

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2022, №3 Том 9 / 2022, No 3, Vol 9 <https://resources.today/issue-3-2022.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/10ECOR322.pdf>

DOI: 10.15862/10ECOR322 (<https://doi.org/10.15862/10ECOR322>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Михайленко, А. В. Загрязнение окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей: системный обзор проблемы / А. В. Михайленко, Д. А. Рубан // Отходы и ресурсы. — 2022. — Т. 9. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR322.pdf> DOI: 10.15862/10ECOR322

For citation:

Mikhailenko A.V., Ruban D.A. Cadmium pollution of environment by the use of solar cells: a systemic review of the problem. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 9(3): 10ECOR322. Available at: <https://resources.today/PDF/10ECOR322.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/10ECOR322

Исследование выполнено в рамках Программы стратегического академического лидерства ЮФУ Приоритет-2030; проект № СП-12-22-5

Михайленко Анна Владимировна

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, Россия
Институт наук о Земле
Доцент

Кандидат географических наук

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1156-770X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=712702

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55971159100>

Рубан Дмитрий Александрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Москва, Россия

Научный сотрудник

Кандидат геолого-минералогических наук, Philosophiae Doctor (Университет Претории, ЮАР), доцент

E-mail: ruban-d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2847-645X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=114734

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8520926600>

Загрязнение окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей: системный обзор проблемы

Аннотация. Использование солнечных батарей вносит вклад в экологизацию энергетического сектора экономики, однако требует учета разнообразных воздействий на окружающую среду. В частности, во многих из них применяется кадмий (в составе теллурида кадмия), в связи с чем возникают опасения по поводу возможного загрязнения данным токсичным тяжелым металлом. В статье обобщается и систематизируется большой блок информации, который позволяет дать оценку такому загрязнению. Методически работа основана на библиографическом анализе и изучении содержания статей в ведущих отечественных и зарубежных изданиях по обозначенной проблематике. Установлено, что проблема загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей, в целом, сформулирована современной наукой, однако во многом как гипотетическая, а ее разработка отличается заметной неполнотой. Авторами показано, что в свете ранее

проведенных исследований при получении кадмия, производстве солнечных батарей, их использовании и утилизации может происходить загрязнение окружающей (в том числе производственной) среды, факты чего также известны. Масштаб данной проблемы в настоящее время определить затруднительно, однако ее недостаточная изученность сама по себе создает риски для ее масштабного проявления в ближайшем будущем. Нередко учеными ставится вопрос о замене кадмийсодержащих материалов более экологически «чистыми». В связи с этим ставится вопрос о том, насколько такая замена снизит интерес к корректной утилизации уже использованных батарей, при массовом переходе которых в отходы загрязнение неизбежно. Также обращается внимание на тот факт, что даже если сама по себе солнечная энергетика снижает поступление в окружающую среду кадмия за счет замены «традиционных» источников энергии, то изменение географии производства последней способно расширить проявление рассматриваемой проблемы.

Ключевые слова: библиографическая информация; загрязнение; производственная среда; солнечная энергетика; теллурид кадмия; утилизация; фотоэлектрические панели

Введение

Экологизация энергетической отрасли является одним из императивов современного технологического развития, который имеет надежное научное обоснование [1–3]. Хотя обеспечивающие его финансово-экономические механизмы все еще далеки от ожидаемой эффективности [4], он признается энергетическими корпорациями [5]. Отечественные ученые активно обращаются к соответствующей исследовательской проблематике, признавая огромную важность перехода к «зеленой» энергетике в России [6–8].

Важным направлением экологизации является использование альтернативных, возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной. Перспективность солнечных батарей активно обсуждается в научном сообществе [9–11]. При этом обращается внимание на то, что сам по себе рост данного сектора энергетики вовсе не обязательно гарантирует устойчивого развития [12; 13]. Например, речь идет о проблемах с утилизацией батарей при их массовом использовании. Для производства солнечных батарей могут использоваться различные материалы, при этом фотоэлектрические панели на тонкопленочных фотоэлементах на основе теллурида кадмия отнесены к наиболее экологически эффективным [14]. В связи с самой постановкой вопроса о подобной эффективности и использованием столь токсичного элемента возникает закономерный вопрос о том, насколько развитие солнечной энергетики может способствовать загрязнению окружающей среды. Данная тема подчас озвучивается и в ходе научно-популярных дискуссий.

Кадмий представляет собой тяжелый металл, имеющий ограниченное распространение в окружающей среде, но при этом отличающийся значительной токсичностью при сравнительно небольшом увеличении содержания; более того, он активно накапливается растениями и представляет опасность для человека при употреблении в пищу загрязненной растительной продукции, включая рис, овощи и т. д. [15–19]. Существуют способы профилактики токсических эффектов данного тяжелого металла [20]. Основными источниками кадмия могут быть цинковые и свинцовые концентраты и фосфорные удобрения. Кадмий активно циркулирует как в антропогенных экосистемах, что показано на примере рекреационных зон [21], так и в природных [22]. Этот металл обычно извлекается из вышеотмеченных концентратов, а также вторичным путем при переработке кадмийсодержащих материалов [23]. Его мировое производство постепенно возрастает, при этом лишь часть его предназначена для получения теллурида кадмия, используемого в солнечных батареях; более того, ведутся активные разработки для получения альтернативных материалов,

что в перспективе снизит спрос на него со стороны солнечной энергетики [24; 25]. Основными производителями кадмия в мире являются Китай и Южная Корея; существенные объемы производятся также в Канаде, Казахстане, России, США и Японии [25].

Основной целью настоящей работы является системный обзор проблемы загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей. При этом в фокусе внимания — исследования отечественных и зарубежных ученых, затрагивавших данную проблему в своих публикациях в ведущих научных журналах. Несмотря на наличие некоторого числа сводных работ, большая часть сведений остается разрозненной в литературных источниках. Иными словами, объектом анализа служит уже опубликованная информация, которая нуждается в обобщении и систематизации. При этом делается попытка обозначить контуры проблемы в ее современном научном понимании, что важно для координации последующих исследований. Стоит также отметить, что настоящая работа ориентирована на изучение именно общих экологических эффектов, а потому сугубо технологические аспекты в ней рассматриваются упрощенно. Например, используется весьма общий термин «солнечные батареи», хотя с технологической точки зрения, правильнее говорить о фотоэлектрических панелях и тонкопленочных фотоэлементах.

Материалы и методы

Системные обзоры приобрели популярность в науке об окружающей среде и, по сути, стали новым аналитическим инструментом [26–28]. Рост их востребованности в последние годы обусловлен возможностями использования международных и национальных библиографических баз данных для тщательного подбора релевантных (содержательно отвечающих конкретной научной проблематике) источников, основными из которых являются статьи в ведущих журналах [29]. Однако помимо сугубо библиографического анализа системные обзоры предполагают характеристику научного понимания конкретной проблемы по концептуально заданной или эмпирически определенной логической схеме.

Материалом для настоящей работы служит информация из библиографических баз данных “Scopus” и «Научная электронная библиотека». Речь идет о содержании релевантных статей в научных журналах. Общее их количество невелико, что объясняется специфичностью рассматриваемой проблематики.

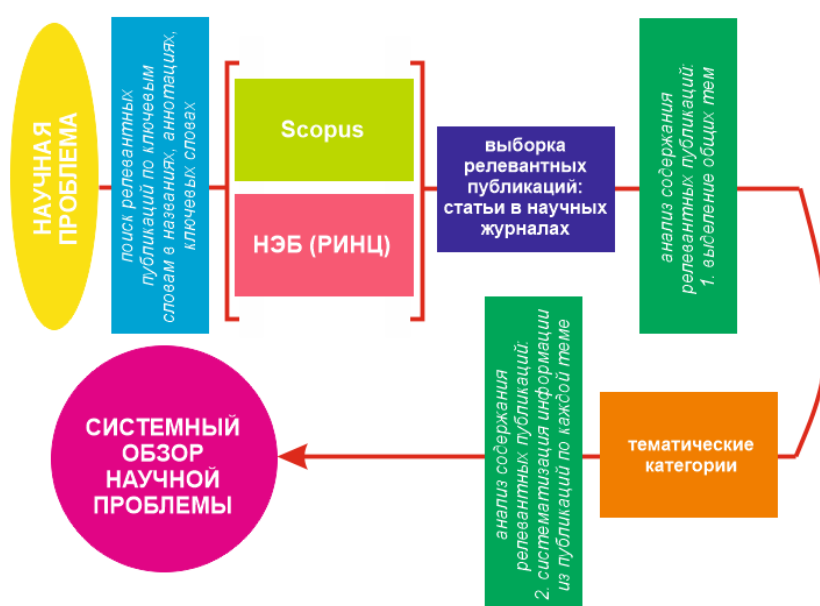


Рисунок 1. Методическая основа настоящей работы (составлено авторами)

Методически работа выстроена следующим образом (рис. 1). Прежде всего, осуществляется выборка статей. Для этого используются такие ключевые слова как «кадмий», «солнечные батареи», «загрязнение», «окружающая среда» и сопряженные термины, а также их англоязычные аналоги. Выбранные работы кратко анализируются на предмет релевантности с исключением неподходящих по тематике статей.

Далее содержание публикаций рассматривается на предмет обнаружения общих тематических категорий, по которым статьи могут быть сгруппированы. В данном случае имеет смысл обратить внимание на те, которые отражают этапы обращения с кадмием в солнечной энергетике, составляющие «жизненный цикл» батарей. Это созвучно подходу, уже апробированному ранее [30]. Наконец, для каждой категории дается синопсис основных идей из опубликованной литературы, которые определяются в ходе еще одного раунда анализа содержания выбранных источников. При этом идеи логически упорядочиваются.

Результаты

Научные статьи, затрагивающие тему загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей, могут быть отнесены к четырем тематическим категориям. Первая из них касается загрязнения при его получении; она не имеет прямого отношения к солнечной энергетике, однако очевидно, что потребности последней в данном элементе активизируют его добычу или извлечение из ранее использовавшихся материалов. Три другие категории относятся к загрязнению среды производств, выпускающих солнечные батареи, и окружающей среды при их использовании и утилизации. Важно отметить, что в солнечных батареях используется теллурид кадмия. Предполагается, что данное соединение само по себе является поллютантом и обладает заметной токсичностью [30–33].

Из ранних работ известно, что переработка цинковых и свинцовых концентратов приводит к значительным поступлениям кадмия в окружающую среду, существенно повышая его содержание в почве и произрастающих на них сельскохозяйственных культурах [34; 35]. Однако при этом риски для здоровья людей оценивались весьма осторожно, а в ряде случаев удавалось экспериментально доказать их незначительность или даже отсутствие при соблюдении ряда условий [36; 37].

Более современные исследования [38], в том числе китайских ученых [39–41], показали существенное загрязнение разных компонентов окружающей среды (не только почв, но и, например, речных отложений) при переработке рудных концентратов, в том числе для получения собственно кадмия. Однако при этом отмечалось, что уровень загрязнения и риски для здоровья людей зависят от ряда условий, т. е. являются ситуационными. Например, распространение кадмия в почвах широколиственных лесов происходит сильнее, чем хвойных [42]. В еще одном исследовании поступление кадмия в окружающую среду при его получении признается сравнительно небольшим [43], однако оно все-таки имеет место.

Использование кадмия из цинковых и свинцовых концентратов для производства солнечных батарей рассматривается в качестве фактора положительного воздействия на окружающую среду, т. к. в противном случае этот токсичный металл поступал бы в нее в большем количестве из-за концентрации в отходах рудопереработки [30; 44]. Важно также и то, что эффективность технологических решений по минимизации загрязнения в долгосрочном отношении оказывается сомнительной, не предлагая принципиального решения проблемы [45]. Стоит отметить немногочисленность (точнее почти полное отсутствие) публикаций, посвященных загрязнению, вызываемому производствами, специализирующимися на получении конкретно кадмия. Более того, хотя изучение китайского опыта отчасти оправдано большими объемами производства кадмия в этой стране [25], последняя не является

единственной в этом отношении, что позволяет говорить о географически ограниченном изучении рассматриваемого загрязнения.

Несмотря на современные технологические решения и введение жестких мер контроля техники безопасности, производство солнечных батарей не является абсолютно безопасным. Исследования итальянских специалистов позволили установить, что выполнение ряда специфических и непродолжительных процедур предполагает контакт с загрязненными кадмием воздухом и поверхностями [46]. То же исследование при этом не выявило значительного попадания тяжелого металла в организм работников. Тем не менее факт загрязнения отдельных участков производственной среды очевиден. Он отмечается и в другом исследовании [43], хотя объемы кадмия, выделяемого в производственную среду, совсем невелики. Стоит добавить, что при производстве и эксплуатации солнечных батарей имеет место также косвенное загрязнение (например, за счет выделения кадмия при использовании ископаемого топлива), которое существенно сильнее прямого; однако сама по себе солнечная энергетика, заменяющая использование невозобновляемых источников энергии, с большим избытком компенсирует это загрязнение [43].

Безусловно, эксплуатация солнечных батарей не предполагает загрязнения окружающей среды. Однако такое возможно при нарушении ее режима. Например, при возгорании может происходить локальное выделение теллурида кадмия в окружающую среду, хотя потенциальные риски для здоровья людей в этом случае представляются минимальными [30; 43]. Лабораторные исследования показали, что используемые в солнечной энергетике материалы вполне способны выделять кадмий с негативным влиянием на микробиоту при определенных условиях (например, в слишком кислой или щелочной среде) [47]. Безусловно, это может проявиться и при эксплуатации, и при утилизации солнечных батарей.

Само по себе использование в солнечных батареях кадмия указывается в качестве потенциального триггера экологических проблем [44; 48–51], однако без конкретизации ситуаций, когда они могут возникнуть. По всей видимости, авторы этих работ подразумевают проблемы, связанные с активным вовлечением кадмия в техногенную среду, в частности, при утилизации использованных батарей (формирование и/или переработка отходов). Загрязнение при нарушении ее режима и отсутствии надежных схем переработки действительно возможно [30; 52]. Важное свидетельство получено в ходе исследования техногенных отходов с последующим моделированием их будущего экологического воздействия: показано, что в связи с массовым выводом солнечных батарей из эксплуатации к 2050 г. можно ожидать значительных объемов поступления кадмия, измеряемых тоннами, в окружающую среду [53]. При этом обращается внимание на тот факт, что при обсуждении подобных вопросов недостаточно учитываются реальные, а не технологически обоснованные практики обращения с использованными солнечными батареями. Изучение загрязнения окружающей среды кадмием в Бангладеш позволило установить, что критические значения его содержания не превышены, однако данный металл обнаружен в речных осадках и воде, а также овощной продукции, т. е. потенциальные риски для здоровья людей существуют [54]. Авторы указывают на утилизируемые солнечные батареи как возможный, однако второстепенный источник кадмия.

Обсуждение результатов

Обобщение и систематизация информации из литературных источников позволяют наметить общие закономерности загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей (рис. 2). Для всех этапов их «жизненного цикла» установлены как сама возможность загрязнения, так и примеры ее реализации. Стоит обратить внимание на три

аспекта. Во-первых, производственная среда должна пониматься как часть окружающей среды. Однако первая при этом может быть в значительной мере изолирована, лимитируя тем самым распространение кадмия. Во-вторых, утилизация солнечных батарей может осуществляться с извлечением кадмийсодержащих материалов для последующего использования. Чем меньший их объем накапливается в виде отходов, тем меньше загрязнение на данном этапе. При этом открытым остается вопрос о том, насколько возможно загрязнение (как минимум, на уровне производственной среды) при временном складировании и переработке этих материалов. В-третьих, с учетом сказанного выше, представляется, что риск загрязнения и его фактические объемы преимущественно связаны с получением кадмия и утилизацией батарей, чем с их производством или использованием.



Рисунок 2. Поступление кадмия в окружающую среду в течение «жизненного цикла» солнечных батарей (составлено авторами)

Системный обзор позволяет обсудить состояние рассматриваемой научной проблемы. Прежде всего, следует признать, что она обозначалась в целом ряде научных публикаций в ведущих журналах на протяжении более 10 лет. Хотя эта проблема чаще предполагается, чем фиксируется, все-таки загрязнение окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей реально фиксируется. Более того, вероятностный характер связан с новизной данной проблемы, т. к. ее полномасштабного проявления можно ожидать лишь при массовом развитии солнечной энергетики в ближайшем будущем [53]. Научный интерес к данной проблеме представляется довольно ограниченным, а уровень изученности недостаточным. Об этом свидетельствует сравнительно небольшое число соответствующих научных публикаций (см. обзор выше) и при этом частое рассмотрение такого загрязнения «поверхностно» или вкупе с другими проблемами. Нередко сама по себе токсичность кадмия является основанием для постановки вопроса об экологической безопасности солнечных батарей, хотя в действительности на большей части их «жизненного цикла» требуется обращать внимание на теллурид кадмия и определять вероятность его попадания в окружающую среду [30].

В свете имеющейся научной информации определить масштаб проблемы загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей представляет затруднительным. С одной стороны, она в значительной мере только предполагается, а ее реальное проявление зависит от разнообразных условий (в том числе нарушений технологических режимов получения кадмия, производства и эксплуатации батарей, некорректной утилизации). С другой стороны, некоторые факты загрязнения установлены.

Более того, оптимистические представления о совершенстве «чистых» технологий не всегда оправданы [45]. Стоит также учитывать «отложенные» эффекты, связанные с относительно новизной солнечной энергетики [53], что не позволяет массово фиксировать ее негативные экологические следствия в настоящее время. На масштаб рассматриваемой проблемы в ближайшем будущем влияют два обстоятельства. Во-первых, это интенсивность развития солнечной энергетики и доля батарей, использующих теллурид кадмия. Несмотря на определенный рост и большую перспективность первой, существуют определенные барьеры (в том числе административные, социально-экономические и экологические) на пути ее развития, а доля солнечной энергии остается сравнительно низкой [49; 52; 55; 56]. Помимо того, что многие солнечные батареи уже сейчас не используют кадмийсодержащих материалов [14; 44], ведутся разработки, направленные на эффективную замену этих материалов в будущем [51; 57; 58]. Во-вторых, речь идет о том, насколько солнечная энергетика может заменить использование невозобновляемых источников энергии. Если эта замена будет масштабной, то загрязнение снизится даже при активном использовании батарей с теллуридом кадмия [43]. Если же этого не произойдет, то общее поступление кадмия в окружающую среду явно будет расти. В связи с вышесказанным уместно поставить и еще два вопроса. Во-первых, не приведет ли отказ от кадмийсодержащих материалов к уменьшению или прекращению переработки использованных солнечных батарей, в результате чего кадмий начнет активно выделяться из соответствующих отходов? Во-вторых, даже если солнечная энергетика заменит «традиционную», то не изменится ли география производства энергии таким образом, что загрязнению кадмием подвергнутся ранее незатронутые им территории? Имеющаяся научная информация не позволяет дать определенные ответы, однако в свете предшествующего опыта освоения новых технологий вполне резонно предположить, что соответствующие риски действительно существуют и при этом вероятность их реализации весьма велика.

Наконец, важно отметить, что проанализированная литература не дает однозначного ответа на вопрос о том, насколько просто может быть решена проблема загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей. На этот счет существуют как довольно оптимистичная [30; 43], так и пессимистичная [53] точки зрения. В пользу последней свидетельствуют отмеченные выше неопределенность и недостаточность научных суждений о данной проблеме, а также анализ предшествующего опыта борьбы с загрязнением кадмием [45]. Безусловно, рассматриваемая проблема весьма сложна и требует научного подхода, а ожидание ее решения «естественным путем» безответственно. Иными словами, развитие солнечной энергетики с использованием кадмийсодержащих материалов формирует действительный экологический вызов, адекватным ответом на который могла бы стать интенсификация соответствующих научных исследований.

Заключение

Обобщение и систематизация научных публикаций по проблеме загрязнения окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей позволяет сделать три общих вывода. Во-первых, рассматриваемая проблема является как предполагаемой, так и реальной, однако ее научная разработка недостаточна. Во-вторых, загрязнение кадмием может происходить на протяжении всего «жизненного цикла» солнечных батарей, но особенно активно при получении кадмия и утилизации использованных батарей. В-третьих, рассматриваемая проблема, вероятно, проявится в ближайшем будущем, чему будет способствовать в том числе недостаточное внимание к ней со стороны ученых.

Настоящая работа обозначает довольно широкие перспективы для последующих исследований. В частности, необходимо определение объемов и механизмов попадания кадмия в окружающую среду из мест получения соответствующего сырья, а также производства,

эксплуатации и утилизации солнечных батарей как можно в большем количестве случаев. Иными словами, актуальным является расширение фактологической базы. Необходима также концептуальная разработка представлений об экологизации и ее экологических же следствиях при технологически инновационном развитии. Несмотря на ограниченность информации о загрязнении окружающей среды кадмием при использовании солнечных батарей, видится вполне очевидным, что такое развитие не является решением само по себе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reardon J. The changing structure of the renewable industry — implications for a green transition to sustainable energy // *International Journal of Green Economics*. — 2009. — V. 3. — P. 367–381.
2. Reddy B.S. India's energy system transition-Survival of the greenest // *Renewable Energy*. — 2016. — V. 92. — P. 293–302.
3. Zhang D., Kong Q. Green energy transition and sustainable development of energy firms: An assessment of renewable energy policy // *Energy Economics*. — 2022. — V. 111. — P. 106060.
4. Nobletz C. Green energy indices & financial markets: An in-depth look // *International Economics*. — 2022. — V. 171. — P. 80–109.
5. Ruban D.A., Yashalova N.N., Ermolaev V.A. Is environment a strategic priority of the leading energy companies? Evidence from mission statements // *Sustainability*. — 2021. — V. 13. — P. 2192.
6. Горохова И.В., Ахметова Б.А. Экологизация экономики: опыт России и зарубежных стран // *Научно-аналитический журнал Наука и практика Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова*. — 2022. — № 1. — С. 52–58.
7. Мишина Н.А., Котова Л.Г., Смирнова Д.К., Носкова А.С. «Зеленая» энергетика в системе мировой экономики: опыт разных стран, современное состояние и перспективы // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки*. — 2022. — № 2. — С. 167–179.
8. Хачатурова Э.Э., Хамицева Л.В. Переход на «зеленую» энергетику в России // *Гуманитарные и социально-экономические науки*. — 2021. — № 3. — С. 106–109.
9. Hernandez R.R., Armstrong A., Burney J., Ryan G., Moore-O'Leary K., Diedhiou I., Gordsky S.M., Saul-Gershenz L., Davis R., Macknick J., Mulvaney D., Heath G.A., Easter S.B., Hoffacker M.K., Allen M.F., Kammen D.M. Techno–ecological synergies of solar energy for global sustainability // *Nature Sustainability*. — 2019. — V. 2. — P. 560–568.
10. Mahoney L., Rasalingam S., Naasz H., Koodali R.T. Sustainability Using Solar Energy: Present and Future // *ACS Symposium Series*. — 2015. — V. 1205. — P. 119–143.
11. Xuan Ao, H., Eftekhari M., Aungkulanon P., Almutairi K., Mostafaeipour A. Impact of economic and government investment in residential solar power plant on energy system sustainability // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. — 2022. — V. 52. — P. 102050.

12. Fontaine A. Debating the sustainability of solar energy: Examining resource construction processes for local photovoltaic projects in France // *Energy Research and Social Science*. — 2020. — V. 69. — P. 101725.
13. Srivastava S., Behera A., Biswal R. Assessing the Grip of Solar Energy Systems on Environmental Sustainability-A Review // *Micro and Nanosystems*. — 2022. — V. 14. — P. 133–143.
14. Ратнер С.В., Иосифов В.В. К вопросу о разработке стратегии развития солнечной энергетики в России с учетом экологических эффектов // *Экономический анализ: теория и практика*. — 2017. — № 8. — С. 1522–1540.
15. Satarug S., Baker J.R., Urbenjapol S., Haswell-Elkins M., Reilly P.E.B., Williams D.J., Moore M.R. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population // *Toxicology Letters*. — 2003. — V. 137. — P. 65–83.
16. Smolders E., Mertens J. Cadmium // *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. — Dordrecht: Springer, 2013. — P. 283–311.
17. Suhani I., Sahab S., Srivastava V., Singh R.P. Impact of cadmium pollution on food safety and human health // *Current Opinion in Toxicology*. — 2021. — V. 27. — P. 1–7.
18. Yoshida F., Hata A., Tonegawa H. Itai-Itai disease and the countermeasures against cadmium pollution by the Kamioka mine // *Environmental Economics and Policy Studies*. — 1999. — V. 2. — P. 215–229.
19. Yuan Z., Luo T., Liu X., Hua H., Zhuang Y., Zhang X., Zhang L., Zhang Y., Xu W., Ren J. Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution // *Science of the Total Environment*. — 2019. — V. 676. — P. 87–96.
20. Фазлыева А.С., Даукаев Р.А., Каримов Д.О. Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов // *Медицина труда и экология человека*. — 2022. — № 1. — С. 220–235.
21. Mikhailenko A.V., Ruban D.A., Ermolaev V.A., van Loon A.J. Cadmium Pollution in the Tourism Environment: A Literature Review // *Geosciences*. — 2020. — V. 10. — P. 242.
22. Gar'kusha D.N., Fedorov Y.A., Knyazeva T.V., Tambieva, N.S. Field Simulation of Cadmium Pollution of a Freshwater Body // *Water Resources*. — 2018, — 45. — P. 746–756.
23. Козуб С.Н. Анализ современного состояния и выбор сырья технологии вторичного кадмия // *Технологический аудит и резервы производства*. — 2015. — № 4. — С. 37–41.
24. Наумов А.В. Изменения рынка кадмия в 2007–2013 гг. // *Цветная металлургия*. — 2014. — № 1. — С. 57–65.
25. Callaghan R.M. Cadmium // *U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries*. — 2022. — URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-cadmium.pdf> (Дата обращения: 6.07.2022 г.).

26. Bucci K., Tulio M., Rochman C.M. What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review // *Ecological Applications*. — 2020. — V. 30. — P. e02044.
27. Lagisz M., Vasilakopoulou K., Bridge C., Santamouris M., Nakagawa S. Rapid systematic reviews for synthesizing research on built environment // *Environmental Development*. — 2022. — V. 43. — P. 100730.
28. Ropret Homar A., Knežević Cvelbar L. The effects of framing on environmental decisions: A systematic literature review // *Ecological Economics*. — 2021. — V. 183. — P. 106950.
29. Prancute R. Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World // *Publications*. — 2021. — V. 9. — P. 12.
30. Sinha P., Kriegner C.J., Schew W.A., Kaczmar S.W., Traister M., Wilson D.J. Regulatory policy governing cadmium-telluride photovoltaics: A case study contrasting life cycle management with the precautionary principle // *Energy Policy*. — 2008. — V. 36. — P. 381–387.
31. Ftenakis V.M., Morris S.C., Moskowitz P.D., Morgan D. Toxicity of CdTe, CIS and CGS. *Progress in Photovoltaics*. — 1999. — V. 7. — P. 489–497.
32. Morgan L.M., Shines C.J., Jeter S.P., Wilson R.E., Elwell P.E., Price H.C., Moskowitz P.D. Acute pulmonary toxicity of copper gallium diselenide, copper indium diselenide, and cadmium telluride intratracheally instilled into rats // *Environmental Research*. — 1995. — V. 71. — P. 16–24.
33. Morgan L.M., Shines C.J., Jeter S.P., Blazka M.E., Elwell P.E., Wilson R.E., Ward S.M., Price H.C., Moskowitz P.D. Comparative pulmonary absorption, distribution and toxicity of copper gallium diselenide, copper indium diselenide, and cadmium telluride in Sprague-Dawley rats // *Toxicology and Applied Pharmacology*. — 1997. — V. 147. — P. 399–410.
34. Bergbäck B., Anderberg S., Lohm U. Accumulated environmental impact: the case of cadmium in Sweden // *Science of the Total Environment*. — 1994. — V. 145. — P. 13–28.
35. Page A.L., Bingham F.T. Cadmium residues in the environment // *Residue Reviews*. — 1973. — V. 48. — P. 1–43.
36. Dudka S., Adriano D.C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review // *Journal of Environmental Quality*. — 1997. — V. 26. — P. 590–602.
37. Dudka S., Piotrowska M., Terelak H. Transfer of cadmium, lead, and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: A field study // *Environmental Pollution*. — 1996. — V. 94. — P. 181–188.
38. Chaney R.L., Brown S.L., Stuczynski T.I., Daniels W.L., Henry C.L., Li Y.-M., Siebielec G., Malik M., Angle J.S., Ryan J.A., Compton H. Risk assessment and remediation of soils contaminated by mining and smelting of lead, zinc and cadmium // *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*. — 2000. — V. 16. — P. 175–192.
39. Bi X., Feng X., Yang Y., Qiu G., Li G. Quantitative assessment of cadmium emission from zinc smelting and its influences on the surface soils and mosses in Hezhang County, Southwestern China // *Atmospheric Environment*. — 2006. — V. 40. — P. 4228–4233.

40. Hu X., Ding Z. Lead/cadmium contamination and lead isotopic ratios in vegetables grown in peri-urban and mining/smelting contaminated sites in Nanjing, China // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. — 2009. — V. 82. — P. 80–84.
41. Zhong Q., Yin M., Zhang Q., Beiyuan J., Liu J., Yang X., Wang J. Wang L., Jiang Y., Xiao T., Zhang Z. Cadmium isotopic fractionation in lead-zinc smelting process and signatures in fluvial sediments // *Journal of Hazardous Materials*. — 2021. — V. 411. — P. 125015.
42. Chrastný V., Vaněk A., Komárek M., Farkas J., Drabek O., Vokurková P., Němcová J. Incubation of air-pollution-control residues from secondary Pb smelter in deciduous and coniferous organic soil horizons: Leachability of lead, cadmium and zinc // *Journal of Hazardous Materials*. — 2012. — V. 209–210. — P. 40–47.
43. Fthenakis V.M., Hyung C.K., Alsema E. Emissions from photovoltaic life cycles // *Environmental Science and Technology*. — 2008. — V. 42. — P. 2168–2174.
44. Гвоздкова Ю.Д., Гвоздкова И.А. Многокритериальная эколого-ориентированная оценка энергоустановок на основе фотоэлементов с различным материалом активного слоя // *Строительство и техногенная безопасность*. — 2019. — № 17. — С. 89–101.
45. Legrand M., McConnell J.R., Lestel L., Preunkert S., Arienzo M., Chellman N.J., Stohl A., Eckhardt S. Cadmium Pollution From Zinc-Smelters up to Fourfold Higher Than Expected in Western Europe in the 1980s as Revealed by Alpine Ice // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — V. 47. — P. e2020GL087537.
46. Spinazze A., Cattaneo A., Monticelli D., Recchia S., Rovelli S., Fustinoni S., Cavallo D.M. Occupational exposure to arsenic and cadmium in thin-film solar cell production // *Annals of Occupational Hygiene*. — 2015. — V. 59. — P. 572–585.
47. Mahendra S., Zhu H., Colvin V.L., Alvarez P.J. Quantum dot weathering results in microbial toxicity // *Environmental Science and Technology*. — 2008. — V. 42. — P. 9424–9430.
48. Buffet P.-E., Zalouk-Vergnoux A., Poirier L., Lopes C., Risso-de-Faverney C., Guibbolini M., Gilliland D., Perrein-Ettajani H., Valsami-Jones E., Mouneyrac C. Cadmium sulfide quantum dots induce oxidative stress and behavioral impairments in the marine clam *Scrobicularia plana*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. — 2015. — V. 34. — P. 1659–1664.
49. Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F., Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook // *Science of the Total Environment*. — 2021. — V. 759. — P. 143528.
50. Wang Y.-J., Tian Y., Zhou Q., Tian Y., Ye J. China's supply and demand status of cadmium and control countermeasures for cadmium // *Modern Chemical Industry*. — 2019. — V. 39. — P. 16–20.
51. Yan S., Xu J. Development of Cd-free Buffer Materials for CZTS Thin-film Solar Cells // *Materials Reports*. — 2020. — V. 34. — P. 07045–07052.
52. Dhar A., Naeth M.A., Jennings P.D., Gamal El-Din M. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems // *Science of the Total Environment*. — 2020. — V. 718. — P. 134602.

53. Tammaro M., Salluzzo A., Rimauro J., Schiavo S., Manzo S. Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels // *Journal of Hazardous Materials*. — 2016. — V. 306. — P. 395–405.
54. Hossain M.S., Latifa G.A., Prianqa, Nayeem A.A. Review of cadmium pollution in Bangladesh // *Journal of Health and Pollution*. — 2019. — V. 9. — P. 1–10.
55. Irfan M., Elavarasan R.M., Hao Y., Feng M., Sailan D. An assessment of consumers' willingness to utilize solar energy in China: End-users' perspective // *Journal of Cleaner Production*. — 2021. — V. 292. — P. 126008.
56. Izam N.S.M.N., Itam Z., Sing W.L., Syamsir A. Sustainable Development Perspectives of Solar Energy Technologies with Focus on Solar Photovoltaic — A Review // *Energies*. — 2022. — V. 15. — P. 2790.
57. Boosagulla D., Mandati S., Misra P., Allikayala R., Sarada B.V. Pulse electrodeposited zinc sulfide as an eco-friendly buffer layer for the cadmium-free thin-film solar cells // *Superlattices and Microstructures*. — 2021. — V. 160. — P. 107060.
58. Jaramillo-Quintero O.A., Baron-Jaimes A., Miranda-Gamboa R.A., Rincon M.E. Cadmium-free ZnS interfacial layer for hydrothermally processed Sb₂S₃ solar cells // *Solar Energy*. — 2021. — V. 224. — P. 697–702.

Mikhailenko Anna Vladimirovna

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1156-770X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=712702

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55971159100>

Ruban Dmitry Aleksandrovitch

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Moscow, Russia

E-mail: ruban-d@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2847-645X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=114734

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8520926600>

Cadmium pollution of environment by the use of solar cells: a systemic review of the problem

Abstract. Use of solar cells contributes to ecologization of the energy sector of economy, but also requires taking into account various influences on environment. Particularly, many of them utilize cadmium (as cadmium telluride), which triggers concerns of possible pollution by this toxic heavy metal. This article summarizes and systematizes a significant amount of information, which allows evaluating such a pollution. Methodologically, this work is based on bibliographical survey and examination of the content of articles in the leading domestic and foreign editions on the considered problematic. It is established that the problem of cadmium pollution of environment by the use of solar cells has generally been formulated in the contemporary science, but as hypothetical to significant degree, and its treatment is distinguished by remarkable incompleteness. The authors show that in the light of the earlier conducted research, pollution of environment (also industrial) can take place together with cadmium extraction, production of solar cells, their use and utilization, the facts of which are known. The scale of this problem is currently difficult to establish, but its under-study itself creates risks of its large-scale appearance in the nearest future. Sometimes, scientists raise the question of replacing cadmium-bearing materials by those ecologically more “clean”. In this regard, a question is posed about whether such a replacement would diminish interest to correct utilization of already used cells, mass accumulation of which as waste makes pollution inevitable. The attention is also paid to the fact that even if solar energetic itself diminishes cadmium flux to environment via replacement of “traditional” sources of energy, changes in the geography of production of the latter is able to extend the appearance of the considered problem.

Keywords: bibliographical information; pollution; industrial environment; solar energetic; cadmium telluride; utilization; photoelectrical panels