

УДК 621.311.243, 574.21, 504.2

## ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТУРНЫХ МЕТОДОВ БИОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА

*М. И. Семенова, А. В. Смирнов, А. Соколов, А. С. Ковалевская, О. В. Смолова*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Представлен анализ возможностей применения методов аппаратурного биотестирования для оценки токсичности компонентов отработанных поликристаллических солнечных панелей. Авторами получены первичные результаты по исследованию индекса токсичности полимерных компонентов отработанных солнечных панелей. На основании этих данных для проведения исследований в области комплексного биологического контроля степени токсичности различных компонентов, входящих в состав панелей, был разработан план дальнейших экспериментов.

**Ключевые слова:** солнечные панели, компоненты, токсичность, биотестирование, инфузории, *paramecium caudatum*.

## APPLICATION OF INSTRUMENTAL METHODS OF BIOLOGICAL CONTROL TO ASSESS THE TOXICITY OF COMPONENTS OF USED POLYCRYSTALLINE SOLAR PANELS TAKING INTO ACCOUNT THE FEATURES OF THEIR ELEMENTAL COMPOSITION

*M. I. Semenova, A. V. Smirnov, A. Sokolov, A. S. Kovalevskaya, O. V. Smolova*

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", (Saint Petersburg, Russian Federation)

The article presents the analysis of the possibility of using the methods of instrumental biotesting to assess the toxicity of the components of used polycrystalline solar panels. The authors have obtained the primary results on the study of the toxicity index of polymer components of used solar panels. Based on these data, a plan for further experiments has been developed for further research in the field of integrated biological control of the degree of toxicity of various components that make up the panels.

**Keywords:** solar panels, components, toxicity, biotesting, infusories, *paramecium caudatum*.

**Введение.** Развитие солнечной энергетики в современном мире происходит с высокой скоростью, многие страны используют солнечные электростанции как часть основной энергетической инфраструктуры. Появляются новые солнечные станции, площадь которых занимает несколько гектаров. Наряду с получением энергии высокой экологичности необходимо думать о том, что произойдет с этими солнечными панелями после окончания их гарантийного срока эксплуатации, который составляет 25–30 лет. По данным агентств IEA PVPS и IRENA, к 2050 году количество отходов солнечных панелей составит 78 млн тонн [1]. 85 % всех солнечных панелей, производимых в настоящее время, относятся к кристаллическим солнечным панелям. Деграция этого типа панелей происходит в среднем на 1% в год по разным причинам: воздействие ультрафиолетовых лучей и влаги, разрушение пленки этиленвинилацетата и др. [2]. На данный момент отработанные солнечные панели захораниваются на полигонах твердых бытовых отходов, где подвергаются воздействию различных факторов окружающей среды. К тому же дождевая вода, проходящая через слои отходов, образует высокотоксичный фильтрат, который необходимо правильно утилизировать.

В состав кристаллических солнечных панелей, кроме основного фотоэлектрического блока и стекла, входят полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид), токсичность и химическая инертность которых до настоящего момента не изучены. Следовательно, захоронение солнечных панелей является нежелательным, так как их отработанные компоненты воздействуют на окружающую среду, тем самым могут подвергать опасности здоровье людей. Цель данной статьи — определение степени токсичности целостной отработанной солнечной панели путем исследования ее элементного состава и изучения литературных данных для выбора необходимых тест-организмов для биотестового анализа.

**Обоснование выбора метода.** Для исследования токсичности отработанных солнечных панелей группой исследователей были проведены первые исследования по определению индекса токсичности некоторых их компонентов. В качестве метода исследования был выбран биотестовый анализ [3]. Биотестирование позволяет заменить дорогостоящие токсикологические опыты с теплокровными организмами экспресс-экспериментами с микроорганизмами. Применение биотестовых методов дает возможность:

- уменьшить время контроля с недель до десятков минут;
- повысить чувствительность обнаружения токсикантов;
- снизить стоимость контроля примерно в 1000 раз.

Для данного исследования были выбраны *Paramecium caudatum*. Инфузории по своим биохимическим параметрам очень близки к высшим животным и человеку, что делает возможной экстраполяцию данных, полученных в биотестировании с использованием инфузорий, на человека [4–7].

В результате исследований было выявлено, что индекс токсичности рассматриваемых компонентов увеличивается при увеличении времени экстрагирования компонентов в дистиллированной воде. Результаты исследований представлены в [8]. Для детальной проработки рассматриваемого вопроса был разработан план дальнейшего исследования.

**Разработка плана эксперимента.** Для разработки плана эксперимента необходимо было проанализировать возможный элементный состав водной вытяжки, полученной в результате нахождения компонентов солнечной панели в воде. Предполагаемый состав водной вытяжки и состав поликристаллической солнечной панели представлены на рис. 1.

| Наименование компонента                | Состав водной вытяжки   |
|--|---|
| EVA                                    | Водород, углерод, кислород (H, C, O)                                |
| Кремний, легированный бором и фосфором | Кремний, фосфор, бор, водород, кислород (Si, P, B, O, H, C)         |
| Серебряные контакты                    | H, O, Ag, цветные металлы   |
| Закаленное стекло                      | Фтор, натрий, алюминий, бор, водород, кислород (F, Na, B, O, H, Al) |
| Tedlar                                 | Фосфор, водород, углерод, кислород (F, H, C, O)                     |

Рис. 1. Предполагаемый элементный состав водной вытяжки компонентов солнечной панели

Для определения степени токсичности целостной отработанной солнечной панели необходимо приготовить две пробы водной вытяжки. Первая проба содержит все компоненты солнечной панели в измельченном виде, вторая проба состоит из неповрежденной панели. Водная вытяжка состоит из твердой фазы и жидкости (дистиллированная вода с рН 7,0–,5).

При определении степени токсичности отдельных компонентов в первую очередь необходимо разобрать солнечную панель на составляющие. Каждый компонент следует измельчить, сформировать анализируемую пробу и интенсивно перемешать. Формирование пробы происходит посредством помещения анализируемого компонента в дистиллированную воду. После окончания перемешивания раствор с осадком подлежит отстаиванию. Время выдержки исследуемой пробы и экспозиции её на тест-организмы выбирается в соответствии с установленными методиками [3, 9–10]. Однако допускается его увеличение на основании экспериментов, уже проведенных другими исследователями [11–13].

**Вывод.** Определение степени токсичности солнечных панелей является актуальным вопросом на сегодняшний день. Для полноценного его исследования недостаточно использовать один тест-организм, поэтому в результате исследования элементного состава и изучения литературных данных были выбраны следующие организмы:

1) инфузории: помимо указанных выше причин из литературных источников, было выявлено, что проводились исследования по определению степени токсичности фильтрата полигона ТБО, а также почв в границах санитарно-защитной зоны полигона ТБО;

2) зеленые водоросли *Scenedesmus quadricauda*: этот тест-объект использовался в ряде предыдущих исследований для определения токсичности сред с рН меньше и больше 7;

3) водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer могут использоваться в качестве тест-объекта, так как в литературных источниках описаны исследования сред с рН меньше 7.

#### **Библиографический список**

1. Deng R., Chang N. L., OuyangZ., ChongC. M. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2019. — №109. — С. 532–550.
2. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review // *National Renewable energy Laboratory Journal Article*. — June, 2012. — №NREL/ JA-5200-51664. — С. 32–41.
3. Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ПНД Ф Т 16.3.16–10 (ред. 2015 г.) / ООО «Спектр-М» // Нормативные базы ГОСТ/СП/СНиП : [сайт]. — URL : <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758202.htm> (дата обращения : 10.09.2020).
4. Биотестовый анализ — интегральный метод оценки качества объектов окружающей среды: учебно-методическое пособие / А. Г. Бубнов, С. А. Буймова, А. А. Гушин, Т. В. Извекова ; под общ. ред. В. И. Гриневича. — Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2007. — 112 с.
5. Принципы и методы экологической токсикологии / Д. Б. Гелашвили, В. С. Безель, Е. Б. Романова [и др.]. — Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского ун-та, 2016. — 705 с.
6. Тихановская, Г. А. Биологический контроль окружающей среды: метод. указ. к вып. лаб. раб. / Г. А. Тихановская, Ю. В. Машихина. — Вологда : ВоГУ, 2016. — 39 с.
7. Чеснокова, С. М. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Методы биотестирования / С. М. Чеснокова, Н. В. Чугай. — Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 92 с.
8. Semenova, M., Vezhenkova, I., Stepanova, M., Kustov, T. Determination of the degree of toxicity of EVA and Tedlar polymers during the disposal of components of crystalline solar panels, *E3S Web of Conferences*, 161, 01085 (2020)

9. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. ФР.1.39.2007.03223 / Акварос // Нормативные базы ГОСТ/СП/СНиП : [сайт]. — URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293842/4293842245.htm> (дата обращения : 10.09.2020).

10. Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 / ФБУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» // Нормативные базы ГОСТ/СП/СНиП : [сайт]. — URL : <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293763/4293763986.htm> (дата обращения : 10.09.2020).

11. Ипатова, В. И. Оценка токсичности бумажных изделий, пищевых продуктов и грунта методом биотестирования с использованием микроводорослей / В. И. Ипатова, А. Г. Дмитриева, В. Ю. Прохоцкая // Поволжский экологический журнал. — 2013. — № 4. — С. 394–401. — URL : [http://www.sevin.ru/volecomag/issues/2013\\_4/PEJ\\_2013\\_4\\_394-401.pdf](http://www.sevin.ru/volecomag/issues/2013_4/PEJ_2013_4_394-401.pdf) (дата обращения: 25.12.2020).

12. Лисова, М. Н. Сравнительный анализ расчетной и экспериментальной методик оценки класса опасности отходов минерального происхождения / М. Н. Лисова, А. Н. Егорова, В. В. Светухин // Теоретическая и прикладная экология. — 2013. — № 2. — С. 91–95.

13. Смирнов, Ю. Д. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве / Ю. Д. Смирнов, М. В. Сучкова // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 3(79). — С. 16–25.

*Об авторах:*

**Семенова Маргарита Игоревна**, ассистент кафедры инженерной защиты окружающей среды, аспирант кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), [Smi-2409@yandex.ru](mailto:Smi-2409@yandex.ru)

**Смирнов Андрей Владимирович**, магистрант кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), [andrrewm-lodec@gmail.com](mailto:andrrewm-lodec@gmail.com)

**Соколов Алексей**, магистрант кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), [sokolowalexey@gmail.com](mailto:sokolowalexey@gmail.com)

**Ковалевская Алла Станиславовна**, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), кандидат технических наук, доцент, [lellikat@yandex.ru](mailto:lellikat@yandex.ru)

**Смолова Ольга Владимировна**, ассистент кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (197376, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), [eco\\_leti@mail.ru](mailto:eco_leti@mail.ru)

*Authors:*

**Semenova, Margarita I.**, Assistant, Department of Environmental Engineering, Post-graduate student, Department of Environmental Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, RF), [Smi-2409@yandex.ru](mailto:Smi-2409@yandex.ru)

**Smirnov, Andrey V.**, Master's degree student, Department of Environmental Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, RF), [anrdrewmolodec@gmail.com](mailto:anrdrewmolodec@gmail.com)

**Sokolov, Aleksey**, Master's degree student, Department of Environmental Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, RF), [sokolow-aleksey@gmail.com](mailto:sokolow-aleksey@gmail.com)

**Kovalevskaya, Alla S.**, Associate Professor, Department of Environmental Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, RF), Cand.Sci., Associate professor, [lellikat@yandex.ru](mailto:lellikat@yandex.ru)

**Smolova, Olga V.**, Assistant, Department of Environmental Engineering, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, RF), [eco\\_leti@mail.ru](mailto:eco_leti@mail.ru)