

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 504.054

DOI 10.17513/use.38368

**АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ИНИЦИАТИВ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОСФАТОВ
КАК ИСТОЧНИКОВ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ****Баш П.В.***ФГБУН «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук», Санкт-Петербург, e-mail: polli-ant@mail.ru*

Целью работы является анализ и систематизация нормативно-правовых документов, касающихся мероприятий по ограничению использования соединений органических фосфатов, реализованных за рубежом в контексте снижения негативного влияния этих соединений на человека, живые организмы и природные среды. Настоящая статья посвящена актуальной проблеме, практически не освещенной в российском научном поле. В работе проведен анализ результатов современных научных исследований по воздействию соединений на человека и живые организмы, а также исследованы существующие зарубежные практики и нормативная база, направленная на ограничение использования и контроль данных соединений; проведена аналитика результатов исследований, доказывающих, что новый экотоксикант имеет все признаки персистентности, биоаккумуляции и токсичности. В статье приведены аргументы в пользу введения норм контроля данного экотоксиканта и примеры зарубежных инициатив по ограничению его использования. Работа освещает и систематизирует данные о доказанных негативных эффектах воздействия соединений органических фосфатов на человека и окружающую среду, а также подчеркивает необходимость и важность исследований этого персистентного экотоксиканта. На основе зарубежного опыта автором предложены методы контроля и снижения токсического воздействия соединений органических фосфатов посредством комплексных мер, направленных на минимизацию их использования для обеспечения здоровья человека и сохранения окружающей среды.

Ключевые слова: фосфорорганические эфиры, органические фосфаты, новый экотоксикант, пластификаторы, антипирены, токсичность, биоаккумуляция, нормирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 122041100086-5).

**ANALYSYS OF INTERNATIONAL INITIATIVES TO REGULATE
THE USE OF ORGANIC PHOSPHATES AS SOURCES OF ADVERSE
IMPACTS ON HUMAN HEALTH AND THE ENVIRONMENT****Bash P.V.***St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, e-mail: polli-ant@mail.ru*

The purpose of this paper is to analyze and systematize regulatory documents concerning measures to limit the use of organic phosphate compounds implemented abroad in the context of reducing the negative impact of these compounds on humans, living organisms and environment. The present article is devoted to the actual problem, practically not covered in the Russian scientific field. The paper analyzes the results of modern scientific research on compounds impact on humans and living organisms, as well as investigates existing foreign practices and regulatory framework aimed at limiting the use and control of these compounds; article analyzes the results of studies proving the signs of persistence, bioaccumulation and toxicity of new ecotoxicant. The article provides arguments for creating control norms for this ecotoxicant, as industrial use of these compounds still continues to grow, and gives an example of foreign measures to regulate its use. The paper highlights and systematizes data about organic phosphate compounds proven negative effects on humans and the environment, and emphasizes the need and importance of this persistent ecotoxicant deep research. Based on foreign experience, the author proposed methods of control and reduction organic phosphate compounds toxic effects through integrated measures aimed at minimizing their use to ensure human health and environment preservation.

Keywords: organophosphorus esters, organic phosphates, new ecotoxicant, flame retardants, plasticisers, toxicity, bioaccumulation, rationing

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 122041100086-5).

Введение

Органические эфиры ортофосфорной кислоты, называемые также органическими фосфатами или фосфорорганическими эфирами (ФОЭ), представляют собой класс синтетических химикатов, известных

превосходными огнезащитными и пластифицирующими свойствами и широко применяющихся в производстве товаров народного потребления. Тенденция к увеличению глобального потребления и универсальность органических фосфатов для

промышленного использования создают проблему их постоянного поступления в окружающую среду и делают их сравнимыми со стойкими органическими загрязнителями. Фосфорорганические антипирены стали основным антипиреном на рынке после того, как Стокгольмской конвенцией были признаны опасными веществами такие антипирены, как полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ) [1; 2]. Ввиду высокой токсичности последних во многих странах были введены правила, предусматривающие постепенный отказ от их производства и промышленного использования [3]. Пришедшие им на замену в качестве более экологичной альтернативы ФОЭ считались менее опасными, однако последние международные исследования показали их значительную токсичность и устойчивость в окружающей среде, что вызывает беспокойство научного сообщества [4].

При этом в России исследований с фокусом на данные соединения практически не проводилось. Подавляющее большинство научных работ в этой области, а также регулятивных мер по нормированию использования ФОЭ были разработаны зарубежными научными группами. В российском контексте вопрос изучения ФОЭ приобретает особую актуальность также в связи с укреплением торговых отношений с Китаем, который активно использует ФОЭ в производстве. Рост импорта продукции, содержащей эти соединения, увеличивает нагрузку на экосистемы, в то время как проблема остается практически не изученной в рамках отечественной науки.

Цель работы – систематический анализ данных о международном опыте регулирования и ограничения использования органических эфиров ортофосфорной кислоты как нового персистентного экотоксиканта. Поставлены задачи: комплексный обзор зарубежных исследований токсичности, биоаккумуляции и воздействия органических фосфатов на живые организмы; выявление и обоснование необходимости исследований загрязнителя в России и внедрения мер контроля за ним; поиск реализованных в мире мероприятий по минимизации использования соединений; разработка предложений по ограничению использования ФОЭ.

Материалы и методы исследования

В статье проведён систематический анализ 27 зарубежных исследований и нормативных актов последних лет, охватывающих экологические аспекты, связанные

с воздействием ФОЭ на живые организмы, проведен анализ инициатив по ограничению использования данной группы соединений в производстве готовой продукции.

Результаты исследования и их обсуждение

Органические эфиры ортофосфорной кислоты – группа органических соединений со структурой $O=P(OR)_3$, в которой R может быть представлена арильной, алкильной или хлоралкильной группой [5]. Галогенированные органические фосфаты используются в качестве антипиренов в мебели, пластмассах различного назначения, электронных устройствах, строительных материалах и текстиле, а алкилированные и ароматические фосфатные эфиры широко применяются в качестве пластификаторов в лакокрасочных изделиях, гидравлических жидкостях, пластмассах [1]. В таблице 1 представлены основные соединения ФОЭ, исследующиеся в большинстве работ, однако группа фосфорорганических эфиров насчитывает еще более 10 прочих соединений.

С развитием мировой промышленности и глобальным ростом потребления товаров количество поступающих в природную среду ФОЭ неуклонно растет [6]. Ввиду их повсеместного использования фосфорорганические соединения стали действительно широко распространены среди химических веществ антропогенного характера – ксенобиотиков, бесконтрольно поступающих в окружающую среду и становящихся ее токсикогенным фактором [7]. ФОЭ выделяются в ОС в процессе производства, транспортировки и применения на производстве [8]. Загрязнитель обнаруживается даже в местах, где точно отсутствуют его источники – в арктическом воздухе и донных отложениях, в Антарктических водорослях и воде [9; 10]. Это указывает на то, что ФОЭ могут перемещаться на большие расстояния с воздушными и водными массами, попадая в отдалённые районы, что свидетельствует об их устойчивости и способности к дальнему переносу, а знания об их воздействии и поведении в ОС остаются весьма скудными [10].

Попадая в организм, ФОЭ могут быть поглощены, метаболизированы или выведены. Однако если скорость поглощения организмом превышает скорость его выведения, происходит их биоаккумуляция. Ее степень зависит от таких факторов, как конкретное соединение ФОЭ, его концентрация в окружающей среде, содержание липидов в организме и продолжительность воздействия [11].

Таблица 1

Перечень основных фосфорорганических эфиров,
использующихся в качестве антипиренов и пластификаторов

Название соединения	Международное название	Аббревиатура	Номер CAS
Хлорированные органические фосфаты			
Трис(2-хлорэтил)фосфат	Tri(2-chloroethyl)phosphate	ТСЕР	115-96-8
Трихлорпропилфосфат	Tri(chloropropyl) phosphate	ТСРР	13674-84-5
Трис(1,3-дихлоропропил)фосфат	Tris(1,3-dichloroisopropyl)phosphate	ТДСРР	13674-87-8
Трис(1,3-дихлор-2-пропил)фосфат	Tris(2,3-dichloropropyl)phosphate	ТДСРРР	13674-96-7
Группа с алкильными заместителями			
Триметилфосфат	Trimethyl phosphate	ТМР	512-56-1
Триэтилфосфат	Triethyl phosphate	ТЕР	78-42-2
Триизобутил фосфат	Tri-iso-butyl phosphate	ТиВР	126-71-6
Три-н-бутилфосфат	Tri-n-butyl phosphate	ТнВР	126-73-8
Трибутилфосфат	Tributyl phosphate	ТВР	126-73-8
Трибутоксиэтил фосфат	Tributoxyethyl phosphate	ТВЕР	78-51-3
Трис(2-бутилоксиэтил)фосфат	Tris(2-butoxyethyl) phosphate	ТВОЕР	78-51-3
Трис(2-этилгексил)фосфат	Tris(2-ethylhexyl) phosphate	ТЕНР	78-42-2
Трипропилфосфат	Tripropyl phosphate	ТРР	115-86-6
Группа с арильными заместителями			
Дифенил(2-этилгексил)фосфат	2-ethylhexyl diphenyl phosphate	ЕНДРР	298-07-7
Трикрезилфосфат	Tricresyl phosphate	ТСrР	1330-78-5
Трифенилфосфат	Triphenyl phosphate	ТPhР	115-86-6
Трис(3-метилфенил)фосфат	Tris(methylphenyl) phosphate	ТМРР	13674-84-5

Примечание: составлено автором.

Возможность биоаккумуляции ФОЭ вызывает опасения, поскольку потенциально приводит к повышению концентрации этих соединений на высших трофических уровнях пищевой цепи. Хищники, крупные рыбы и морские млекопитающие накапливают высокие концентрации ФОЭ и, с большей вероятностью, испытывают выраженные неблагоприятные воздействия токсиканта на организм [11].

Накопившись в первичных продуцентах, аккумулярованные в пищевой цепи органические фосфаты могут быть также употреблены человеком. С потреблением рыбы и морепродуктов, и даже питьевой воды, человек может получить высокие концентрации ФОЭ, способные оказывать потенциально вредное воздействие на его здоровье. Помимо этого, промышленная обработка и упаковка пищевых продуктов также способствуют загрязнению продуктов питания органическими фосфатами [12]. В ряде работ выявлено, что ФОЭ проявляют канцерогенные, нейротоксичные, иммунотоксичные и эмбриотоксичные свойства. Также они

способны вызывать раздражение кожи и являются разрушителями эндокринной системы (эффекты изучены на объектах: человек, мыши и крысы, рыбы, дафнии) [2; 13].

Помимо доказанного вреда живым организмам и человеку, ФОЭ проявляют также признаки устойчивости. В недавнем исследовании изучены 20 соединений из группы в сточных водах 25 водоочистных станций в Китае. Большинство соединений обнаруживались на каждом этапе пятиступенчатой системы очистки воды, даже на последней стадии очистки. То есть вещество настолько устойчиво, что в процессе очистки сточных вод избавиться от него практически невозможно. Наиболее распространенными и часто встречающимися ФОЭ в сточных водах были ТСРР, ТСЕР, ТВОЕР и ТнВР, что связано с их более широким применением в потребительских и промышленных материалах [12].

Согласно международным конвенциям, вредные химические вещества должны быть запрещены в случае, если они отвечают следующим критериям: стойкость, лету-

честь (потенциал для переноса на большие расстояния), биомагнификация (накопление в пищевой сети) и токсичность (проявление токсических эффектов) [1-3]. Поэтому имеющиеся данные о присутствии ФОЭ во всех средах и их существенных токсических эффектах говорят о необходимости дальнейших исследований вещества с целью обоснования постепенного отказа от их использования и замены менее вредными соединениями для обеспечения здоровья экосистем [10; 11]. Однако мировое потребление ФОЭ, как химических соединений массового производства, продолжает неуклонно расти: с 1992 по 2015 год использование этих соединений в промышленности увеличилось со 100 000 до 680 000 тонн, а в 2018 году показатель превысил 1 050 000 тонн. Китайский рынок при этом составлял в среднем 30% общего объема использования антипиренов еще в 2014-2016 годах, а с наращиваниями темпов производства и мирового потребления эта цифра будет только увеличиваться [2].

По некоторым оценкам, к 2027 г. их мировое использование достигнет 3 400 000 т, при сохранении тенденции к ежегодному росту [11]. Как новый загрязнитель, обладающий биоаккумуляцией и токсичностью, он вызывает беспокойство и требует сокращения уровня использования в произ-

водстве. Однако до сих пор не существует глобальной программы контроля ФОЭ [14]. В таблице 2 представлены реализованные к моменту подготовки статьи инициативы, нормативные акты и требования, ограничивающие использование ФОЭ. Систематизированные данные могут служить опорой при проведении российских исследований и составлении национальной программы мониторинга.

Статья рассматривает негативное воздействие ФОЭ на человека и экосистемы и предлагает к рассмотрению инициативы по ограничению их использования в разных странах, таких как США, Канада и Китай. Международный опыт снижения уровня ФОЭ демонстрирует комплексный подход, включающий классификацию соединений как «опасные» [15-17], запреты на использование, установление нормативов для контроля загрязнения в ОС, ограничение содержания веществ в готовых товарах, повышение осведомленности покупателей и обязательную маркировку продукции, содержащей эти соединения [20; 21; 24]. В некоторых странах ряд соединений ФОЭ были признаны приоритетными загрязнителями или особо опасными веществами, что также отражает глобальную тенденцию к ужесточению контроля за ФОЭ [22; 26; 27].

Таблица 2

Международные инициативы по снижению использования органических эфиров ортофосфорной кислоты

Страна, нормативный акт и год принятия	Внедренная инициатива	Источник
Соединенные Штаты Америки (США) – Калифорния, 1992 год Proposition 65, California Safe Drinking Water Toxic Enforcement Act	Законом (штата Калифорния) о безопасной питьевой воде и токсичных веществах ТСЕР внесен в список как канцероген с 1992 года	[15]
Канада, 1999 год Canadian Environmental Protection Act	Три(1-хлор-2-пропил)фосфат (ТСРР) и три(1,3-дихлор-2-пропил)фосфат (ТДСРР) были признаны потенциально токсичными в соответствии с Разделом 64 СЕРА. Акт устанавливает, что эти соединения подлежат экологической и санитарной оценке и оценке риска для окружающей среды и здоровья человека	[16]
Страны Европейского союза (ЕС), 2006 год Регламент Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) № 1907/2006	В регламенте обращено внимание на проблему ФОЭ – соединения объявлены потенциально опасной группой загрязнителей, добавлены в качестве кандидатов на включение в список опасных веществ	[17]
ЕС, 2009 год Регулируется регламентами REACH	Три(2-хлорэтил)фосфат (ТСЕР) добавлен в список приоритетных загрязнителей	[18]
Канада, 2010 год Закон о безопасности потребительских товаров Канады	Согласно закону запрещен ТСЕР для использования для поролоновых набивок в игрушках и прочих детских товарах	[19]

США – Калифорния, 2011 год Proposition 65 – Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act.	Регулируют ФОО в рамках Закона, вводят ограничения на использование огнезащитных средств в потребительских товарах. Закон требует от компаний уведомлять о наличии в товарах химических веществ, для которых установлена канцерогенность или токсичность, отражающаяся на репродуктивной функции – к таким соединениям законом относится, в частности, ТДСРР. ТДСРР находится под наблюдением как потенциально опасный	[20]
США – Вашингтон, 2011-2017 Safer Products for Washington; The reporting list of Chemicals of High Concern to Children (CHCC list) – закон Департамента Экологии штата Вашингтон, запрещает использование некоторых антипиренов, определяет некоторые, как вызывающие беспокойство	Запрещено использование: ТДСРР – классифицирован возможным канцерогеном, влияет на развитие, 2011 год; ТДСРР – принят возможным канцерогеном, установлено влияние на эндокринную систему. Запрещен в 2013 году. Добавлены в список опасных веществ и контролируются: ТДСРР – токсичность для репродуктивной системы, способность к биоаккумуляции, добавлен в 2017 году; ТРР – воздействие на эндокринную и нервную систему	[21; 22]
Россия, 2015 год Государственный реестр потенциально опасных химических и биологических веществ РФ (ТДСРР попал в список в 1996 г., однако данные по его токсичности актуализированы в 2015 г.)	ТДСРР попал в Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ – присвоен 2 класс опасности, что классифицируется как высокая опасность вещества для здоровья человека. Для него определены: предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны, максимальная разовая концентрация (м.р.): 0,1 мг/м ³ ; ПДК рыб. хоз.: 0,14 мг/л, 4 (малоопасный) класс. Ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ) в атмосферном воздухе, (м.р.): 0,1 мг/м ³	[23]
Европейский союз, 2014 год Директива 2014/79/EU	Директивой вводятся ограничения содержания ТДСРР и ТДСРР в детских игрушках: разрешенное содержание соединений до 5 мг/кг	[24]
Европейский союз, 2015 год Директива 2014/79/EU, поправка	Поправка запрещает использование ТДСРР	[24]
США, 2017 год California Assembly Bill No. 2998 (AB 2998) Consumer products: flame retardant materials.	Штат Род-Айленд принял закон, запрещающий продажу мебели и мягких постельных принадлежностей с добавлением любых галогенорганических антипиренов. Сан-Франциско – принято постановление, запрещающее продажу мягкой и перетянутой мебели, а также детских товаров, содержащих огнезащитные химикаты. В штате Мэн вступил в силу запрет продажи мягкой мебели, содержащей антипирены	[25]
ЕС, 2018 год Регламент (ЕС) 2018/1513, дополнивший Приложение XVII к Регламенту REACH (№ 1907/2006)	Запрет на использование галогенированных антипиренов в корпусах или подставках электронных дисплеев. Данный запрет также требует обязательную маркировку всех антипиренов, использованных в компонентах дисплеев, для повышения прозрачности в цепочке поставок	[26]
ЕС, 2019 год Закон о контроле токсичных веществ, Поправки в Приложение XVII Регламента (ЕС) № 1907/2006	ТДСРР и ТРPhP были предложены REACH в качестве высокоприоритетных химических веществ для оценки рисков	[26]
США – Калифорния, 2020 год California Assembly Bill No. 2998 (AB 2998) Consumer products: flame retardant materials	Закон запрещает продажу в Калифорнии мебели, матрасов и некоторых детских товаров, содержащих огнезащитные химические вещества, включая некоторые ФОО, в концентрациях выше 1000 ppm	[25]
Китай, 2022 год Техническое руководство по определению критериев качества воды для пресноводных организмов HJ831-2022, Министерство экологии и охраны окружающей среды Китайской Народной Республики	Три(2-хлорэтил)фосфат (ТДСРР) добавлен в список приоритетных загрязнителей в Китае в рамках законодательства, направленного на контроль за новыми загрязняющими веществами	[27]

Примечание: составлено автором.

В России отмечается отсутствие систематических исследований ФОЭ с фокусом на экологические воздействия соединений, что делает проблему практически невидимой для научного сообщества. Это указывает на необходимость проведения национальных мониторинговых программ и разработки регулятивных мер. Однако одно из соединений ФОЭ также взято на контроль законами Российской Федерации – ТСЕР отнесен ко 2 классу опасности для человека, и хотя для водных организмов он классифицируется 4 классом, как малоопасный, однако подчеркивается, что превышение нормативов может вызвать нарушения в экосистемах. Включение в списки опасных веществ отражает растущую обеспокоенность их потенциальным воздействием на здоровье человека и окружающую среду [23]. По сравнению с зарубежными практиками российские меры все еще находятся на начальной стадии внедрения, однако существует потенциал для дальнейших исследований воздействия вещества на экосистемы и разработки мер по минимизации этого воздействия. В будущем возможно расширение списка признанных опасными соединений ФОЭ, применение маркировки продукции, повышение осведомленности потребителей о возможных токсических эффектах, ограничения для производителей на использование данных соединений.

Выводы

Судьба ФОЭ при высвобождении в природную среду вызывает широкую озабоченность, особенно в долгосрочной перспективе. Именно поэтому в последние десятилетия органические эфиры ортофосфорной кислоты, так же как и их предшественник, стали рассматриваться как потенциально опасный загрязнитель. Ввиду проявляемых токсических эффектов и значительного уровня содержания ФОЭ во всех экологических матрицах, задача включения соединений в стандарты качества окружающей среды становится все более актуальной. Всестороннее изучение вопроса необходимо для понимания риска, который новые загрязнители представляют для здоровья глобальной экосистемы и человека.

Новый персистентный экотоксикант требует комплексных подходов к регулированию его поступления в объекты ОС. Для обеспечения экологической безопасности, связанной с воздействием ФОЭ, может быть предложен ряд мероприятий для реализации в России.

1. Необходимо углубление знаний об экотоксиканте, стандартизация результатов всестороннего изучения ФОЭ в природных объектах России для оценки общего содержания в ОС и влияния на экосистемы. Составление сводной базы данных об органических фосфатах, как основы для построения системы мониторинга и скрининга конкретных соединений.

2. На основании полученных результатов может быть предложено внесение остальных (помимо уже включенного ТСРР) соединений ФОЭ в Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ; присвоение классов опасности соединениям. Первыми могут быть включены соединения наиболее опасной группы – хлоралкильные ФОЭ.

3. Внедрение информирования потребителей о негативном воздействии соединений ФОЭ и других ЗВ с целью стимулирования минимизации использования пластика, как источника этих веществ, путем корректирования потребительских привычек.

4. Расширение законодательства на остальные соединения группы ФОЭ, введение нормативов содержания в природных объектах и потребительских товарах.

5. Введение ограничивающих норм для промышленных производств на использование.

6. Проведение исследований, направленных на развитие технологий переработки имеющейся продукции, содержащей токсичные соединения ФОЭ.

7. Проведение исследований по поиску более экологичных альтернатив.

8. Исследования токсического воздействия альтернативных соединений на экосистемы.

В статье исследованы применяемые в мире инициативы по минимизации поступления соединений ФОЭ в ОС, ее практическая значимость заключается в том, что работа освещает мало изученную актуальную проблему и представляет научному сообществу и заинтересованным сторонам основные краткие сведения о природе, механизмах распространения в природных средах, токсичности и биоаккумуляционных способностях группы часто используемых в производстве соединений ФОЭ. Статья стремится выявить ключевые тенденции, успешные практики и пробелы в регулировании, чтобы предложить рекомендации для дальнейшего развития геоэкологических стратегий и совершенствования международных и национальных мер

по снижению риска применения данных веществ. Систематизированные данные статьи могут быть использованы для разработки отечественной программы мониторинга соединений органических фосфатов, для оценки рисков и принятия обоснованных решений в области экологической безопасности. В частности, информация, представленная в статье, может стимулировать отечественных исследователей к проведению дополнительных фундаментальных и прикладных исследований нового персистентного экотоксиканта, что позволит повысить информированность как граждан, так и законодательных органов и будет способствовать формированию стратегий по снижению или предотвращению негативного воздействия данных соединений на экосистемы и человека.

Список литературы

1. Da S., Wang J. Occurrence, Bioaccumulation, and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers Receiving Different Effluents // *Toxics*. 2024. Vol. 12. № 8. P. 612. DOI: 10.3390/toxics12080612.
2. Dou M., Wang L. A review on organophosphate esters: physicochemical properties, applications, and toxicities as well as occurrence and human exposure in dust environment // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 325. P. 116601. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116601.
3. Wan W., Zhang S., Huang H., Wu T. Occurrence and distribution of organophosphorus esters in soils and wheat plants in a plastic waste treatment area in China // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 214. P. 349-353. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.038.
4. Ma, Y., Xie Z., Lohmann R., Mi W., Gao G. Organophosphate Ester Flame Retardants and Plasticizers in ocean sediments from the North Pacific to the Arctic Ocean. // *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51. № 7. P. 3809-3815. DOI: 10.1021/acs.est.7b00755.
5. Bi R., Su G. Dietary intake assessment of known and unknown organophosphate esters in foodstuffs via high-resolution mass spectrometry // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 854. P. 158452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158452.
6. Paun I., Pirvu F., Iancu V.I., Niculescu M., Pascu L.F., Chiriac F.L. An Initial Survey on Occurrence, Fate, and Environmental Risk Assessment of Organophosphate Flame Retardants in Romanian Waterways // *Journal of xenobiotics*. 2023. Vol. 14. № 1. P. 31-50. DOI: 10.3390/jox14010003.
7. Кононова С.В., Несмеянова М.А. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами // *Биохимия*. 2002. Т. 67, № 2. С. 220-233. URL: <https://biochemistrymoscow.com/ru/archive/2002/67-02-0220/> (дата обращения: 15.11.2024).
8. Cheng F., Wang C., Pan H., Chen C., Huang W., Li S., Kung T. Levels of organophosphate flame retardants and their metabolites among 391 volunteers in Taiwan: difference between adults and children // *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. P. 1186561. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1186561.
9. Sagerup K., Leonards P., Routti H., Fuglei E., Aars J., Ström H., Gabrielsen G.W. Organophosphorous flame retardants in Arctic biota. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://brage.npolar.no/npolar-xmlui/bitstream/handle/11250/173195/OrganophosphorousFlameRetardants2011.pdf?sequence=1> (дата обращения: 11.10.2024).
10. Fu J., Fu K., Gao K., Li H., Xue Q., Chen Y., Jiang G. Occurrence and trophic magnification of organophosphate esters in an Antarctic ecosystem: insights into the shift from legacy to emerging pollutants // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 396. P. 122742. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122742.
11. Paun I., Pirvu F., Iancu V.I., Niculescu M., Pascu L.F., Chiriac F.L. An Initial Survey on Occurrence, Fate, and Environmental Risk Assessment of Organophosphate Flame Retardants in Romanian Waterways // *Journal of xenobiotics*. 2023. Vol. 14. № 1. P. 31-50. DOI: 10.3390/jox14010003.
12. Wang Y., Zhao Y., Han X., Wang J., Zhuang Y., Li W. A review of organophosphate esters in aquatic environments: levels, distribution, and human exposure // *Water*. 2023. Vol. 15. № 9. P. 6-15. DOI: 10.3390/w15091790.
13. Bekele T.G., Zhao H., Wang Q., Chen J. Bioaccumulation and trophic transfer of emerging organophosphate flame retardants in the marine food webs of Laizhou Bay, North China // *Environmental Science & Technology*. 2019. Vol. 53. № 22. P. 13417-13426. DOI: 10.1021/acs.est.9b03687.
14. Lai N.L.S., Kwok K.Y., Wang X.H., Yamashita N., Liu G., Leung K.M., Lam J.C. Assessment of organophosphorus flame retardants and plasticizers in aquatic environments of China (Pearl River Delta, South China Sea, Yellow River Estuary) and Japan (Tokyo Bay) // *Journal of hazardous materials*. 2019. Vol. 371. P. 288-294. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.029.
15. Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act (Proposition 65), California Health and Safety Code. 1986. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.p65warnings.ca.gov/fact-sheets/tris2-chloroethyl-phosphate-tcep> (дата обращения: 04.11.2024).
16. Canadian Environmental Protection Act № 54. 1999. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/evaluating-existing-substances/updated-risk-management-scope-tcpp-tccpp.html?utm> (дата обращения 01.11.2024).
17. REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) № 1907/2006. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20231201> (дата обращения: 05.11.2024).
18. SVHC Support document. TCEP. 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://echa.europa.eu/documents/10162/6d09755f-7fcb-4a00-b7ce-91ab45a2e5af> (дата обращения: 01.11.2024).
19. Canada Product Safety Act. [Электронный ресурс]. URL: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/c-1.68/> (дата обращения: 06.11.2024).
20. Proposition 65 – Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.p65warnings.ca.gov/fact-sheets/chlorinated-tris>. (дата обращения: 05.11.2024).
21. Rationale for Reporting List of Chemicals of High Concern to Children 2011–2017. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1804025.pdf#page=52> (дата обращения: 08.11.2024).
22. Safer Products for Washington. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://ecology.wa.gov/regulations-permits/reporting-requirements/childrens-safe-products-act-reporting/chemicals-of-high-concern-to-children> (дата обращения: 01.11.2024).
23. Государственный реестр потенциально опасных химических и биологических веществ РФ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rpohv.ru/online/detail.html?id=927> (дата обращения: 07.11.2024).
24. European Union law. Directive 2014/79/EU. [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32014L0079> (дата обращения: 01.11.2024).
25. California Assembly Bill No. 2998 (AB 2998). 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://leginfo.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=201720180AB2998 (дата обращения: 03.11.2024).
26. European Union law. Regulation (EU) 2018/1513. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32018R1513> (дата обращения: 01.11.2024).
27. Техническое руководство по определению критериев качества воды для пресноводных организмов HJ831-2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201102_805937.html (дата обращения: 01.11.2024).