



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 334–341

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 334–341

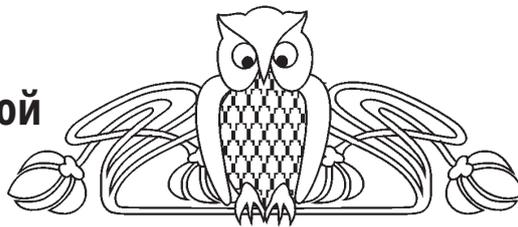
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-334-341>, EDN: ZBRCHL

Научная статья

УДК 57.044

## Биотестирование меламина с использованием многокомпонентной тест-системы



М. С. Савенкова , А. Д. Демешева, Е. В. Плешакова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Савенкова Мария Сергеевна, студент кафедры биохимии и биофизики, [savenkova.maria.s@yandex.ru](mailto:savenkova.maria.s@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0003-9237-974X>

Демешева Алина Дмитриевна, студент кафедры биохимии и биофизики, [alia\\_rosko@mail.ru](mailto:alia_rosko@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8983-4399>

Плешакова Екатерина Владимировна, доктор биологических наук, профессор кафедры биохимии и биофизики, [plekat@yandex.ru](mailto:plekat@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

**Аннотация.** В последние десятилетия вместо галогенсодержащих антипиренов стали шире использовать более безопасные антипирены, в том числе азотсодержащие соединения. Однако их экотоксичность слабо изучена. С помощью комплекса тест-организмов была оценена экотоксичность широко используемого азотного антипирена меламина в концентрациях, равных ПДК в воде (4 мг/л), 5ПДК (20 мг/л) и 10ПДК (40 мг/л). Оценка экотоксичности по дегидрогеназной активности тест-микроорганизма *Dietzia maris* AM3 показала стимулирующее воздействие меламина в концентрации, равной ПДК, концентрации 5ПДК и 10ПДК ингибировали активность дегидрогеназ на 19,3 и 10,5 %, что свидетельствовало о слабой токсичности. Токсического воздействия на протококковую водоросль *Chlorella vulgaris* Beijer не наблюдалось ни в одной из исследованных концентраций. Влияние растворов меламина на смертность ветвистоусых рачков *Daphnia magna* Straus отмечалось только при концентрации, равной 10ПДК, гибель дафний при этом составила 25 %. В ходе ряскового теста установлено ингибирующее воздействие меламина в концентрациях, равных ПДК и 5ПДК, на ростовые характеристики *Lemna minor* L., а также обнаружено значительное (на 47–52 %) снижение содержания общего хлорофилла в листочках при действии всех исследованных концентраций. Полученные новые сведения об экотоксичности меламина важны для прогнозирования острого и хронического воздействия антипиренов на организмы окружающей среды, включая человека.

**Ключевые слова:** меламина, экотоксичность, *Dietzia maris* AM3, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia magna* Straus, *Lemna minor* L.

**Для цитирования:** Савенкова М. С., Демешева А. Д., Плешакова Е. В. Биотестирование меламина с использованием многокомпонентной тест-системы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 334–341. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-334-341>, EDN: ZBRCHL

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Bioretesting of melamine using a multi-component test system

М. С. Savenkova , А. Д. Demysheva, Е. В. Pleshakova

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Maria S. Savenkova, [savenkova.maria.s@yandex.ru](mailto:savenkova.maria.s@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0003-9237-974X>

Alina D. Demysheva, [alia\\_rosko@mail.ru](mailto:alia_rosko@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8983-4399>

Ekaterina V. Pleshakova, [plekat@yandex.ru](mailto:plekat@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

**Abstract.** In recent decades, halogen-containing flame retardants have been gradually replaced by safer flame retardants, including nitrogen-containing compounds. However, their ecotoxicity is poorly studied. The ecotoxicity of melamine, a widely used nitrogen flame retardant, at concentrations equal to MPC in water (4 mg/L), 5 MPC (20 mg/L) and 10 MPC (40 mg/L) was assessed in this study using a complex of test organisms. The assessment of ecotoxicity using the dehydrogenase activity of *Dietzia maris* AM3 as a test microorganism revealed a stimulating effect of melamine at a concentration equivalent to the MPC; concentrations of 5 and 10 MPC inhibited the activity of dehydrogenases by 19.3% and 10.5%, respectively, indicating low toxicity. No toxic effects were observed on protococcal algae *Chlorella vulgaris* Beijer at any of the tested concentrations. The effect of melamine solutions on the mortality of crustaceans *Daphnia magna* Straus was noted only at a concentration of



10 MPC, and the mortality rate was 25%. *Lemna* growth inhibition test showed that melamine at concentrations equal to the MPC and 5 MPC had an inhibitory effect on the growth of *Lemna minor* L. It also caused a significant decrease (by 47–52%) in the total chlorophyll content in fronds when exposed to all studied concentrations of melamine.

**Keywords:** melamine, ecotoxicity, *Dietzia maris* AM3, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia magna* Straus, *Lemna minor* L.

**For citation:** Savenkova M. S., Demysheva A. D., Pleshakova E. V. Biotesting of melamine using a multi-component test system. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 334–341 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-334-341>, EDN: ZBRCHL

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Применение антипиренов является наиболее распространённым и результативным способом снижения горючести пластмассовых и других полимерных материалов. В настоящее время наблюдается тенденция к переходу от использования галогенсодержащих, в частности бромированных антипиренов, к безгалогеновым антипиренам (halogen-free flame retardants), что обусловлено их более высокой экологической безопасностью [1]. Меламин (1,3,5-триазин-2,4,6-триамин) – это азотсодержащий органический антипирен, который наиболее часто используется в нейлонах, полиолефинах, пенополиуретанах, огнестойких красках, текстиле и обоях. Он применяется также в производстве ламинированных панелей, лакокрасочных покрытий, адгезивов, в качестве абразивного чистящего средства. Из меламина формальдегидных смол изготавливают посуду. Также он наряду с другими представителями семейства триазинов ранее рассматривался в качестве удобрения в связи высоким содержанием азота.

Минерализация меламина с образованием легкодоступных форм азота осуществляется преимущественно микроорганизмами, однако исследования показали, что разложение в почве не всегда происходит полностью, даже при инокулировании штаммами-деструкторами триазинов, в результате чего происходит накопление триазинов [2]. Данные относительно стойкости меламина в почве неоднозначны. Показано, что период его полураспада составляет от 46 до 211 дней при 20°C в зависимости от типа почвы, и, соответственно, данный антипирен может рассматриваться как нестойкий или очень стойкий [3]. В воде период его полураспада составляет 39 дней [4]. Биodeградация меламина происходит путём последовательного гидролитического дезаминирования аминокрупп, присоединённых к ароматическому кольцу, с образованием аммелина, аммелида и циануро-

вой кислоты и с последующим расщеплением кольца [5, 6]. Биodeградация приводит к выделению аммония, который может накапливаться в среде [7].

Данные исследований говорят о широком присутствии меламина в окружающей среде, где он содержится преимущественно в воде [8, 9]. Основной вклад в содержание меламина в поверхностных водах вносит промышленность. ПДК меламина в воде составляет 4 мг/л, признак вредности – санитарно-токсикологический, класс опасности – 2 (высокоопасные вещества) [10].

Меламин не метаболизируется в организме, не проявляет генотоксичности и канцерогенных свойств. Однако при длительном употреблении оказывает нефротоксическое и гепатотоксическое действие. Определено, что высокие дозы меламина приводят у млекопитающих к образованию нерастворимых кристаллов в мочевыделительной системе и почечной недостаточности [11], особенно в присутствии циануровой кислоты. Показано влияние меламина на проапоптотические пути и выработку активных форм кислорода (АФК) [12, 13]. В то же время экотоксичность меламина изучена недостаточно [3]. Актуально всестороннее исследование токсичности меламина, как крайне распространённой добавки к различным материалам, особенно его экотоксичности, воздействия на водные и почвенные организмы.

Цель настоящих исследований состояла в комплексной оценке токсичности меламина в водных растворах при концентрациях, равных ПДК (4 мг/л), 5ПДК (20 мг/л) и 10ПДК (40 мг/л), в сравнении с контролем. Был использован следующий комплекс тест-организмов, включающий представителей различных таксономических и трофических групп: типичный почвенный микроорганизм *Dietzia maris* AM3, зелёная протокочковая водоросль *Chlorella vulgaris* Beijer, ветвистоусые рачки *Daphnia magna* Straus и водное растение *Lemna minor* L. (ряска малая). Все варианты были изучены минимум в трёх повторностях.



## Материалы и методы

Для исследования был взят химически чистый кристаллический меламина (Торговый дом «Воткинский завод теплоизоляционных материалов», Россия).

Определение экотоксичности меламина с использованием широко распространённого почвенного микроорганизма *Dietzia maris* AM3 основано на определении активности ферментов дегидрогеназ. Методика описана в работе [14]. Поскольку дегидрогеназы высокочувствительны к действию различных токсикантов, отклонение их активности от контрольного значения может служить в качестве показателя токсичности. Микробный штамм *D. maris* AM3 культивировали в виде изолированных колоний в течение 3 сут. на ГРМ-агаре для последующего приготовления в стерильном физиологическом растворе суспензии тест-культуры с мутностью 0,7 ед. по Мак-Фарланду. Затем осуществляли инкубацию микроорганизма в присутствии 2,3,5-трифенилтетразолийхлорида (2,3,5-ТТХ) в течение 6 сут. в стационарных условиях при  $t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  в смеси растворов следующего состава: 1,2 мл 1/15 М  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ; 0,5 мл 0,1 М глюкозы; 0,1 мл 0,1 М  $\text{MgSO}_4$ ; 0,2 мл 0,5 % 2,3,5-ТТХ; 1 мл микробной суспензии *D. maris* AM3 и 1 мл водного раствора меламина с конечными концентрациями, равными 4, 20 и 40 мг/мл. Об активности дегидрогеназ судили по концентрации в среде культивирования 2,3,5-трифенилформазана (2,3,5-ТФФ) – окрашенного продукта восстановления 2,3,5-ТТХ. Экстрагирование 2,3,5-ТФФ из смеси проводили ацетоном, экстракт колориметрировали при  $\lambda = 440\text{ нм}$ . Количество образованного тест-микроорганизмом 2,3,5-ТФФ в мг/мл рассчитывали по калибровочной кривой, и по отклонению этого показателя от контрольного оценивали токсичность растворов меламина. При разнице показателей до 10% раствор антипирена считали не токсичным, разница в 10–30% указывала на слабую токсичность раствора, от 30 до 50% – на среднюю степень, а выше 50 % – на высокую степень токсичности раствора антипирена.

Планктонные водоросли являются чувствительными индикаторами токсического воздействия различных веществ, поступающих в воду. Определение экотоксичности с помощью *Chlorella vulgaris* Beijer проводилось в соответствии со стандартизированной методикой [15], которая основана на регистрации различий в

величине оптической плотности тест-культуры водоросли при  $\lambda = 565,5\text{ нм}$  после 22 ч культивирования в присутствии исследуемого вещества и в контрольных растворах. Для проведения тестирования была взята культура в экспоненциальной фазе роста, доведённая до необходимого значения оптической плотности 2%-ной средой Тамия. Предварительно был проведён контроль на чувствительность культуры к модельному токсиканту – бихромату калия ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ). Культивирование осуществлялось в многокуветном культиваторе водорослей КВМ-05. Токсичными считались растворы, вызывающие снижение на 20% и более или увеличение на 30% и более величины оптической плотности тест-культуры водоросли по сравнению с контролем.

Исследования с использованием *Daphnia magna* Straus осуществлялись в соответствии с методикой [16], основанной на определении гибели дафний, регистрируемой по иммобилизации в течение 15 с, в остром 72-часовом эксперименте. Для биотестирования использовали синхронизированную одновозрастную, генетически однородную культуру. Исследуемые растворы с дафниями помещали в устройства для экспонирования рачков УЭР-03. При смертности дафний ниже 10 % считалось, что тестируемые растворы меламина не оказывают острого токсического действия; значение смертности, превышающее 50 %, свидетельствует об остром токсическом действии.

Биотестирование с помощью водного растения ряска малой (*Lemna minor* L.) осуществлялось по методике, изложенной в [17] и адаптированной на кафедре биохимии и биофизики СГУ имени Н. Г. Чернышевского. Для каждой исследуемой концентрации меламина было взято по 5 экземпляров для каждой из трёх повторностей. Выбирали только зелёные, здоровые растения с 3 дочерними листочками и приблизительно одинаковых размеров.

В ходе эксперимента на 2-, 4- и 7-е сут. фиксировались морфометрические и ростовые характеристики: число растений (колоний), листочков (суммарный прирост ряски) и корней, размер листочков и корней, также отмечали общее состояние растений, изменение окраски листочков, сравнивая растения в опыте с контрольными растениями. Через 7 сут. проводили исследование суммарного содержания хлорофиллов *a* и *b* спектрофотометрически по величине поглощения спиртового экстракта при 665 нм. Содержание хлорофиллов рассчитывали по формуле (1):



Хлорофиллы, мг/г =  $(D_{665} \times 0,085 \times 5) / 0,51 \times a$ , (1)  
 где  $D_{665}$  – величина поглощения исследуемого раствора при 665 нм; 0,085 – количество хлорофилла в стандартном растворе, мг/мл; 5 – объём экстракта, мл; 0,51 – величина поглощения стандартного раствора хлорофилла;  $a$  – навеска листьев, г.

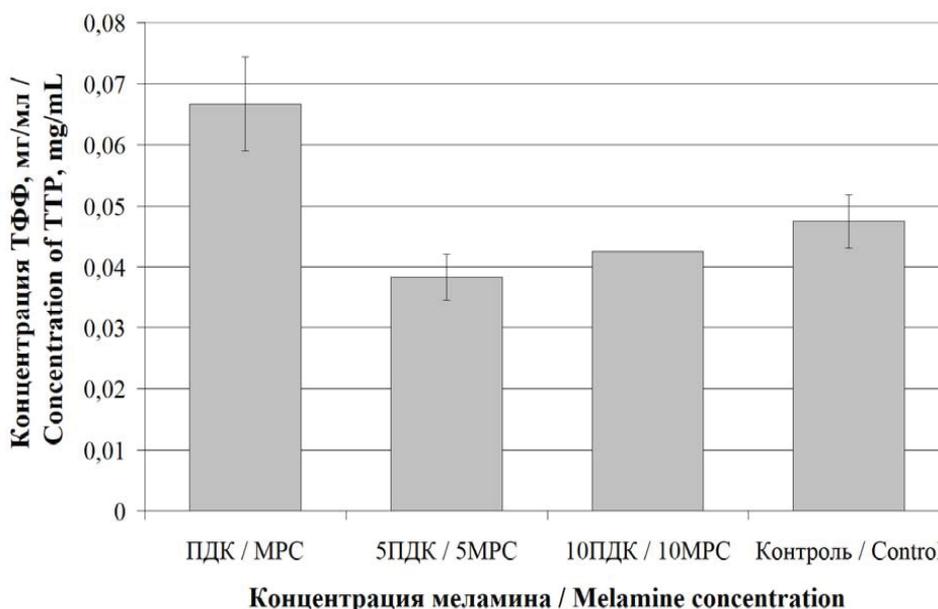
Для всех полученных данных вычисляли средние значения, для сравнения которых использовали показатели стандартного отклонения и наименьшей существенной разницы. Статистическую обработку результатов проводили при  $p \leq 0,05$  с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Корреляционный анализ осуществляли с использованием программы STATISTICA 7 (TIBCO Software Inc. 2017, Statsoft Russia).

### Результаты и их обсуждение

Было установлено, что по сравнению с контролем меламина в концентрации, равной ПДК, оказал стимулирующее воздействие на активность дегидрогеназ *D. maris* AM3, которая была на 40,4% выше, чем в контрольном варианте (рисунок). Меламина содержит 67% азота (по массе). Известно, что некоторые почвенные микроорганизмы способны использовать его в качестве источника азота [18]. Вероятно,

увеличение ферментативной активности тест-микроорганизма связано с этим явлением. Полученные результаты согласуются с известными данными о положительном влиянии органических и неорганических источников азота на скорость роста и накопление биомассы актинобактерий. При более высоких концентрациях меламина, равных 5 и 10ПДК, разница в активности дегидрогеназ по сравнению с контролем составила 19,3 и 10,5%, что уже указывало на слабую токсичность.

В настоящих исследованиях продемонстрировано, что растворы меламина с концентрациями 1–40 мг/л не оказывали токсического действия на хлореллу. При тестировании с помощью *C. vulgaris* Beijer меламина в концентрациях ПДК, 5ПДК и 10ПДК дозозависимо стимулировал рост клеток хлореллы. Отклонения от контроля составили 5,32, 14,9 и 21,4% соответственно. Увеличение биомассы водоросли при культивировании в присутствии меламина, вероятно, также связано с ассимиляцией различных форм азота из растворов. Результаты согласуются с исследованием токсичности меламина для водоросли *Scenedesmus obliquus* [19], где наблюдался положительный эффект на рост *S. obliquus* при концентрациях до 200 мг/л и увеличение содержания фотосинтетических пигментов при концентрациях до 50 мг/л.



Концентрации 2,3,5-ТФФ, образованного дегидрогеназами *D. maris* AM3, при оценке токсичности растворов меламина в разных концентрациях

Figure. Concentrations of 2,3,5-TTP formed by *D. maris* AM3 dehydrogenases in assessing the toxicity of melamine solutions at different concentrations



Нами не было выявлено острого токсического действия растворов меламина с концентрациями, равными ПДК и 5ПДК, на *D. magna* Straus в 72-часовом эксперименте. При концентрации меламина, равной 10ПДК, гибель дафний составила 25 %, что указывало на слабую токсичность.

Результаты биотестирования с использованием *L. minor* L. представлены в таблице. Через

2 сут. культивирования во всех исследованных вариантах отсутствовали достоверные отличия числа листецов от контроля, через 4 сут. наблюдалось снижение суммарного прироста ряски по сравнению с контролем под воздействием меламина во всех вариантах эксперимента, через 7 сут. – при действии растворов меламина в концентрациях, равных ПДК и 5ПДК.

**Результаты биотестирования с помощью *Lemna minor* L.**  
**Results of biotesting using *Lemna minor* L.**

Показатель / Parameter	Экспозиция, сут. / Exposure periods, days	Тестируемая концентрация / Tested concentration			
		Контроль / Control	ПДК / MPC	5ПДК / 5MPC	10ПДК / 10MPC
Общее число листецов / Total number of fronds	0	15,0	15,0	15,0	15,0
	2	17,3±3,2	16,3±0,6	16,7±1,5	19,0±1,7
	4	26,3±3,1	17,7±1,1	20,7±2,1	23,7±0,6
	7	34,3±3,5	24,0±3,6	25,7±3,8	40,0±3,6
Число растений (колоний) / Number of colonies	0	5,0	5,0	5,0	5,0
	2	5,3±0,6	7,0±1,0	5,0±0,0	5,0±0,0
	4	6,0±1,0	7,3±1,5	5,3±0,6	5,7±0,6
	7	12,3±2,5	8,3±1,3	6,3±0,6	13,0±1,7
Число корней / Number of roots	0	5,7±0,6	6,0±1,0	6,3±1,5	7,3±0,6
	2	7,0±1,0	4,3±0,6	8,0±2,6	8,0±1,0
	4	11,3±0,6	6,0±1,0	10,3±2,5	13,7±0,6
	7	20,7±3,3	11,3±2,1	16,0±3,4	29,7±3,8
Содержание хлорофилла, мг/г / Chlorophyll content, mg/g		29,240	13,981	15,485	15,434

При этих концентрациях меламина в среде культивирования число корней ряски также было снижено. Меламин в концентрации, равной ПДК, ингибировал развитие корней ряски малой на всём протяжении эксперимента, меламин в концентрации, равной 5ПДК, оказывал ингибирующее воздействие в сравнении с контролем через 4 и 7 сут. На число колоний листецов *L. minor* L. меламин в концентрации, равной ПДК, через 2 сут. оказывал стимулирующее действие, через 4 сут. достоверных отличий от контроля не наблюдалось, через 7 сут. проявлялось ингибирующее воздействие на число колоний. Меламин не влиял на число растений в концентрации, равной 5ПДК, через 2 сут. эксперимента, а в концентрации, равной 10ПДК, через 2 и 4 сут. Через 4 и 7 сут. культивирования меламин в концентрации, равной 5ПДК, воздей-

ствовал отрицательно, в концентрации, равной 10ПДК, оказывал стимулирующее действие на число колоний листецов через 7 сут.

В целом, через 7 сут. культивирования ряски малой наблюдалась сходная картина по таким признакам, как: число листецов, колоний и корней: меламин в концентрациях, равных ПДК и 5ПДК, оказывал ингибирующее действие, а в концентрации равной 10ПДК – слабое стимулирующее.

Содержание фотосинтетических пигментов служит чувствительным маркером нарушений метаболизма растительной клетки в целом [19]. Нами установлено, что меламин во всех исследованных концентрациях вызывал значительное снижение (на 47–52%) содержания хлорофилла в листецах *L. minor* L. через 7 сут. культивирования (см. таблицу). Предположительно, полу-



ченные результаты связаны с компенсацией токсического воздействия на прирост ряски повышением содержания азота в среде по мере минерализации меламина к 7-м сут. Данный эффект выражен для наиболее высокой исследованной концентрации – 10ПДК. При этом такой физиологический параметр, как содержание фотосинтетических пигментов, оказался более чувствительным к воздействию меламина, однако в исследуемом диапазоне концентраций не выражена его зависимость от концентрации. Возможно, она может быть обнаружена при исследовании концентраций ниже ПДК. Также можно отметить, что фотосинтетический аппарат высшего растения ряски малой оказался более восприимчив к воздействию меламина, чем у микроводоросли *S. obliquus* [19].

### Заключение

Результаты, полученные с помощью многокомпонентной тест-системы, показали различия в чувствительности тест-организмов к воздействию меламина и способствовали получению интегральной экологически значимой оценки токсичности. Наиболее чувствительным тест-объектом оказалось водное растение *Lemna minor* L., в особенности содержание хлорофилла в листьях. Полученные данные указывают на слабую экотоксичность меламина и соответствующую его санитарно-токсикологическим показателям вредности, разработанным на основании данных о токсичности для млекопитающих [20]. Новые сведения об экотоксичности меламина необходимы для прогнозирования острого и хронического воздействия антипиренов на организмы окружающей среды, включая человека.

### Список литературы

- Advances in fire retardant materials / eds. A. R. Horrocks, D. Price. Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. 616 p. <https://doi.org/10.1533/9781845694701>
- Shi D., Shrestha R. K., Obaid H., Elsayed N. S., Zhong S., Hashim, M. H., Cheng Y., Xie D., Ni C., Ni J. Valorization of nitrogen-rich melamine as a nitrogen source in the production of maize (*Zea mays* L.) // *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 199. Article ID 116770. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116770>
- Smit C. E. Water quality standards for melamine. A proposal in accordance with the methodology of the Water Framework Directive. RIVM Letter report 2018-0077. The Netherlands : National Institute for Public Health and the Environment, 2018. 48 p.
- Li Z., McLachlan M. S. Comparing non-targeted chemical persistence assessed using an unspiked OECD 309 test to field measurements // *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2020. Vol. 5. P. 1233–1242. <https://doi.org/10.1039/c9em00595a>
- El-Sayed W. S., El-Baz A. F., Othman A. M. Biodegradation of melamine formaldehyde by *Micrococcus* sp. strain MF-1 isolated from aminoplastic wastewater effluent // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2006. Vol. 57, № 2. P. 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.11.00>
- Dodge A. G., Wackett L. P., Sadowsky M. J. Plasmid localization and organization of melamine degradation genes in *Rhodococcus* sp. strain Mel // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. Vol. 78, № 5. P. 1397–1403. <https://doi.org/10.1128/aem.06468-11>
- Takagi K., Fujii K., Yamazaki K., Harada N., Iwasaki A. Biodegradation of melamine and its hydroxy derivatives by a bacterial consortium containing a novel *Nocardioideis* species // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2012. Vol. 94, № 6. P. 1647–1656. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3673-9>
- Lütjens L. H., Pawlowski S., Silvani M., Blumenstein U., Richter I. Melamine in the environment: a critical review of available information // *Environmental Sciences Europe*. 2023. Vol. 35. Article ID 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00707-y>
- Hongkai Z., Kurunthachalam K. Occurrence and distribution of melamine and its derivatives in surface water, drinking water, precipitation, wastewater, and swimming pool water // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 258. P. 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113743>
- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». М. : Минюст России, 2021. 1029 с.
- Chu C. Y., Wang C. C. Toxicity of melamine: The public health concern // *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Toxicology and Carcinogenesis*. 2013. Vol. 31, № 4. P. 342–386. <https://doi.org/10.1080/10590501.2013.844758>
- Guo C., Yuan H., He Z. Melamine causes apoptosis of rat kidney epithelial cell line (NRK-52e cells) via excessive intracellular ROS (reactive oxygen species) and the activation of p38 MAPK pathway // *Cell Biology International*. 2012. Vol. 36, № 4. P. 383–389. <https://doi.org/10.1042/cbi20110504>
- Yiu A. J., Ibeh C.-L., Roy S. K., Bandyopadhyay B. C. Melamine induces Ca<sup>2+</sup>-sensing receptor activation and elicits apoptosis in proximal tubular cells // *American Journal of Physiology – Cell Physiology*. 2017. Vol. 313, № 1. P. 27–41. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00225.2016>
- Плешакова Е. В. Разработка нового метода определения токсичности нефтезагрязнённой почвы // *Вестник СГТУ*. 2010. № 3. С. 188–193.
- ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пре-



- сных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. М. : ФЦАО, 2014. 38 с.
16. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06. Токсикологические методы контроля. Методика измерений количества *Daphnia magna* Straus для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. М. : ФБУ ФЦА, 2014. 39 с.
17. Цаценко Л. В., Пасхалиди В. Г. Рясковые как модельный объект в биотестировании водной и почвенной среды // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018. Т. 4, № 176. С. 146–151.
18. Wang H., Geng C., Li J., Hu A., Yu C.-P. Characterization of a novel melamine-degrading bacterium isolated from a melamine-manufacturing factory in China // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 98, № 7. P. 3287–3293. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5363-2>
19. He Z., Hu X., Zhang C., Yang X., Zhong Q., Guo J., Wang J., Xiong L., Liu D. Physicochemical characteristics of *Scenedesmus obliquus* with different treatments of melamine // 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Wuhan: IEEE, 2011. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2011.5781418>
20. Печникова И. А. Сравнительная оценка токсичности и опасности симтриазинов в воде на примере производных циануровой кислоты и меламина : дис. ... канд. мед. наук. М., 2013. 140 с.
6. Dodge A. G., Wackett L. P., Sadowsky M. J. Plasmid localization and organization of melamine degradation genes in *Rhodococcus* sp. strain Mel. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, vol. 78, no. 5, pp. 1397–1403. <https://doi.org/10.1128/aem.06468-11>
7. Takagi K., Fujii K., Yamazaki K., Harada N., Iwasaki A. Biodegradation of melamine and its hydroxy derivatives by a bacterial consortium containing a novel Nocardioidea species. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, vol. 94, no. 6, pp. 1647–1656. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3673-9>
8. Lütjens L. H., Pawlowski S., Silvani M., Blumenstein U., Richter I. Melamine in the environment: a critical review of available information. *Environmental Sciences Europe*, 2023, vol. 35, article ID 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00707-y>
9. Hongkai Z., Kurunthachalam K. Occurrence and distribution of melamine and its derivatives in surface water, drinking water, precipitation, wastewater, and swimming pool water. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 258, pp. 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113743>
10. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniia k obespecheniiu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlia cheloveka faktorov sredy obitaniia» [SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans”]. Moscow, Ministry of Justice of Russia, 2021. 1029 p. (in Russian).
11. Chu C. Y., Wang C. C. Toxicity of melamine: The public health concern. *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Toxicology and Carcinogenesis*, 2013, vol. 31, no. 4, pp. 342–386. <https://doi.org/10.1080/10590501.2013.844758>
12. Guo C., Yuan H., He Z. Melamine causes apoptosis of rat kidney epithelial cell line (NRK-52e cells) via excessive intracellular ROS (reactive oxygen species) and the activation of p38 MAPK pathway. *Cell Biology International*, 2012, vol. 36, no. 4, pp. 383–389. <https://doi.org/10.1042/cbi20110504>
13. Yiu A. J., Ibeh C.-L., Roy S. K., Bandyopadhyay B. C. Melamine induces Ca<sup>2+</sup>-sensing receptor activation and elicits apoptosis in proximal tubular cells. *American Journal of Physiology – Cell Physiology*, 2017, vol. 313, no. 1, pp. 27–41. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00225.2016>
14. Pleshakova E. V. Development of a new method for determining the toxicity of oil-contaminated soil. *Vestnik Saratov State Technical University*, 2010, no. 3, pp. 188–193 (in Russian).
15. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Токсикологические методы контроля. Методика измерения оптической плотности культуры водоросли *Chlorella* (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления [Toxicological control methods. The method of measuring the optical density of *Chlorella vulgaris* Beijer algae culture for determining the tox-



- icity of drinking, fresh natural and wastewater, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste]. Moscow, FTsAO, 2014. 38 p. (in Russian).
16. PND F T 14.1:2:3:4.12-06. *Toksikologicheskie metody kontrolya. Metodika izmerenii kolichestva Daphnia magna Straus dlia opredeleniia toksichnosti pit'evykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniia metodom priamogo scheta* [Toxicological control methods. The method of measuring the amount of *Daphnia magna* Straus for determining the toxicity of drinking, fresh natural and wastewater, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste by direct counting]. Moscow, FBU FTsA, 2014. 39 p. (in Russian).
17. Tsatsenko L. V., Paskhalidi V. G. *Lemnaceae* as a model object in biotesting the aquatic and soil environment. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii biulleten'* *Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur*, 2018, vol. 4, no. 176, pp. 146–151 (in Russian).
18. Wang H., Gen, C., L, J., H, A., Y, C.-P. Characterization of a novel melamine-degrading bacterium isolated from a melamine-manufacturing factory in China. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, vol. 98, no 7, pp. 3287–3293. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5363-2>
19. He Z., Hu X., Zhang C., Yang X., Zhong Q., Guo J., Wang J., Xiong L., Liu D. Physicochemical characteristics of *Scenedesmus obliquus* with different treatments of melamine. *5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. Wuhan, IEEE, 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2011.5781418>
20. Pechnikova I. A. *Comparative assessment of the toxicity and danger of sim-triazines in water on the example of cyanuric acid and melamine derivatives*. Diss. Cand. Sci. (Med.). Moscow, 2013. 140 p. (in Russian).

Поступила в редакцию: 30.04.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 22.05.2024; опубликована 30.09.2024

The article was submitted 30.04.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 22.05.2024; published 30.09.2024