

УДК 504.06:632.15  
DOI 10.17513/use.38345

## АНАЛИЗ ПРИСУТСТВИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭФИРОВ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ КАК ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ РАЗНЫХ РЕГИОНОВ МИРА)

Баш П.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»,  
Санкт-Петербург, e-mail: polli-ant@mail.ru*

Целями работы являются систематический анализ содержания органических эфиров фосфорной кислоты как загрязняющих веществ в разных регионах мира и средах, установление ключевых закономерностей в их накоплении и распространении. В статье проведены анализ и структурирование результатов современных научных исследований по токсическим эффектам органических фосфатов и опасности их повсеместного определения, дана оценка распространения их в окружающей среде на основании уровней содержания экотоксиканта в природных средах и живых организмах. Проведенная аналитика научных исследований нового загрязнителя необходима для представления существующей угрозы, связанной с ним, и важна для обоснования необходимости российских исследований в данной области. Хотя органические фосфаты считались относительно безвредными, в приведенных результатах исследований выявлены негативные воздействия на живые организмы, потенциальная способность к биоаккумуляции, представляющие угрозу для человека и здоровья экосистемы. Настоящий обзор формулирует проблему, требующую внимания исследователей в современной повестке глобального потребления. Статья подчеркивает необходимость изучения новой группы экотоксикантов в отечественных работах и освещает существующую проблематику их персистентности и повсеместного распределения в природных объектах.

**Ключевые слова:** фосфорорганические эфиры, экотоксикант, антипирены, пластификаторы, источники загрязнения, персистентность, уровни загрязнения

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

## ANALYSIS OF THE PRESENCE OF ORGANOPHOSPHATE ESTERS AS SOURCES OF ENVIRONMENTAL POLLUTION (VARIOUS WORLD REGIONS CASE STUDY)

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 work is to conduct a systematic analysis of the occurrence of organophosphate esters as environmental pollutants in different regions of the world and across various environments, as well as to identify key patterns in their accumulation and distribution. The article analyzes and structures the results of modern scientific research findings on the toxic effects of these organophosphates and the danger of their widespread determination, assesses their distribution in the environment based on the levels of ecotoxicant content in natural environments and living organisms. Analytics of new pollutant scientific researches is necessary to present existing threat from it, and is important to justify the need for Russian research in this area. Although organic phosphates were considered to be relatively harmless, the presented research results revealed negative effects on living organisms, potential bioaccumulation ability, posing a threat to humans and ecosystem health. This review articulates a problem that requires researchers' attention in the current agenda of global consumption. Article emphasizes the need to study a new ecotoxicant in domestic works, highlights the existing problematics of their persistence and ubiquitous distribution in natural objects.

**Keywords:** organophosphorus esters, ecotoxicant, flame retardants, plasticisers, pollution sources, persistence, pollution levels

*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 об-

ширный класс химических соединений, используемых в промышленности преимущественно в качестве антипиренов и пластификаторов. Благодаря своей универсальности, физико-химическим свойствам и от-

носителем низкой стоимости они нашли применение в производстве разных видов пластмасс, строительных материалов и покрытий, текстиля, электроники. Массовое использование в производстве органических фосфатов привело к их значительному высвобождению в окружающую среду (ОС), где в последнее время они всерьез рассматриваются как органический загрязнитель. Это вызывает озабоченность в связи с их токсичностью для человека и биоты. Этот загрязнитель обнаруживается повсеместно – в водных объектах, воздухе, атмосферных осадках, пищевых цепях [1, 2, 3]. Более того, в некоторых исследованиях ФОЭ определены в плаценте и грудном молоке человека [4, 5].

По состоянию на сегодняшний день работы по оценке содержания соединений во всех средах, изучению механизмов их распределения, аккумуляции и влияния на живые организмы (ЖО) и окружающую среду в большинстве ведутся учеными Китая, Америки, стран Европы. При этом экологический аспект присутствия органических фосфатов и их влияния на здоровье экосистем в Российской Федерации практически не был освещен, что делает проблему «невидимой» в локальном научном сообществе.

Инициирование отечественных работ, изучающих неотъемлемую составляющую потребительских товаров, также критически важно в свете современной повестки. Китай является одним из важнейших экономических партнеров России, и его серьезная озабоченность ФОЭ, подкрепленная рядом научных трудов, обуславливает необходимость проведения такого рода исследований на территории России.

**Целями работы** являются проведение всестороннего анализа присутствия органических эфиров фосфорной кислоты в качестве групп загрязняющих окружающую среду веществ в различных объектах и регионах мира, выявление основных закономерностей в распространении экотоксиканта. Настоящий обзор призван обозначить проблему и послужить основой для формирования базы знаний, иницирующей прикладные исследования в России в будущем.

#### **Материалы и методы исследования**

В статье проведен систематический анализ 20 зарубежных научных исследований, опубликованных в международных наукометрических базах данных за последние 14 лет, изучающих экологические аспекты использования ФОЭ, их распростране-

ние и потенциальное воздействие на живые организмы.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Органические фосфаты приобрели широкое распространение в разных отраслях промышленности благодаря своим эффективным огнезащитным характеристикам, низкой стоимости и обширному спектру применения. Эти соединения совместимы с другими химическими веществами, используемыми в процессе производства и обработки, а также являются относительно простыми в применении [6].

ФОЭ используются при производстве пластмасс для потребительских и промышленных товаров, включая электронное оборудование, детские игрушки, мебель, предметы для дома. Кроме того, они применяются для улучшения характеристик лакокрасочных материалов, текстильных покрытий, строительных материалов и гидравлических жидкостей [6, 7]. В таблице 1 представлен перечень важнейших соединений группы, наиболее часто рассматриваемых в исследованиях. Однако следует учитывать, что существуют еще более 10 прочих соединений, упоминаемых в научной литературе значительно реже и освещенных недостаточно подробно. Соединения ФОЭ структурированы в таблице 1 в соответствии с основными группами на основе их химической структуры.

Соединения группы ФОЭ используются главным образом для двух целей: в качестве антипиренов (применяются галогенированные соединения) и как пластификаторы (используются негалогенированные соединения). Алкил-замещенные фосфаты (ТВР, TiBP, TPhP и ТВЕР) в основном применяются как пластификаторы, смазочные материалы, а также в качестве антипиренов [6]. Органические фосфаты являются новым типом антипиренов, пришедшим на замену бромсодержащим антипиренам, использование которых было ограничено Стокгольмской конвенцией [7]. Используемые ранее полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ) постепенно были запрещены из-за их доказанной стойкости, дальнего атмосферного переноса, биоаккумуляции и токсичности [8].

ФОЭ, как казалось, были хорошей альтернативой ПБДЭ благодаря химическим свойствам, разнообразию и низкой цене производства. Однако новые соединения отнюдь не являются экологически безопасными.

Таблица 1

Перечень основных фосфорорганических эфиров,  
использующихся в качестве антипиренов и пластификаторов

| Название соединения                       | Международное название               | Аббревиатура | Номер CAS  |
|---|--------------------------------------|--------------|------------|
| <i>Хлорированные органические фосфаты</i> |                                      |              |            |
| 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    | ТДСРР        | 13674-96-7 |
| <i>Группа с алкильными заместителями</i>  |                                      |              |            |
| 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   |
| Трибутоксизтил 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   |
| <i>Группа с арильными заместителями</i>   |                                      |              |            |
| Дифенил (2-этилгексил) фосфат             | 2-ethylhexyl diphenyl phosphate      | ЕНДРР        | 298-07-7   |
| Трикрезилфосфат                           | Tricresyl phosphate                  | ТСрР         | 1330-78-5  |
| Трифенилфосфат                            | Triphenyl phosphate                  | ТРрР         | 115-86-6   |
| Трис (3-метилфенил) фосфат                | Tris(methylphenyl) phosphate         | ТМРР         | 13674-84-5 |

Источник: составлено автором.

Несмотря на свои преимущества для промышленного использования, в последнее время ФОЭ вызывают серьезное беспокойство ученых разных стран мира, так как они проявляют признаки персистентности в природной среде, аккумулируются в биоте и могут иметь долгосрочные негативные последствия для здоровья человека. Более того, судя по результатам некоторых исследований, исходя из текущих концентраций органических фосфатов в донных отложениях (ДО) Арктики, ФОЭ переносятся на отдаленные расстояния даже активнее, чем полибромированные дифениловые эфиры [8].

Многие из ФОЭ являются добавками в производстве материалов и не связаны химически с конечными продуктами, что приводит к их высвобождению в окружающую среду. Согласно исследованию, широкое использование ФОЭ способствует диффузному распространению в природной среде, а некоторые из соединений могут быть стабильными в ОС [9]. При попадании в ОС непрерывно происходит распределение ФОЭ, их миграция и трансформация. Выделение соединений может происходить в процессе различных производственных процессов,

при сбросе сточных вод, а также при утилизации отходов. Помимо этого, их источником может быть пластиковый мусор, попадающий в водные объекты, в таком случае также происходит медленное высвобождение органических фосфатов.

После выделения ФОЭ переносятся с атмосферными осадками и поверхностным стоком, течениями. В одном из исследований подтверждено, что выделение ФОЭ приводит к загрязнению почв соединениями группы не только в местах обработки отходов или на территории самих производств, но и на близлежащих природных объектах. Установлено, что пшеница фермерских хозяйств вблизи перерабатывающих заводов поглощала ФОЭ из почвы и накапливала эти соединения [10]. Повсеместное присутствие органических фосфатов в различных экосистемах и их высокая мобильность в окружающей среде усиливают важность их исследования, так как данные соединения широко распространены как в наружной, так и во внутренней среде (жилища и рабочие пространства). В таблице 2 показаны уровни присутствия ФОЭ в разных объектах и регионах мира.

Таблица 2

Уровни присутствия соединений органических эфиров фосфорной кислоты на примере разных тест-объектов

| Место отбора проб.<br>Кол-во целевых соединений   | Тест-объект  | Концентрация ФОЭ                                    | Преобладающие соединения   | Источник |
|---|--|---|--|----------|
| Китай, туристические курорты (12 соединений)  | Природные воды   | 18,52–3069,43 нг/л                                  | ТСЕР, ТСІРР, ТЕР, ТРНР, ТnBP, RDP                                    | [11]     |
|   | Донные отложения   | 3,20–568,76 нг/г                                    | ТСЕР, ТСІРР, ТЕР   |          |
| Залив Лайчжоу, Бохайское море, север Китая (20 соединений)                                  | Поверхностные морские воды   | 0,2–28,4 нг/л                                       | ТСЕР, ТСІРР, ТЕР, ТCтP – преобладали хлорированные ФОЭ (Cl-ФОЭ)      | [3]      |
|   | Донные отложения   | 0,1–96,9 нг/г сухого веса                           |  |          |
|   | Рыбы   | 21,1–3510 нг/г липидной массы                       |  |          |
| Реки Китая (13 соединений)  | Поверхностные воды   | 142,23–304,56 нг/л (среднее: 193,50)                | ТСЕР, ТСІРР, ТЕР, ТCтP   | [12]     |
|   | Рыбы   | 54,0–1080,88 нг/г сух. вес                          | ТСРР, ТЕР, ТCтP  |          |
| Регионы Китая: промышленные зоны, реки (17 соединений, во всех образцах преобладают Cl-ФОЭ) | Пыль пунктов переработки электронных отходов   | 8,706–34,872 мкг/г                                  | Cl-ФОЭ, TiBP и TnBP  | [13]     |
|   | Почвы пунктов переработки отходов  | 0,122–2,1 мкг/г                                     | Cl-ФОЭ   |          |
|   | Донные отложения   | 0,0197–0,234 мкг/г                                  |  |          |
|   | Реки Китая   | 0,69–10,62 мкг/л                                    | Cl-ФОЭ, ТВЕР   |          |
| Река Хуанхэ, Китай (12 соединений)  | Поверхностные воды   | 97,66–2433,30 нг/л                                  | ТСЕР, TDCІРР, ТЕР  | [14]     |
|   | Донные отложения   | 47,33–234,08 нг/г                                   |  |          |
| Районы на юге Китая (8 соединений)  | Почвы  | 74,7–410 нг/г<br>В среднем 255 нг/г                 | TDCІРР, ТСРР, ТСЕР   | [15]     |
|   | Растения   | 202–751 нг/г<br>В среднем 381 нг/г                  | TDCІРР, ТСРР, ТСЕР   |          |
| Центральная часть Северного Ледовитого океана   | Донные отложения (Данные представлены по сумме 8 исследуемых в работе ФОЭ, даны полученные диапазоны между разными точками отбора указанного моря) (ТСЕР составляет примерно 18% в каждой пробе) | 323–4658 пг/г сухого веса<br>Среднее: 1463 пг/г     | ТСЕР, TiBP, TnBP, TPhP, ТСРР, TDCP                                   | [8]      |
| Берингово море  |  | 836–2093 пг/г сухого веса<br>Среднее: 1207 пг/г     | ТСЕР, TiBP, TnBP, TPhP, ТСРР   |          |
| Канадская котловина   |  | 706–1855 пг/г сухого веса.<br>Среднее: 1190 пг/г    | ТСЕР, TiBP, TnBP, ТСРР   |          |
| Шельф Чукотского моря   |  | 159–998 пг/г сухого веса.<br>Среднее: 524 пг/г      | ТСЕР, TPhP, ТСРР   |          |
| Берингов пролив   |  | 292–408 пг/г сухого веса.<br>Среднее: 350 пг/г      | ТСЕР, TiBP, TnBP   |          |
| Азиатские страны – исследованы 89 образцов грудного молока (20 соединений)                  | Грудное молоко, Филиппины  | 70 нг/г липидной массы                              | Показано среднее суммарное ФОЭ. Более чем в 60% обнаружены ТСЕР TPhP | [5]      |
|   | Грудное молоко, Япония   | 22 нг/г липидной массы                              |  |          |
|   | Грудное молоко, Вьетнам  | 10 нг/г липидной массы                              |  |          |
| Жилые дома вдоль реки Колумбия, города Ванкувер и Лонгвью (22 соединения)                   | Сточная вода (из хозяйственных помещений жилых домов) (Cl-ФОЭ составляют примерно 72% общей суммы соединений)  | 47,1–561000 нг/л<br>В среднем 43500 нг/л            | Обнаружены 18 из 22 ФОЭ  | [16]     |
|   | Пыль жилых помещений (Cl-ФОЭ – 92% общей суммы соединений)   | 3,6–82700 нг/г сухого веса.<br>В среднем 4 820 нг/г | Обнаружены 21 из 22 ФОЭ  |          |

Источник: составлено автором.

В результате анализа 20 современных зарубежных исследований, представляющих последние данные, полученные в области органических фосфатов, сделан вывод, что наиболее высокие концентрации ФОЭ (по сравнению с остальными анализируемыми в соответствующих исследованиях природными объектами) были обнаружены на объектах, расположенных вблизи аэропортов, промышленных и сельскохозяйственных районов [12, 15], что свидетельствует о значительном вкладе антропогенного компонента в количество выделяемого ФОЭ. Это ощутимо выражается в более высоких уровнях ФОЭ в пробах из мест их активного использования. Например, наибольшие концентрации обнаружены в пыли из пунктов переработки электронных отходов, что подтверждает влияние локальных источников загрязнения – переработка пластмасс, электроники и текстиля [13]. Также отмечено изменение уровней содержания ФОЭ в воде в зависимости от сезона – в сухой сезон обнаруживалась концентрация соединений выше, чем во влажный период [14].

Различия в распределении ФОЭ обусловлены их физико-химическими свойствами. Например, в водной среде С1-ФОЭ обладают большей гидрофильностью по сравнению с другими группами. Трис(2-хлорэтил)фосфат (ТСЕР), трихлорпропилфосфат (ТЕР), и трис(1,3-дихлорпропил)фосфат (ТДСРР) с трудом трансформируются или разлагаются в водных экосистемах, что приводит к их более высокой концентрации в воде, чем в донных отложениях (ДО). ФОЭ с низкой растворимостью в воде адсорбируются на частицах ДО, аккумулируются и могут в дальнейшем даже служить вторичными источниками загрязнения [17].

Отдельно следует обратить внимание на результаты исследования донных отложений Северного Ледовитого океана. В работе говорится, что концентрации ФОЭ значительно выше, чем сумма ПБДЭ, определенная в этих же пробах. Это указывает на то, что органические фосфаты еще сильнее подвержены переносу на большие расстояния из регионов-источников [8, 18]. Четко определены признаки биоаккумуляции ФОЭ: живые организмы, будь то рыбы, моллюски или растения, накапливают ФОЭ в более высоких концентрациях по сравнению с окружающей средой [3, 12, 15]. Отмечается, что бентос и рыбы, обитающие на глубине, накапливают больше ФОЭ, чем пеллагические организмы и беспозвоночные, обитающие в толще. Зафиксировано

линейное и значительное увеличение коэффициентов биоаккумуляции с ростом липофильности, подтверждаются накопление и концентрация ФОЭ в пищевых цепях морских организмов [3, 19].

Обнаружение ФОЭ даже в организме человека подтверждает актуальность угрозы здоровью и обосновывает необходимость дальнейшего мониторинга соединений [4, 5]. Соединения группы ФОЭ показали нейротоксические эффекты, эмбриотоксичность, канцерогенность и влияние на фертильность, способность вызывать аллергии, причем ТСЕР был однозначно признан канцерогенным. Это свидетельствует о существующей угрозе организму человека, стоящая на вершине пищевой цепи. Освещенная в статье проблема является полем для широкого спектра исследований [20, 10].

### Заключение

Широкое распространение органических фосфатов на мировых рынках ввиду их активного использования при производстве пластмасс вызывает озабоченность ученых по всему миру, так как объем пластиковых отходов, образующихся в результате все набирающего темпы производства и потребления, неуклонно растет. Это ставит важную проблему сопутствующих пластику соединений, выделяемых в окружающую среду на всех стадиях жизненного цикла продукта: при производстве, использовании и утилизации. Также фосфорорганические эфиры могут попадать в почву, воду и атмосферу, где они способны оказывать токсическое воздействие на экосистемы и накапливаться в цепях питания, что несет возможность потенциального риска для здоровья человека.

В настоящем обзоре предпринята попытка сформулировать проблему появления нового персистентного экотоксиканта и продемонстрировать уровни его присутствия в окружающей среде. Согласно проведенному анализу современных зарубежных исследований, органические фосфаты представляют собой группу устойчивых загрязнителей, действительно проявляющих признаки персистентности и высокой способности к биоаккумуляции. Наличие этих свойств свидетельствует о возможных серьезных экологических последствиях, связанных с использованием этих соединений на производстве, что опровергает предположение о том, что ФОЭ являются более безопасной заменой ПБДЭ. Помимо этого, освещенная в статье проблема поднимает вопрос поиска более безопасных и эколого-

гически устойчивых альтернативных химических соединений для использования их как антипиренов и пластификаторов вместо фосфорорганических эфиров, токсичность которых доказана.

Практическая значимость настоящей статьи определяется тем, что она обращает внимание научного сообщества и заинтересованных сторон на недостаточно изученную, актуальную проблему присутствия фосфорорганических эфиров в объектах окружающей среды, что может быть внедрено как основа формирования эффективных природоохранных стратегий, направленных на снижение негативного воздействия органических фосфатов на окружающую среду и живые организмы. Проведенный анализ обосновывает значимость проблемы распространения фосфорорганических эфиров как серьезной угрозы для здоровья экосистемы. Представленные в работе данные могут быть востребованы научным сообществом, поскольку они указывают на перспективные направления для отечественных исследований персистентного экотоксиканта. Последующие работы могут быть направлены, к примеру, на оценку содержания фосфорорганических эфиров в природных средах России, на более глубокое понимание механизмов распространения и воздействия этой группы опасных загрязняющих веществ. Включение российских исследователей в актуальную проблематику позволит заполнить существующий пробел в научных данных и интегрировать отечественные исследования в международные инициативы по изучению малоизученных опасных органических загрязнителей.

#### Список литературы

1. Cristale J., Katsoyiannis A., Sweetman A.J., Jones K.C., Lacorte S. Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK) // *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 179. P. 194-200. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.04.001.
2. Полякова О.В., Лебедев А.Т. Антропогенные органические соединения в атмосфере Москвы // *Лаборатория и производство*. 2019. № 5. С. 104-113. DOI: 10.32757/2619-0923.2019.5.9.104.112.
3. 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.
4. Ding J., Xu Z., Huang W., Feng L., Yang F. Organophosphate ester flame retardants and plasticizers in human placenta in Eastern China // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 554. P. 211-217. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.171.
5. Kim J.W., Isobe T., Muto M., Tue N.M., Katsura K. Organophosphorus flame retardants (PFRs) in human breast milk from several Asian countries // *Chemosphere*. 2014. Vol. 116. P. 91-97. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.02.033.
6. Du J., Li H., Xu S., Zhou Q., Jin M., Tang J. A review of organophosphorus flame retardants (OPFRs): occurrence, bioaccumulation, toxicity, and organism exposure // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 22126-22136. DOI: 10.1007/s11356-019-05669-y.
7. Dou M., Wang L. A review on organophosphate esters: physiochemical 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.
8. 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.
9. Sagerup K., Leonards P., Routti H., Fuglei E., Aars J., Ström H., Gabrielsen G.W. Organophosphorous flame retardants in Arctic biota. 2011. The Norwegian Polar Institute study. [Электронный ресурс]. URL: <https://brage.npolar.no/npolar-xmlui/bitstream/handle/11250/173195/OrganophosphorousFlameRetardants2011.pdf?sequence=1> (дата обращения: 11.10.2024).
10. 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.
11. Cao X., Wang B., Liu X., Cheng J., Wang S. Study of the Spatiotemporal Variations, Source Determination, and Potential Ecological Risk of Organophosphate Esters in Typical Coastal Tourist Resorts in China // *Water*. 2023. Vol. 15. № 22. P. 3976. DOI: 10.3390/w15223976.
12. 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.
13. Hu Z., Yin L., Wen X., Jiang C., Long Y., Zhang J., Liu R. Organophosphate esters in China: fate, occurrence, and human exposure // *Toxics*. 2021. Vol. 9. № 11. P. 310. DOI: 10.3390/toxics9110310.
14. Li W., Yuan Y., Wang S., Liu X. Occurrence, spatio-temporal variation, and ecological risks of organophosphate esters in the water and sediment of the middle and lower streams of the Yellow River and its important tributaries // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 443. P. 130153. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130153.
15. Luo W., Yao S., Huang J., Wu H., Zhou H., Du M., Sun J. Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Agricultural Soils and Plants in the Coastal Areas of South China // *Toxics*. 2024. Vol. 12. №. 4. P. 286. DOI: 10.3390/toxics12040286.
16. Schreder E.D., La Guardia M.J. Flame retardant transfers from US households (dust and laundry wastewater) to the aquatic environment // *Environmental science & technology*. 2014. Vol. 48. № 19. P. 11575-11583. DOI: 10.1021/es502227h.
17. 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.
18. 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.
19. 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. 1790. DOI: 10.3390/w15091790.
20. 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.