяется хроматография, в основном в сочетании с масс-спектрометрическим детектированием [5–8]. Кроме хроматографических методов для обнаружения и количественного анализа ПФУ используют колориметрические, флуориметрические и электрохимические методы

анализа, которые требуют меньше финансовых и трудовых затрат, а также разрабатывают портативные датчики для обнаружения ПФУ непосредственно в полевых условиях [7, 9, 10]. В работе [11] собраны сведения о существующих методах анализа ПФУ в воде, почве, воздухе, продуктах питания, косметике, одежде и других объектах анализа.

Основным недостатком большинства используемых аналитических методов является ограниченность количества определяемых ПФУ и чувствительность методов. Решение этих проблем является основной задачей при разработке новых методик определения ПФУ.

Глобальные риски применяемых фторуглеродных соединений для окружающей среды

В окружающей среде встречается большое количество фторированных органических соединений, при этом всего около 30 из них имеют естественное происхождение (входят в состав вулканических и геотермальных газов и некоторых минералов), но преобладающий перечень соединений имеет антропогенное происхождение [12]. Поскольку ПФУ – высокоустойчивые соединения, они могут длительное время сохраняться и перемещаться в окружающей среде без изменений своего состава. Соединения ПФУ обнаруживаются во всех природных средах, в различных странах независимо от уровня их экономического/промышленного развития, при этом одним из путей распространения ПФУ является глобальный атмосферный перенос на большие расстояния [13]. Основное депо ПФУ – водные объекты, но и другие природные среды испытывают неблагоприятное воздействие от находящихся в них ПФУ. Причиной основных экологических проблем, которые возникают при поступлении в окружающую среду ПФУ, являются антропогенные источники загрязнения.

Разрушение озонового слоя. Гипотеза о значимой роли хлорфторуглеродов (ХФУ, фреонов) в разрушении озонового слоя была впервые выдвинута в 1970-х гг. [14]. Согласно опубликованным данным, в результате фотодиссоциации ХФУ в стратосфере высвобождаются атомы хлора, которые участвуют в цепных реакциях с озоном, при этом на долю ХФУ приходится около 61% от общего количества озоноразрушающих веществ [15, 16].

Мероприятия по предотвращению разрушения озонового слоя ведут отсчёт с подписания Венской конвенции странами участница-

ми в 1985 г., а также Монреальского протокола в 1987 г. На основании этих международных документов с 1996 г. предусматривалось прекращение производства озоноразрушающих хлорфторуглеродов (в том числе пожаротушащих) и их дальнейшее применение. Однако, в ряде случаев, для особо важных видов технологий допускался выпуск ограниченного количества фреонов [17]. В России во исполнение международных соглашений установлены ограничения по производству и применению озоноразрушающих веществ на законодательном уровне (постановления Правительства РФ № 563 от 08.05.1996, № 490 от 05.05.1999, № 1000 от 19.12.2000, № 1368 от 09.12.1999; указание ГУГПС МВД России 20/2.2/1043 от 31.05.1995; постановление Минстроя России № 18-11 от 21.02.1997). В настоящее время производство озоноразрушающих фреонов существенно сокращено, разрабатываются и внедряются в промышленное производство новые группы фреонов, безопасные для окружающей среды [17–20], а также разрабатываются технологии по регенерации отработанных фреонов и их утилизации [21, 22].

Загрязнение почв. Загрязнение почв ПФУ, в первую очередь пахотных, представляет опасность для роста растений, их урожайности, а в дальнейшем и для здоровья человека. Эти вещества попадают в почвы в основном через поливную воду, вносимые удобрения, средства борьбы с вредителями, загрязнённые грунтовые воды, а также со средствами пожаротушения. При попадании в почвы часть ПФУ подвергается химическим преобразованиям и биоразложению, а более стабильные соединения, такие как пер- и полифторалкильные вещества, способны удерживаться в зоне поступления и медленно перемещаться вниз по почвенному профилю, сохраняясь в почве в течение длительного времени [12, 23]. Согласно исследованиям [24–27], ПФУ могут отрицательно влиять на рост, развитие и метаболические процессы растений. С экологической и сельскохозяйственной точек зрения загрязнение ПФУ имеет такие последствия, как биоаккумуляция в пищевых цепях, изменение плодородия почв [28, 29] и состава почвенных микробных сообществ [24, 29–31]. Сообщается [32], что в некоторых европейских винах, произведённых позднее 2010 г., отмечено увеличение концентрации трифторуксусной кислоты (ТФУК) – продукта распада ПФУ – по сравнению с 1988 г. почти в 10 раз (с 13 до 121 мкг/л). Авторы исследования связывают данную тенденцию

с использованием в 1990-е гг. в Европе ПФУ-пестицидов для борьбы с виноградными вредителями, последующим накоплением их в почве и поступлением продуктов распада пестицидов в воду и виноград. Рост концентраций ТФУК в почве, воде и растениях является серьёзной проблемой современности, так как это стойкое и подвижное вещество токсично для репродуктивной системы и может вызывать токсическое поражение печени [33]. Для уменьшения загрязнения природных сред ПФУ необходимы эффективные методы управления почвенными и водными ресурсами, развитие методов фиторемедиации и принятие нормативных мер. В связи с этим, актуальным направлением работ является поиск организмов-деструкторов ПФУ, а также растений, пригодных для ремедиации загрязнённых почв. В настоящее время такие работы малочисленны. Так, из почвы, загрязнённой отходами нефтехимического производства, выделен штамм бактерий *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-D, способный использовать перфтороктансульфонат в качестве единственного источника углерода и энергии с полной его утилизацией за 6 сут культивирования в жидкой среде [34]. О способности к деструкции ПФУ таких штаммов, как *Pseudomonas fluorescens* D2, *Acidimicrobium* A6 и ряда других сообщается в обзорной статье [35]. В работе [36] описаны существующие физические, химические и биологические способы ремедиации земель, загрязнённых ПФУ.

Загрязнение воды. Перфторуглеродные соединения часто обнаруживаются во всех типах водных сред, включая атмосферные осадки, пресные поверхностные и подземные воды, а также моря и океаны [37]. При поступлении в водные объекты ПФУ усваиваются фитопланктоном и другой водной растительностью и далее переносятся по пищевым цепям. Нарастание содержания ПФУ при продвижении от начала к вершине пищевой цепи подтверждено исследованиями [38–40]. Также в литературе приводятся данные, свидетельствующие о наличии дозозависимой связи между потреблением рыбы и содержанием ПФУ в крови людей, употребляющих эту рыбу в пищу. Так, на примере озера Мёне в Германии, загрязнённого ПФУ, было доказано, что концентрация ПФУ в плазме крови рыболовов, потребляющих рыбу 2–3 раза в месяц, была в 7 раз выше по сравнению с теми, кто вообще не потреблял рыбу из озера Мёне [41].

Токсическое действие различных ПФУ на гидробионтов описано в ряде работ. Так, описан механизм токсического воздействия

ПФУ на представителей высших трофических уровней, в том числе рыб [42]. Перфторуглеродные соединения способны индуцировать серию стрессовых реакций на клеточном уровне, включая реакцию различных антиоксидантных ферментов, вызывая избыток активных форм кислорода, реакцию перекисного окисления липидов; затем, вызывая разрушение мембран, повреждая внутреннюю структуру клеток и изменяя морфологию органоидов, могут регулировать изменения экспрессии генов, участвующих в различных видах жизнедеятельности; способны нарушать различные жизненно важные функции обмена веществ и оказывать токсическое воздействие на потомство по мере увеличения содержания ПФУ в организме родителей.

Определённый риск для здоровья человека представляет использование воды для питьевого водоснабжения из водных объектов, загрязнённых ПФУ. Авторами исследования [43] были проанализированы образцы питьевой воды из источников в различных регионах мира. В результате был сделан вывод о том, что содержание ПФУ выше в колодезной воде по сравнению с водопроводной и бутилированной.

Способы очистки воды также могут оказывать влияние на содержание ПФУ в воде. Использование фильтров с гранулированным активированным углем является одним из немногих методов очистки, который продемонстрировал значительное удаление ПФУ из воды [44, 45]. Однако, согласно работам [44, 46] содержание ПФУ в очищенной воде в ряде случаев может стать несколько выше, чем в исходной воде, поступающей на очистные сооружения. Авторы работы [46] доказали возможность образования таких ПФУ как перфтороктановая и перфтороктансульфоновая кислоты из веществ-предшественников во время обеззараживания воды хлором или озоном. Из этих данных следует, что в зависимости от состава исходной воды необходимо подбирать разные методы её очистки, чтобы избежать образования ПФУ в процессе водоподготовки.

В последние годы наблюдается увеличение количества исследований, направленных на изучение процессов биodeградации ПФУ в водной среде под воздействием бактерий и грибов [47–49].

Потенциальные риски для здоровья человека

Синтетические полимерные материалы, полученные с введением в их состав фтора,

такие как политетрафторэтилен (ПТФЭ, тефлон) широко используются в бытовых целях – например, для создания антипригарных покрытий кухонной посуды. Однако в последние годы всё больше внимания уделяется потенциальным рискам, связанным с выделением токсичных веществ из ПТФЭ при нагревании.

Одним из наиболее токсичных веществ, связанных с тефлоном, является перфтороктановая кислота (ПФОК). Это химическое соединение использовалось в процессе производства тефлона до 2013 г., но было постепенно выведено из употребления из-за потенциальных рисков для здоровья [50]. Перфтороктановая кислота относится к группе пер- и полифторалкильных соединений (ПФАС), которые известны своей устойчивостью в окружающей среде и способностью накапливаться в организме человека, что может вызывать серьёзные проблемы со здоровьем, включая заболевания печени, почек, щитовидной железы, а также повышать риск развития опухолей [51]. Хотя ПФОК больше не используется в производстве тефлона, её следы всё ещё могут присутствовать в старых изделиях.

Перфторизобутилен – ещё одно опасное вещество, которое может выделяться при нагревании тефлона. Оно обладает высокой токсичностью и может вызывать серьёзные поражения лёгких, вплоть до отёка [52].

Фтористый водород – ядовитый газ, который выделяется при термическом разложении тефлона. Он вызывает сильное раздражение дыхательных путей, кожи и глаз, а при длительном воздействии может привести к хроническим заболеваниям лёгких [53, 54].

При нагревании тефлонового покрытия до высоких температур (выше 260 °C) может происходить его термическая деструкция с выделением тетрафторэтилена (ТФЭ) – мономера, используемого для производства тефлона. Это вещество является менее токсичным, но может вызывать раздражение дыхательных путей, головокружение и тошноту [55, 56].

При температурах нагревания тефлоновых покрытий выше 350 °C процесс разложения тефлона резко ускоряется, и количество выделяемых токсинов значительно увеличивается [57]. Так же существенную роль играет и наличие повреждений поверхности покрытия, что приводит к увеличению выделения токсичных компонентов.

Важно отметить, что в обычных условиях приготовления пищи температура редко превышает 200 °C, что делает риск выделения токсичных веществ относительно низким. Однако

при неправильном использовании посуды, например, при перегреве или использовании на сильном огне, риск значительно возрастает.

Воздействие токсичных веществ, выделяемых из тефлонового покрытия, может иметь серьёзные последствия для здоровья – это поражение дыхательной системы, печени и почек, а также риски развития онкопатологии. Наиболее уязвимыми являются люди, которые регулярно имеют контакт с ПТФЭ, например, при производстве тефлоновой посуды и подвергающиеся воздействию высоких концентраций этих веществ. В ряде случаев у них развивается состояние, называемое «тефлоновый грипп», сопровождающееся раздражением верхних дыхательных путей, с возникновением кашля, одышки, в тяжёлых случаях – отёка лёгких [58].

Чтобы минимизировать риски, важно соблюдать правила эксплуатации тефлоновой посуды и рассматривать альтернативные материалы для приготовления пищи.

Кроме широкого применения в посуде, ПТФЭ также используют в производстве водо- и грязеотталкивающей одежды, обуви и снаряжения [59]. Несмотря на практические преимущества, применение тефлона в текстильной промышленности связано с рядом экологических и медицинских рисков.

Компоненты из тефлона, применяемые в одежде, контактируют непосредственно с кожными покровами и, хотя ПТФЭ считается инертным, в составе пропиток могут присутствовать токсичные примеси. В связи с этим у некоторых людей возможно развитие аллергических реакций, раздражения кожи и появление дерматитов [60]. Выделение токсичных веществ из одежды возможно при нагревании, в реальных условиях одежда редко нагревается до таких температур, но риск существует, например, при сушке феном или в горячей сушилке, а также нахождении рядом с открытым огнём (у костра).

Стирка и вывешивание одежды с мембранами из ПТФЭ на солнце может снизить содержание вредных компонентов, но при стирке происходит загрязнение воды – микрочастицы ПТФЭ могут попадать в сточные воды, а затем в питьевую воду. При этом проблемы утилизации заключаются и в том, что одежда с тефлоном не поддаётся биологическому разложению и десятилетиями сохраняется на свалках [61]. Сжигание отходов данного типа опасно, так как при горении выделяются фторированные токсины, вредные для лёгких и окружающей среды.

Виды одежды, в которой чаще применяется тефлон – это купальники, школьная форма, спортивная одежда, водонепроницаемая одежда (плащи и т. д.), обувь. Как правило, на этикетках указаны фирменные наименования материалов, такие как «Gore-Tex», «Teflon» или «Scotchgard», могут указывать на наличие ПТФЭ в этой одежде.

В качестве альтернативы применения тефлона в одежде можно использовать более безопасные материалы: полиуретановые мембраны, которые менее токсичны, но менее долговечны; натуральные воски (пчелиный воск, соевые пропитки) – экологичны, но требуют регулярного обновления; мембраны на основе полиэстера с гидрофильными покрытиями – не содержат ПФУ.

Использование тефлона в одежде создаёт долгосрочные риски для здоровья и окружающей среды. Несмотря на удобство водоотталкивающих свойств, предпочтение стоит отдавать более безопасным альтернативам, особенно при производстве детской одежды и товаров для активного отдыха.

В медицине ПФУ используются в производстве медицинских устройств и имплантов, препаратов искусственной крови, диагностических средств и хирургических материалов. Несмотря на их уникальные свойства, нахождение данных соединений в организме человека в ряде случаев может приводить к токсическим эффектам, включая эндокринные нарушения, иммуносупрессию и канцерогенез, микроэмболию.

Искусственные переносчики кислорода на основе ПФУ обладают высокой способностью растворять кислород, что делает их перспективными заменителями крови. В случаях массивных кровопотерь и невозможности переливания донорской крови могут применяться препараты на основе ПФУ. Наиболее известным отечественным препаратом является Перфторан (Россия) [62]. В настоящее время данный кровезаменитель не применяется из-за сложностей в производстве, потенциальных рисков тромбообразования и иммунных реакций [63].

Контрастные вещества из ПФУ применяются для диагностики в УЗИ, МРТ и рентгенографии с целью улучшения визуализации. К ним относятся: перфлуброн (Imagent) – используется для УЗИ сердца; перфтороктилбромид – применялся в рентгеноконтрастных исследованиях. Потенциальные риски использования данных соединений – это долгий период полувыведения (годы) и возможное

поражение почек и печени. Перфторуглеродные соединения выводятся из организма через ретикулоэндотелиальную систему, лёгкие и, в меньшей степени, через кожу [3]. Вместе с тем современные препараты для повышения контрастирования в УЗИ исследованиях, созданные по липосомальным технологиям, фактически не обладают вышеуказанными побочными эффектами. Например, препарат Соновью (Sonovue) представляет мелкодисперсную липосомальную эмульсию, в которой внутри каждой из липосом содержится микрообъём гексафторида серы, обеспечивающего резкое усиление контрастности сосудов малого диаметра при эхокардио- и доплерографии [64]. Эффект от препарата сохраняется приблизительно 5–10 мин с дальнейшим распадом на биоразлагаемые компоненты, при этом гексафторид серы удаляется через лёгкие, а элементы липидной оболочки метаболизируются в печени.

Соединение ПТФЭ (тефлон) – используется в сосудистой хирургии, стоматологии, применяется для создания имплантов; перфторполиэфиры входят в состав покрытий катетеров и стентов. Существуют определённые риски миграции микрочастиц в ткани, а также явления хронического воспаления из-за биоаккумуляции (накапливаются в печени, почках, крови, проникают через плацентарный барьер – опасность для плода). Период полураспада ПФОК в организме человека может составлять 3–5 лет. Из медицинских устройств, в которых потенциально возможно использование жидких ПФУ, следует отметить оксигенаторы для аппаратов искусственного кровообращения [65]. Применение в них ПФУ имеет ряд преимуществ, в сравнении с традиционными мембранами, такие как возможность стерилизации и многократность использования, меньшая деградация клеточных элементов крови.

Достаточно перспективными являются работы по применению ПФУ в качестве наружных средств, ускоряющих регенеративные процессы. Принцип лечебного действия основан в данном случае на формировании «кислородного мостика» между внешней средой и повреждёнными тканями. Разность парциальных давлений обеспечивает усиленную диффузию кислорода через слой жидкого ПФУ (перфтордекалин) на раневой поверхности вглубь тканей и приводит к локальному насыщению кислородом. Оксигенация способствует развитию сосудов микроциркуляторного русла, клеточным и тканевым реакциям,

приводящим к ускорению заживления ран различного генеза. Данные явления подтверждены в экспериментальных исследованиях. В моделях патологии на животных время заживления ожоговых ран при использовании ПФУ сокращалось на 30% в сравнении с группой контроля [66]. В клинической практике нанесение смеси ПФУ (перфтордекалин и карбогал) на ожоговую поверхность вызывало ускоренное заживление ран без образования рубцов и развития осложнений [67]. При этом авторами работ не выявлено отрицательных эффектов перфторсоединений при местном применении, в связи с чем можно рекомендовать введение данных ПФУ в фармреестр и дальнейшую разработку на их основе изделий медицинского назначения и лекарственных средств.

Жидкие и газообразные ПФУ широко используются в офтальмохирургии для лечения разрывов и отслоек сетчатки, при этом введённый интравитреально препарат либо рассасывается (перфторгазы), либо должен быть обязательно удалён спустя определённый срок.

Современные средства для наркоза представлены такими фторсоединениями, как, например, севофлуран, энфлуран, изофлуран. Они достаточно широко применяются при операционных вмешательствах и более безопасны, чем анестетики других классов.

Тем не менее, при использовании ПФУ в медицинской практике необходимы контроль за применением ПФУ в медицинских препаратах и устройствах, а также информирование врачей и пациентов о потенциальных рисках.

Заключение

Перфторированные соединения устойчивы к разложению и могут накапливаться в почве, воде и воздухе. Это приводит к загрязнению экосистем и может оказывать долгосрочное воздействие на флору и фауну.

Токсичные вещества, выделяемые из тефлоновых покрытий, могут быть опасны для человека при несоблюдении правил работы с посудой данного типа и использовании одежды.

Перфторсоединения, несмотря на их полезные свойства, представляют серьёзную угрозу для здоровья из-за своей устойчивости и потенциальной токсичности. В медицине необходимы дополнительные исследования для оценки долгосрочных рисков, а также разработка безопасных аналогов. Уже сейчас важно минимизировать использование ПФУ в медицинских изделиях и диагностике, особенно у беременных и детей.

Таким образом, проблема токсичности перфторсоединений требует междисциплинарного подхода, сочетающего токсикологию, медицинскую химию и экологию. При этом целесообразно ещё на этапе синтеза новых веществ разрабатывать способы их дальнейшей утилизации.

References

1. Krafft M.P., Riess J.G. Selected physicochemical aspects of poly- and perfluoroalkylated substances relevant to performance, environment and sustainability – part one // *Chemosphere*. 2015. V. 129. P. 4–19. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.08.039
2. Mohseni M., Lahiri S.K., Nadaraja A.V., Sundararaj U., Golovin K. Durable and comfortable superoleophobic fabrics utilizing ultra-short-chain fluorinated surface chemistry // *Chem. Eng. J.* 2023. V. 471. No. 29. Article No. 144726. doi: 10.1016/j.cej.2023.144726
3. Lambert E., Gorantla V.S., Janjic J.M. Pharmaceutical design and development of perfluorocarbon nanocolloids for oxygen delivery in regenerative medicine // *Nanomedicine*. 2019. V. 14. No. 20. P. 2697–2712. doi: 10.2217/nnm-2019-0260
4. Bakulin M.K., Darmova S.V., Bakulin V.M. Theory and practical use of perfluorocarbons “Blue blood” for deep cultivation of biodestructors // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 4. P. 4–8 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-4-004-008
5. Trojanowicz M., Koc M. Recent developments in methods for analysis of perfluorinated persistent pollutants // *Microchim. Acta*. 2013. V. 180. No. 11. P. 957–971. doi: 10.1007/s00604-013-1046-z
6. Bugsel B., Zweigle J., Zwiener C. Nontarget screening strategies for PFAS prioritization and identification by high resolution mass spectrometry: A review // *Trends Environ. Anal. Chem.* 2023. V. 40. P. e00216. doi: 10.1016/j.teac.2023.e00216
7. Jiménez-Skrzypek G., González-Sálamo J., Hernández-Borges J. Analytical methodologies and occurrence of per- and polyfluorinated alkyl substances – A review // *J. Chromatogr. Open*. 2023. V. 4. Article No. 100089. doi: 10.1016/j.jcoa.2023.100089
8. Melich R., Emmel P., Vivien A., Sechaud F., Mandaroux C., Mhedhbi S., Bussat P., Tardy I., Cherkaoui S. *In vitro* and *in vivo* behavioral evaluation of condensed lipid-coated perfluorocarbon nanodroplets // *Ultrasound Med. Biol.* 2024. V. 50. No. 7. P. 1010–1019. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2024.03.009
9. Rehman A.U., Crimi M., Andreescu S. Current and emerging analytical techniques for the determination of PFAS in environmental samples // *Trends Environ. Anal. Chem.* 2023. V. 37. P. e00198. doi: 10.1016/j.teac.2023.e00198
10. Khan R., Uygun Z.O., Andreescu D., Andreescu S. Sensitive detection of perfluoroalkyl substances using

MXene-AgNP-based electrochemical sensors // ACS Sens. 2024. V. 9. No. 6. P. 3403–3412. doi: 10.1021/acssensors.4c00776

11. Schöpel M., Jacobs G., Jordens J., van Ermen G., Voorspoels S., Krause M. Analytical methods for PFAS in products and the environment. Nordic Council of Ministers, 2022. 105 p. doi: 10.6027/temanord2022-510

12. Moirana R.L., Bayuo J., Rugaika A.M. Mobility of fluoride and fluorocarbons in the soil // Fluoride and Fluorocarbon Toxicity. Environmental Science and Engineering / Ed. N. Kumar. Singapore: Springer, 2024. P. 91–118. doi: 10.1007/978-981-97-7733-4_3

13. Kurwadkar S., Dane J., Kanel S.R., Nadagouda M.N., Cawdrey R.W., Ambade B., Struckhoff G.C., Wilkin R. Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution // Sci. Total Environ. 2022. V. 809. Article No. 151003. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151003

14. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone // Nature. 1974. V. 249. P. 810–812. doi: 10.1038/249810a0

15. Rowland F.S., Molina M.J. Chlorofluoromethanes in the environment // Rev. Geophys. 1975. V. 13. No. 1. P. 1–35. doi: 10.1029/RG013i001p00001

16. Carpenter L.J., Reimann S., Engel A., Montzka S., Burkholder J., Clerbaux C., Hall B., Yvon-Lewis S., Blake D., Dorf M., Dutton G., Fraser P., Froidevaux L., Hendrick F., Hu J., Jones A., Krummel P., Kuijpers L., Kurylo M., Liang Q., Mahieu E., M'hele J., O'Doherty S., Ohnishi K., Orkin V., Pfeilsticker K., Rigby M., Simpson I., Yokouchi Y. Update on ozone-depleting substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol // Scientific Assessment of Ozone Depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 55. Chapter 1. Geneva: World Meteorological Organization, 2014. P. 21–125.

17. Kologov A.V., Solovov V.N. Cleaning agents for rocket and spacecraft products. Search for an alternative to freons // Vestnik NPO "Tekhnomash". 2017. No. 3. P. 26–27 (in Russian).

18. Pronin V.A., Kovanov A.V., Kalashnikova E.A., Tsvetkov V.A. The prospect of using ozone-safe refrigerants with low global warming potential in scroll compressors. Part 1 // Omsk Scientific Bulletin. Series "Aviation-Rocket and Power Engineering". 2021. V. 5. No. 4. P. 9–16 (in Russian). doi: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-9-16

19. Antanenkova I., Svetogor S. Features of application of ORC-technology at compressor stations of metallurgical enterprises // Industrial Processes and Technologies. 2021. V. 1. No. 1. P. 61–76 (in Russian). doi: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-61-76

20. Yesyev A. Ozone safe refrigerants and their use in modern fleet // Znanstvena misel journal. 2022. No. 63-1. P. 41–48 (in Russian).

21. Prigorelov G.A., Kebets N.M., Grigorev D.Iu. Alternative ways to dispose of harmful refrigerants //

Research and development in design and technology: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: in 2 parts / Ed. T.V. Lebedeva. Kostroma: Kostromskoy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 92–95 (in Russian).

22. Xin M., Wang Q., Wang Q., Wang H., Muhammad F., Nie G. New adsorbent materials based on PILs for freon refrigerants // RSC Adv. 2024. V. 14. No. 1. P. 90–100. doi: 10.1039/D3RA07033F

23. Lee H., Mabury S.A. Sorption of perfluoroalkylphosphonates and perfluoroalkylphosphinates in soils // Environ. Sci. Technol. 2017. V. 51. No. 6. P. 3197–3205. doi: 10.1021/acs.est.6b04395

24. Ranjan A., Saxena P., Rajput V.D., Prazdnova E.V., Rath P., Arora J., Pahariya R., Chauhan A., Jindal T., Shukova S., Mandzhieva S.S., Minkina T. Chapter 11. Contamination of arable soils with perfluorinated compounds and their exposure-mediated modulations in plants // Emerging Contaminants: Sustainable agriculture and the environment / Eds. A. Kumari, V.D. Rajput, S.S. Mandzhieva, T. Minkina, E. van Hullebusch. Woodhead Publishing, 2024. P. 223–247. doi: 10.1016/B978-0-443-18985-2.00003-1

25. Liu H., Hu W., Li X., Hu F., Liu Y., Xie T., Liu B., Xi Y., Su Z., Zhang C. Effects of perfluoroalkyl substances on root and rhizosphere bacteria: phytotoxicity, phytomicrobial remediation, risk assessment // Chemosphere. 2022. V. 289. Article No. 133137. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133137

26. Fuchs S.I., Khitrin S.V., Devyaterikova S.V., Elkina T.S., Domracheva L.I., Nagovitsyna O.A., Pshenichnikova L.N. Study of the effect of fluoropolymer production wastes on barley Elf // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 52–58 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-052-058

27. Gornostaeva E.A., Fuks S.L. The effect of fluorinated compounds on living organisms (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 14–24. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-014-024

28. Lu B., Qian J., Hu J., Huang Y., Wang P., Shen J., He Y., Tang S., Liu Y., Zhang Y. Plant rhizosphere defense system respond differently to emerging polyfluoroalkyl substances F-53 Band PFOS stress // J. Hazard Mater. 2023. V. 443 (Pt. A). Article No. 130119. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130119

29. Huang H., Lyu X., Xiao F., Fu J., Xu H., Wu J., Sun Y. Three-year field study on the temporal response of soil microbial communities and functions to PFOA exposure // J. Hazard Mater. 2024. V. 476. Article No. 135008. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135008

30. Xu R., Tao W., Lin H., Huang D., Su P., Gao P., Sun X., Yang Z., Sun W. Effects of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) on soil microbial community // Microb. Ecol. 2022. V. 83. No. 4. P. 929–941. doi: 10.1007/s00248-021-01808-6

31. Samarasinghe S.V.A.C., Bahar M.M., Qi F., Yan K., Liu Y., Naidu R. Evaluating PFHxS toxicity to inver-

tebrates and microbial processes in soil // Environ. Chem. Ecotoxicol. 2023. V. 5. P. 120–128. doi: 10.1016/j.enceco.2023.03.003

32. “Alarming” increase in levels of forever chemical TFA found in European wines [Internet resource] <https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/23/alarming-increase-forever-chemical-tfa-european-wines> (Accessed: 16.04.2025).

33. Arp H.P.H., Gredelj A., Glüge J., Scheringer M., Cousins I.T. The global threat from the irreversible accumulation of trifluoroacetic acid (TFA) // Environ. Sci. Technol. 2024. V. 58. No. 45. P. 19925–19935. doi: 10.1021/acs.est.4c06189

34. Chetverikov S.P., Sharipov D.A., Korshunova T.Yu., Loginov O.N. Degradation of perfluorooctanyl sulfonate by strain *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-D // Appl. Biochem. Microbiol. 2017. V. 53. No. 5. P. 477–483 (in Russian). doi: 10.7868/S0555109917050026

35. La Fond J.A., Hatzinger P.B., Guelfo J.L., Millerick K., Jackson W.A. Bacteria ltransformation of per- and polyfluoroalkylsubstances: a review for the field of bioremediation // Environ. Sci.: Adv. 2023. V. 2. No. 8. P. 1019–1041. doi: 10.1039/D3VA00031A

36. Mahinroosta R., Senevirathna L. A review of the emerging treatment technologies for PFAS contaminated soils // J. Environ. Manage. 2020. V. 255. Article No. 109896. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109896

37. Ateia M., Maroli A., Tharayil N., Karanfil T. The over looked short- and ultrashort-chain poly- and perfluorinated substances: A review // Chemosphere. 2019. V. 220. P. 866–882. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.186

38. Lam N.-H., Cho C.-R., Lee J.-S., Soh H.-Y., Lee B.-C., Lee J.-A., Tatarozako N., Sasaki K., Saito N., Iwabuchi K., Kannan K., Cho H.-S. Perfluorinated alkylsubstances in water, sediment, plankton and fish from Korean rivers and lakes: Anation wide survey // Sci. Total Environ. 2014. V. 491–492. P. 154–162. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.045

39. Babut M., Labadie P., Simonnet-Laprade C., Munoz G., Roger M.-C., Ferrari B.J.D., Budzinski H. Evesivad per- and poly-fluoroalkyl compounds in freshwater fish from the Rhône River: Influence of fish size, diet, prey contamination and biotransformation // Sci. Total Environ. 2017. V. 605–606. P. 38–47. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.111

40. Li Y., Yao J., Pan Y., Dai J., Tang J. Trophic behaviors of PFOA and its alternatives perfluoroalkyl ether carboxylic acids (PFECAs) in a coastal food web // J. Hazard. Mater. 2023. V. 452. Article No. 131353. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131353

41. Hölzer J., Göen T., Just P., Reupert R., Rauchfuss K., Kraft M., Müller J., Wilhelm M. Perfluorinated compounds in fish and blood of anglersat Lake Möhne, Sauerland area, Germany // Environ. Sci. Technol. 2011. V. 45. No. 19. P. 8046–8052. doi: 10.1021/es104391z

42. Ma T., Wu P., Wang L., Li Q., Li X., Luo Y. Toxicity of per- and polyfluoroalkyl substances to aquatic

vertebrates // Front. Environ. Sci. 2023. V. 11. Article No. 1101100. doi: 10.3389/fenvs.2023.1101100

43. Jian J.M., Guo Y., Zeng L., Liang-Ying L., Lu X., Wang F., Zeng E.Y. Global distribution of perfluorochemicals (PFCs) in potential human exposure source – A review // Environ. Int. 2017. V. 108. P. 51–62. doi: 10.1016/j.envint.2017.07.024

44. Boone J.S., Vigo C., Boone T., Byrne C., Ferrario J., Benson R., Donohue J., Simmons J.E., Kolpin D.W., Furlong E.T., Glassmeyer S.T. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of the United States // Sci. Total Environ. 2019. V. 653. P. 359–369. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.245

45. Lenka S.P., Kah M., Padhye L.P. A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants // Water Res. 2021. V. 199. Article No. 117187. doi: 10.1016/j.watres.2021.117187

46. Xiao F., Hanson R.A., Golovko S.A., Golovko M.Y., Arnold W.A. PFOA and PFOS are generated from zwitterionic and cationic precursor compounds during water disinfection with chlorine or ozone // Environ. Sci. Technol. Lett. 2018. V. 5. No. 6. P. 382–388. doi: 10.1021/acs.estlett.8b00266

47. Grgas D., Petrina A., Štefanac T., Bešlo D., Landeka Dragičević T. A review: per- and polyfluoroalkyl substances – biological degradation // Toxics. 2023. V. 11. No. 5. Article No. 446. doi: 10.3390/toxics11050446

48. Yao S., Zhang H., Zhang J., Luo Y., Zhou Y., Kong Q. Microbial adaptation and biodegradation mechanisms of perfluorinated compounds in different functional zones of the Yellow River Delta, China // Process Saf. Environ. Prot. 2024. V. 187. P. 1037–1046. doi: 10.1016/j.psep.2024.04.142

49. Ye D., Wang Z., Qian X., Ouyang K., Wu D., Tang F., Hrynsphan D., Savitskaya T., Chen J. Biodegradation of per- and polyfluoroalkyl substances: microbes, enzymes and their interactions // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2025. V. 24. P. 43–62. doi: 10.1007/s11157-025-09721-x

50. Human health toxicity assessment for perfluorooctanoic acid (PFOA) [Internet resource] <https://www.epa.gov/sdwa/human-health-toxicity-assessment-perfluorooctanoic-acid-pfoa> (Accessed: 31.03.2025).

51. Fenton S.E., Ducatman A., Boobis A., DeWitt J.C., Lau C., Ng C., Smith J.S., Roberts S.M. Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: current state of knowledge and strategies for informing future research // Environ Toxicol Chem. 2021. V. 40. No. 3. P. 606–630. doi: 10.1002/etc.4890

52. Zhang Y., Fan L., Xi R., Mao Z., Shi D., Ding D., Zhang Z., Wang X. Lethal concentration of perfluoroisobutylene induces acute lung injury in mice mediated via cytokine storm, oxidative stress and apoptosis // Inhal Toxicol. 2017. V. 29. No. 6. P. 255–265. doi: 10.1080/08958378.2017.1357772

53. Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals: V. 4. Washington (DC): National Academies Press (US), 2004 [Internet resource] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207733/> (Accessed: 31.03.2025).
54. Brock W.J. Hydrogen fluoride: how toxic is toxic? (A hazard and risk analysis) // Proceedings of the Halon Options Technical Working Conference. Albuquerque: New Mexico Engineering Research Institute, 1999. P. 559–566 [Internet resource] https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R9902753.pdf (Accessed: 31.03.2025).
55. Tetrafluoroethylene [Internet resource] <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1819.pdf> (Accessed: 31.03.2025).
56. Tetrafluoroethylene: CAS No. 116-14-3 / Report on Carcinogens. 15th edition [Internet resource] <https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/roc/content/profiles/tetrafluoroethylene.pdf> (Accessed: 31.03.2025).
57. Alaboodi A.S., Sivasankaran S., Ammar H.R. Influence of heating temperature and time on mechanical-degradation, microstructures and corrosion performances of Teflon/granite coated aluminum alloys used for non-stick cookware // *Heliyon*. 2024. V. 10. No. 14. P. e34676. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34676
58. Pati S., Das D., Sinha A., Turuk J. Teflon flu: Is it a rising concern of only developed country? // *J. Integr. Med. Res.* 2024. V. 2. No. 4. P. 273–275. doi: 10.4103/jimr.jimr_49_24
59. Hao X., Zhang J., Guo Y. Study of new protective clothing against SARS using Semi-permeable PTFE/PU membrane // *Eur. Polym. J.* 2004. V. 40. No. 4. P. 673–678. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2003.11.014
60. Straková J., Brosché S., Brabcová K. Toxics in our clothing: forever chemicals in jackets and clothing from 13 countries. Arnika and IPEN, 2023. 48 p. [Internet resource] <https://ipen.org/sites/default/files/documents/clothing-chemicals-v12.pdf> (Accessed: 31.03.2025).
61. Wolf N., Müller L., Enge S., Ungethüm T., Simat T.J. Analysis of PFAS and further VOC from fluoropolymer-coated cookware by thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry (TD-GC-MS) // *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess.* 2024. V. 41. No. 12. P. 1663–1678. doi: 10.1080/19440049.2024.2406007
62. Perftoranum / Register of Russian Medicines [Internet resource] <https://www.rlsnet.ru/drugs/perftoran-5930> (Accessed: 31.03.2025) (in Russian).
63. Maevskiy E.I. Possible causes acute reactivity perfluorocarbon emulsion. Part 1. Perftoran // *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki*. 2016. No. 1 (39). P. 79–87 (in Russian).
64. Sonovue: patient information leaflet / Vidal – reference book of medicines [Internet resource] https://www.vidal.ru/drugs/sonovue_40866 (Accessed: 30.03.2025) (in Russian).
65. El'kin O.V., Bushuev A.N., Tolstobrov I.V., Fomin S.V., Shirokova E.S., Sazanov A.V., Kozvonin V.A., Kozulin D.A. Organofluorine compounds in artificial blood circulation systems // *Fascinating Fluoropolymers and Their Applications: Progress in Fluorine Science* / Eds. B. Ameduri, S. Fomin. Elsevier, 2020. P. 401–424. doi: 10.1016/B978-0-12-821873-0.00011-4
66. Kozvonin V.A., Dunaeva E.B., Kuklina S.A., Kolveatykh E.P., Pavleeva E.A., Kosnyreva O.V., Anisimov A.N., Koledaeva E.V. Design and evaluation in an experiment on the effectiveness of an aerosol-type wound dressing, including perfluorodecalin, collagen and hyaluronic acid // *Medical newsletter of Vyatka*. 2023. No. 3 (79). P. 45–50 (in Russian). doi: 10.24412/2220-7880-2023-3-45-50
67. Osipov A.P., Gorshkov Yu.V., Lyubimov A.N. Features of the combined use of carbogel and perfluorodecalin in the treatment of burns // *Medline.ru*. 2004. V. 5. Article No. 62. P. 200–201 [Internet resource] <https://www.medline.ru/public/art/tom5/art62.html> (Accessed: 17.02.2025) (in Russian).