ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСТОГО ТЕЛЛУРА В ОБЛАСТИ ЗЕЛЁНОЙ ЭКОНОМИКИ

Савриева Икбол Баходировна
Ташкентский филиал Самаркандского университета ветеринарной медицины, животноводства и биотехнологии
Миралиева Азиза Каюмовна
Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций, г.Ташкент
Юсупова Камила Муратовна
Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций, г.Ташкент
Рашидов Абдумалик Абдулхай ўғли
Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладных технических квалификаций, г.Ташкент
E-mail: aziza.miraliyeva5927@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается роль чистого теллура как стратегического материала в контексте перехода к зелёной экономике. Анализируются основные направления его применения в тонкоплёночной фотовольтаике на основе теллурида кадмия (CdTe), термоэлектрических системах и технологиях рециклинга. Обсуждаются проблемы дефицита сырья, экологической безопасности производства и стратегические риски концентрации поставок. Сделан вывод о необходимости комплексной государственной политики в области критических минералов.

Ключевые слова: теллур; зелёная экономика; CdTe-фотовольтаика; термоэлектрические модули; критические минералы; устойчивое развитие; энергетический переход.

Annotation. The article examines the role of pure tellurium as a strategic material in the context of the transition to a green economy. The main directions of its application in thin-film photovoltaics based on cadmium telluride (CdTe), thermoelectric systems and recycling technologies are analyzed. The problems of shortage of raw materials, environmental safety of production and strategic risks of concentration of supplies are discussed. The conclusion is made about the need for a comprehensive state policy in the field of critical minerals.

Keywords: tellurium; green economy; CdTe-photovoltaics; thermoelectric modules; critical minerals; sustainable development; energy transition.

Annotatsiya. Maqolada yashil iqtisodiyotga o‘tish sharoitida sof tellurning strategik material sifatidagi o‘rni ko‘rib chiqiladi. Kadmiy telluridi (CdTe) asosidagi yupqa plyonkali fotovoltaikada, termoelektr tizimlarida va qayta ishlash texnologiyalarida uni qo‘llashning asosiy yo‘nalishlari tahlil qilinadi. Xomashyo

ISSN 3030-3907

taqchilligi, ishlab chiqarishning ekologik xavfsizligi va ta’minotni konsentratsiyalashning strategik xatarlari muhokama qilinadi. Muhim minerallar sohasida kompleks davlat siyosati zarurligi to‘g‘risida xulosa chiqarildi.

Kalit so‘zlar: tellur; yashil iqtisodiyot; CdTe-fotovoltaika; termoelektrik modullar; muhim minerallar; barqaror rivojlanish; energetik o‘tish.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Переход мировой экономики к низкоуглеродной модели развития обусловил резкий рост спроса на ряд редких и рассеянных элементов, являющихся незаменимыми компонентами чистых технологий. Среди них особое место занимает теллур (Te, порядковый номер 52) — полуметалл XVI группы периодической системы, долгое время воспринимавшийся лишь как второстепенный побочный продукт медеплавильного производства.

Сегодня чистый теллур (чистотой 99,99 % и выше) является ключевым компонентом тонкоплёночных солнечных элементов на основе теллурида кадмия (CdTe), термоэлектрических преобразователей, систем накопления энергии и ряда других технологий, формирующих облик зелёной экономики XXI века. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в сценарии устойчивого развития (SDS) спрос на теллур к 2040 году возрастёт семикратно по сравнению с текущим уровнем производства — примерно 500 тонн в год [1].

При этом планы крупнейшего производителя CdTe-модулей компании First Solar по наращиванию мощностей до 16 ГВт к 2025 году, согласно расчётам Института экологических наук Автономного университета Барселоны, уже сами по себе способны превысить совокупный объём мировой добычи теллура [2]. Это делает вопрос об устойчивости цепочек поставок данного элемента одним из ключевых в повестке энергетического перехода.

Цель настоящей статьи — систематизировать актуальные направления применения чистого теллура в зелёной экономике, оценить масштабы его востребованности и обозначить ключевые вызовы, стоящие перед данным сегментом.

2. ТЕЛЛУР КАК КРИТИЧЕСКИЙ МИНЕРАЛ: РЕСУРСНАЯ БАЗА И РЫНОК.

Теллур относится к числу наиболее редких элементов земной коры: его кларк оценивается приблизительно в 1–5 мкг/кг, что сопоставимо с золотом. Промышленная добыча осуществляется преимущественно как попутного продукта при электролитическом рафинировании меди: анодный

ISSN 3030-3907

шлам, образующийся в ходе этого процесса, концентрирует теллур до 3–8 %.

По данным Геологической службы США (USGS), мировое производство рафинированного теллура составляет около 500–600 тонн в год, при этом на долю Китая приходится свыше 60 % мирового выпуска. Среди прочих значимых производителей — Япония, Канада, Россия и ряд стран Латинской Америки [3]. Столь высокая географическая концентрация производства придаёт теллуру статус «критического минерала» в классификациях Европейского союза, США и ряда других юрисдикций.

Средняя цена теллура на американском рынке в 2022 году составила около 70 долл./кг, что практически совпало с уровнем 2021 года (69,72 долл./кг). Производственные затраты несколько возросли, однако были частично компенсированы увеличением предложения. В период пика спроса 2010–2012 годов цена превышала 300 долл./кг [3].

В июне 2022 года правительство Китая утвердило план развития возобновляемой энергетики с целевыми показателями 25 % ВИЭ в энергопотреблении и 1,2 млрд кВт суммарной мощности ветровых и солнечных установок к 2030 году [3]. Реализация этих планов неизбежно приведёт к дополнительному росту спроса на теллур для тонкоплёночных CdTe-модулей.

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСТОГО ТЕЛЛУРА В ЗЕЛЁНОЙ ЭКОНОМИКЕ.

3.1. Тонкоплёночная фотовольтаика на основе CdTe

Наиболее значимым применением чистого теллура в зелёной энергетике является производство тонкоплёночных солнечных модулей на основе теллурида кадмия. По данным NREL (Национальной лаборатории возобновляемой энергетики США), CdTe-элементы занимают второе место среди фотовольтаических технологий после кристаллического кремния, обеспечивая 21 % рынка в США и 4 % мирового рынка по состоянию на 2022 год. За последние 15 лет КПД промышленных CdTe-модулей более чем удвоился, а масштаб развёртывания вырос с мегаватт до гигаватт [4].

Солнечный элемент CdTe-типа представляет собой многослойную структуру, в которой поглощающий слой теллурида кадмия толщиной 2–4 мкм нанесён методом сублимации на стеклянную подложку. Ширина запрещённой зоны CdTe (1,45 эВ) близка к теоретически оптимальному значению для одиночного p-n-перехода, что обусловливает высокий КПД поглощения солнечного излучения. В современных ячейках теллурид кадмия-селена (CdSeTe) применяется совместно с CdTe для улучшения световой абсорбции [4].

ISSN 3030-3907

В августе 2022 года Министерство энергетики США запустило Консорциум по ускорению развития CdTe-фотовольтаики (CdTe Accelerator Consortium) с бюджетом 20 млн долл. под управлением NREL. Программа нацелена на достижение КПД элементов свыше 24 % к 2025 году и свыше 26 % к 2030 году при одновременном снижении стоимости модулей ниже 0,15 долл./Вт [5].

Период окупаемости энергозатрат на производство CdTe-модуля (EPBT) составляет, как правило, 0,8–1,5 года, тогда как для модулей из кристаллического кремния этот показатель равен 2–4 годам [6]. С учётом срока службы 25–30 лет это означает, что на протяжении 93–97 % жизненного цикла модуль генерирует практически безуглеродную электроэнергию.

Вместе с тем оценки доступности теллура для CdTe-производства остаются дискуссионными. Системно-динамическое моделирование цепочек поставок теллура на период 2023–2050 годов показывает, что при отсутствии новых источников добычи и рециклинга нарастающий дефицит сырья станет одним из главных ограничителей масштабирования технологии [6].

3.2. Термоэлектрические преобразователи энергии.

Второй ключевой областью применения является термоэлектрика. Теллурид висмута (Bi2Te3) представляет собой наиболее коммерчески зрелый термоэлектрический материал, хорошо зарекомендовавший себя в электронном охлаждении и постепенно завоёвывающий позиции в генерации электроэнергии из низко- и среднетемпературного тепла. Обширные исследования последнего десятилетия, направленные на повышение коэффициента термоэлектрической эффективности ZT, привлекают интерес как академической, так и промышленной среды [7].

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) способны преобразовывать тепловую энергию непосредственно в электрическую посредством эффекта Зеебека. Их ключевые преимущества в контексте зелёной экономики — отсутствие движущихся частей, экологическая безопасность, высокая надёжность и способность утилизировать тепло в диапазоне ниже 573 К, где сосредоточено около 50 % промышленного теплосброса [8].

В практике зелёной экономики ТЭГ на основе Bi2Te3 находят применение в следующих сегментах:

утилизация промышленного тепла — термогенераторы на трубах отходящих газов, позволяющие снизить удельное потребление первичного топлива;

ISSN 3030-3907

рекуперация тепла выхлопных газов в гибридных и электрических автомобилях с потенциальным снижением расхода топлива на 3–5 %;

автономное питание датчиков и телеметрических систем в труднодоступных районах.

Разработки 2023 года в области наноструктурированных Bi2Te3-материалов, полученных методами порошкового искро-плазменного спекания, демонстрируют значения ZT в диапазоне 1,0–1,4 при комнатных температурах, открывая перспективу коммерческого внедрения ТЭГ в промышленных масштабах [9].

3.3. Рециклинг и циркулярная экономика.

По мере выхода из эксплуатации первых промышленных партий CdTe-модулей (со сроком службы 25–30 лет) рециклинг становится значимым источником вторичного теллура. Компания First Solar реализует программы переработки, позволяющие извлекать до 95 % материалов из отработавших панелей [10]. Системно-динамические модели свидетельствуют, что к 2050 году переработка снятых с эксплуатации модулей способна обеспечить до 17 % совокупного спроса на теллур и до 34 % спроса в сегменте CdTe-фотовольтаики [6].

Таким образом, рециклинг приобретает не только экологическое, но и стратегическое значение как инструмент снижения зависимости производства от первичного сырья.

4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЛУРА.

Несмотря на ведущую роль в переходе к чистой энергетике, производство и применение теллура сопряжено с рядом экологических вопросов, требующих взвешенной оценки.

Токсикологический профиль. Элементарный теллур и большинство его неорганических соединений обладают умеренной токсичностью. Теллурид кадмия, используемый в CdTe-панелях, значительно менее биодоступен, чем растворимые соли кадмия, что существенно снижает его экологическую опасность при надлежащем обращении и соблюдении регламентов утилизации.

Углеродный след. Анализ жизненного цикла (LCA) тонкоплёночных CdTe-панелей показывает, что производство CdTe требует меньшего количества кремниевых отходов и редкоземельных металлов по сравнению с традиционными технологиями, что обусловливает более низкие выбросы на протяжении всего жизненного цикла [6]. Период окупаемости углеродных затрат при этом не превышает 1,5 года.

ISSN 3030-3907

Инфраструктура утилизации. Развитие замкнутых цепочек обращения с CdTe-модулями является одновременно экологической необходимостью и экономической возможностью. Расширение мощностей переработки снижает зависимость производства от первичного сырья и уменьшает экологический след добычи меди как основного источника теллура.

5. СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ И РЕГУЛЯТОРНАЯ СРЕДА.

5.1. Дефицит сырья и риски цепочек поставок

Главным системным ограничением для масштабного использования теллура остаётся его ресурсная база. Производство теллура жёстко привязано к объёмам выплавки меди: увеличить его выпуск без пропорционального роста медеплавильных мощностей крайне затруднительно. МЭА прогнозирует, что в сценарии высокого проникновения CdTe-технологии спрос на теллур к 2040 году может достичь 1400 тонн при нынешнем производстве около 500 тонн — нагрузка, способная спровоцировать устойчивый дефицит [1].

Возможные меры реагирования включают:

разработку новых месторождений теллуросодержащих руд (в том числе золото-теллуридных жил);

систематическое извлечение теллура из переработки электронного лома;

снижение удельного расхода теллура за счёт уменьшения толщины поглощающих слоёв до субмикронных значений;

разработку теллур-замещающих и тандемных фотовольтаических технологий.

5.2. Регуляторный контекст.

Осознание стратегической важности критических минералов нашло отражение в регуляторных инициативах ведущих экономик мира. В марте 2023 года Европейская комиссия представила законодательное предложение по критическому сырью (Critical Raw Materials Act, CRMA), впоследствии принятое и опубликованное 3 мая 2024 года как Регламент ЕС 2024/1252 [11].

Документ устанавливает ориентиры для внутреннего производства стратегического сырья к 2030 году: не менее 10 % потребностей ЕС — за счёт собственной добычи, не менее 40 % — за счёт внутренней переработки, не менее 25 % — за счёт рециклинга. Одновременно введено требование, согласно которому ни одна третья страна не должна обеспечивать более 65 % потребностей ЕС в каком-либо стратегическом сырье на любом этапе цепочки поставок [11].

ISSN 3030-3907

В США аналогичные цели реализуются в рамках Закона о снижении инфляции (Inflation Reduction Act) и программ Министерства энергетики, в частности упомянутого Консорциума CdTe Accelerator Consortium.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Чистый теллур занимает уникальное место в технологической экосистеме зелёной экономики. Его применение в тонкоплёночной CdTe-фотовольтаике, термоэлектрических системах и технологиях рециклинга делает этот элемент незаменимым компонентом низкоуглеродного энергетического перехода.

Вместе с тем крайняя ограниченность ресурсной базы и высокая географическая концентрация производства формируют значительные стратегические риски. Проведённый анализ показывает, что без системного решения проблемы дефицита теллура масштабирование ряда ключевых зелёных технологий будет существенно ограничено.

Комплексная политика в области критических минералов, включающая стимулирование геологоразведочных работ, развитие рециклинговой инфраструктуры, поддержку НИОКР по снижению удельного расхода теллура и диверсификацию цепочек поставок, является необходимым условием устойчивого использования данного ресурса и успешного завершения энергетического перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions [Electronic resource]. — Paris : IEA, 2021. — URL: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions (дата обращения: 01.06.2026).
2. First Tellurium Corp. First Tellurium Reports on Solar PV and Surging Demand for Silver and Tellurium [Electronic resource]. — GlobeNewswire, 2023. — URL: https://www.globenewswire.com/news-release/2023/03/15/2627658/0/en/index.html (дата обращения: 01.06.2026).
3. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2023: Tellurium [Electronic resource]. — Reston : USGS, 2023. — URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-tellurium.pdf (дата обращения: 01.06.2026).
4. U.S. Department of Energy. Cadmium Telluride Solar Cell [Electronic resource]. — Washington, D.C. : DOE, 2025. — URL: https://www.energy.gov/cmei/systems/cadmium-telluride (дата обращения: 01.06.2026).
5. National Renewable Energy Laboratory. Cadmium Telluride PV Accelerator Consortium [Electronic resource]. — Golden : NREL, 2023. — URL:

ISSN 3030-3907

https://ceramics.org/ceramic-tech-today/video-cadmium-telluride-solar-technology-gains-momentum/ (дата обращения: 01.06.2026).
6. Wichrowska A. et al. Cadmium Telluride (CdTe) Thin-Film Photovoltaics: A Sustainable Energy Solution to Support National Energy Resilience [Electronic resource] // ResearchGate. — 2026. — URL: https://www.researchgate.net/publication/396567052 (дата обращения: 01.06.2026).
7. Cao T., Shi X.-L., Li M. et al. Advances in Bismuth-Telluride-Based Thermoelectric Devices: Progress and Challenges // eScience. — 2023. — Vol. 3, № 3. — P. 100122. — DOI: 10.1016/j.esci.2023.100122.
8. Bismuth Telluride-Based Thermoelectric Devices for Low-Temperature Power Generation / N. Kumari [et al.] // arxiv. — 2025. — URL: https://arxiv.org/pdf/2507.06101 (дата обращения: 01.06.2026).
9. Bismuth Telluride-Based Efficient Thermoelectric Power Generator with Electrically Conducive Interfaces for Harvesting Low-Temperature Heat / ScienceDirect // Applied Materials Today. — 2022. — DOI: 10.1016/j.apmt.2022.000314.
10. Zimtu Capital Corp. Why Tellurium Could Be the Ultimate Key to Next-Gen Solar Panels [Electronic resource]. — 2024. — URL: https://www.zimtu.com/tellurium-next-gen-solar-panels/ (дата обращения: 01.06.2026).
11. European Union. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials [Electronic resource]. — Official Journal of the European Union. — 2024. — URL: https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/ (дата обращения: 01.06.2026).
12. International Energy Agency. Global Critical Minerals Outlook 2024 [Electronic resource]. — Paris : IEA, 2024. — URL: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024 (дата обращения: 01.06.2026).
13. Fthenakis V. M. End-of-Life Management and Recycling of PV Modules // Energy Policy. — 2000. — Vol. 28, № 14. — P. 1051–1058. — DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00091-4.
14. Green M. A. et al. Solar Cell Efficiency Tables (Version 63) // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2024. — Vol. 32, № 1. — P. 3–13. — DOI: 10.1002/pip.3750.
15. Bleiwas D. I. Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Solar Cells. USGS Circular 1365 [Electronic resource]. — Reston :

ISSN 3030-3907

U.S. Geological Survey, 2010. — URL: https://pubs.usgs.gov/circ/1365/pdf/circ1365.pdf (дата обращения: 01.06.2026).

ISSN 3030-3907