



## ОТКРИТИ РУДНИЦИ НА БЪДЕЩЕТО: ИНОВАЦИИТЕ, КОИТО ТРАНСФОРМИРАТ МИННОДОБИВНИЯ ОТРАСЪЛ

Данаил Терзийски<sup>1</sup>, Мартин Пушкарров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>кафедра „Разработване на полезни изкопаеми”, МТФ, Минно – геоложки университет „Св. Иван Рилски“, България, e-mail: d.terzyiski@mgu.bg

<sup>1</sup>кафедра „Разработване на полезни изкопаеми“, МТФ, Минно – геоложки университет „Св. Иван Рилски“, България, e-mail: m.pushkarov@mgu.bg

### РЕЗЮМЕ

Миннодобивната индустрия, и специално откритият добив, играе основна роля в глобалната икономика, като доставчик на ценни минерали и ресурси. Иновациите започват да променят облика на индустрията, като се насочват към оптимизация на процесите, намаляване на екологичния отпечатък и безопасността. Технологии дават възможността за преминаването към устойчиви индустриални модели, дигитализацията на процесите и внедряването на интелигентни системи за мониторинг позволяват в реално време да се обработват данни за ефективността, което оптимизира производствените резултати и намалява разходите. Екологичните технологии, системите за рекултивация на терени, устойчивото използване на водните ресурси и намаляване на въглеродните емисии стават важни компоненти в разработването на устойчиви модели на добив.

**Ключови думи:** открит добив, ресурси, бъдеще, трансформация, иновации, ефективност, екология.

## OPEN MINES OF THE FUTURE: THE INNOVATIONS THAT ARE TRANSFORMING THE MINING INDUSTRY

Danail Terziyski<sup>1</sup>, Martin Pushkarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Minerals Development, Faculty of Mining and Geology, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Bulgaria, e-mail: d.terzyiski@mgu.bg

<sup>1</sup>Department of Minerals Development, Faculty of Mining and Geology, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Bulgaria, e-mail m.pushkarov@mgu.bg

### ABSTRACT

The mining industry, and specifically open-pit mining, plays a major role in the global economy as a provider of valuable minerals and resources. Innovation is beginning to reshape the industry, focusing on process optimization, reduced environmental footprint, and safety. Technologies enable the transition to sustainable industrial models, the digitalization of processes and the implementation of intelligent monitoring systems allow for real-time processing of efficiency data, which optimizes production results and reduces costs. Environmental technologies, land reclamation systems, sustainable use of water resources and reduction of carbon emissions are becoming important components in the development of sustainable mining models.

**Keywords:** open pit mining, resources, future, transformation, innovation, efficiency, ecology.

### 1. Въведение

Откритият добив представлява основен елемент на съвременната индустриална система, осигурявайки минерални ресурси, необходими за производството в енергетиката, строителството, транспорта и високите технологии. Ефективността на добива и по-ниските разходи в сравнение с подземния добив, го утвърждава като предпочитан метод в целия свят. С нарастващото потребление и индустриализация, откритият добив има ключова роля в осигуряването на ресурсна сигурност и устойчив икономически растеж, въпреки предизвикателствата, свързани с екологични и социални допринасящи условия (1).



Традиционните методи при открития добив, макар и с доказана ефективност, той е изправен пред сериозни предизвикателства в условията на засилени екологични рестрикции, икономическа нестабилност и социално недоверие към себе си.

Икономическите предизвикателства произтичат от нарастващите разходи за добив при изчерпване на леснодостъпни залежи, нестабилността на международните пазари на суровини и необходимостта от технологично обновление на остарели производствени мощности. Това води до повишени капитало – вложения, както и изисквания и намалена рентабилност.

От социална перспектива, откритият добив често предизвиква напрежение в местните общности, особено когато липсва ефективна комуникация.

Тези предизвикателства налагат преосмисляне на конвенционалните подходи и скоростно внедряване на иновативни, устойчиви и социални технологии в миннодобивния отрасъл.

Настоящото изследване има за цел да проведе задълбочен анализ на ролята на иновациите в процеса на трансформация на открития добив към по-ефективен, устойчив и ресурсно оптимизиран модел на експлоатация на различни находища. Чрез иновативен подход се оценяват въздействията на съвременните технологични решения – включително автоматизация, изкуствен интелект и цифрова инфраструктура, като тя следни производителността, екологичната и социалната отговорност на миннодобивните предприятия. Изследването се стреми да опише иновативни практики с потенциал за интеграция на дългосрочни стратегии в екологични и икономически предизвикателства.

## 2. Състояние на открития добив

Традиционният открит добив се базира на механизирани, но сравнително нискотехнологични методи за извличане на полезни изкопаеми от повърхностни или близки до повърхността залежи. Основните етапи включват:

- **Премахване на почвения слой (откривка)** чрез булдозери и багери или друг тип механизация;
- **Пробивно-взривни работи**, при които чрез сондиране и експлозивни суспензии се раздробява скалната маса на определена фракция и след това чрез механизация се извършват товаро-разтоварни дейности;
- **Товаро-разтоварни дейности** с помощта на различна механизация се изпълняват този вид дейности;
- **Транспорт на рудата** с тежкотоварни машини, самосвали и конвейерни ленти до обогатителни инсталации или фабрики;
- **Отвеждане на отпадъци**, оформяне и направата на насипища (хвостохранилища).

Тези методи се характеризират с висока производителност, разчитат на човешка сила и често водят до екологични щети. При липса на автоматизация и цифров контрол, ефективността на процесите зависи силно от опита на операторите и физическите възможности на използваното оборудване.

Откритият добив остава на челна позиция в добива на полезни изкопаеми в световен мащаб. Той реализира над 60% от глобалното производство на твърди полезни изкопаеми по обем, благодарение на относително по-ниските оперативни разходи и възможността за механизация в големи мащаби.

Едни от основните предизвикателства и трудности в открития добив на полезни изкопаеми са:

- **Изчерпване на леснодостъпни находища**, което води до необходимост от добив в неблагоприятни геоложки и климатични условия;
- **Увеличаване на рестрикциите в екологични регулации**, особено в рамките на политиките за устойчиво развитие и декарбонизация;
- **Ръст на социалното недоверие** около минни проекти поради конфликти с местни общности и недостатъчна социална ангажираност от страна на добивните компании; (Като този елемент често се обръща на 180 градуса след започването на добиване на ПИ);
- **Бавно навлизане на иновации**, особено в региони с ограничен достъп до капитал или квалифицирана работна ръка.

Добивът на полезни изкопаеми е подложен на все по-силен натиск от страна на глобалната зелена трансформация, което налага адаптиране към изискванията за въглеродно неутрална икономика,



кръгова употреба на ресурси и прилагане на дигитални решения за мониторинг, автоматизация и прозрачност.

За получаването на адекватен отговор от страна на минно – добивните предприятия на поставените тенденции, редица водещи компании започват да инвестират в ново поколение добив, като прилагат дигитално управление, автономни съоръжения, съответно с по-нисък въглероден отпечатък и висока екологична отговорност.

### 3. Иновациите в открития добив

Иновациите в открития добив са явен фактор за трансформацията на традиционните практики за постигането на по-висока ефективност, устойчивост и безопасност при работа. Навлизането на автономни тежкотоварни средства (управлявани отдалечено), автоматизирани сондажни системи (чрез зададени параметри машините автоматично изготвят сондажното поле), както и дроне за въздушен мониторинг (автоматично заснемане на иззети обеми, картографиране, насипищни работи и др.), оперативно изпълнение в добива преминава плавно към нови иновативни решения. Използването на изкуствен интелект в минното планиране и развитие, позволява прецизно моделиране на находища, динамичното им оптимизиране на добивните планове, както и прогнозиране на различни видове рискове в реално време (Разбира се използването на изкуствен интелект не премахва специалистите, а им помага за взимането на най – доброто решение за конкретния случай). Тези технологични решения не само повишават производителността на добива, но и значително намаляват екологичния отпечатък чрез оптимизация на ресурсите, намаляване на емисии и минимизиране на нарушените терените. Безопасността в открития добив бележи ръст чрез дистанционно управление на критични операции, намаляване на човешкото присъствие в рискови зони и интеграция на интелигентни системи за предупреждение и контрол. В този аспект, иновациите са стратегически инструмент за адаптация на сектора към глобалните изисквания за устойчиво развитие и технологична модернизация на откритите рудници. В **таблица 1** са представени различни ново въведени технологични решения в рудници и прилагането им в реална работна среда, като се отчитат и редица ползи за добива на полезни изкопаеми.

Таблица 1.

Държава	Компания / Проект	Приложени иновации	Ползи
Австралия	<i>Rio Tinto</i> – “Mine of the Future”	Автономни камиони, централизирано дистанционно управление, AI за логистика	Повишена ефективност, пониски разходи, намалени трудови рискове
Русия	<i>Norilsk Nickel + Zyfra</i> – “Интелигентна мина”	AI-базирани системи, цифров двойник на рудника	По-добро планиране, оптимизация на ресурси, автоматизация на вземането на решения
Чили	<i>Codelco</i> – медни рудници	IoT-сензори за мониторинг на геомеханични параметри, анализ на големи данни	Превантивна поддръжка, сигурност, устойчиво управление на рисковете
Канада	<i>Goldcorp (Newmont)</i> – “Borden Mine”	Електрически машини, подземна цифрова свързаност, безвъглеродна експлоатация	Нулеви емисии, ниски нива на шум и прах, подобрена екологична устойчивост
ЮАР	<i>Anglo American</i> – “FutureSmart Mining”	Дигитална трансформация, машинно обучение, дроне	Ускорено вземане на решения, проследимост, прозрачност на производството
България	<i>Асарел-Медет АД</i> – Панагюрище	Геоинформационни системи (GIS), автоматизирани сондажи, телеметричен мониторинг	Повишена точност, намалени загуби на суровини, дистанционно управление



Държава	Компания / Проект	Приложени иновации	Ползи
България	Елаците-Мед АД – Етрополе	SCADA системи, оптимизация на флота, дронове за картографиране и контрол на рекултивация	Подобрено планиране, екологичен контрол, дигитална ефективност
България	Дънди Прешъс Металс АД – Крумовград	SCADA системи за управление на процесите в реално време Автоматизирано следене на параметри; Сателитно и дронovo наблюдение на терена и рекултивационните площи; Геотехнически и екологичен мониторинг със сензори;	Подобрено планиране, екологичен контрол, дигитална ефективност

Ролята на съвременни технологии в минната индустрия е съществена и е с решаваща роля за трансформацията на традиционните методи за добив (2). Автоматизацията, цифровите технологии и интелигентните системи за управление, превръщат рудниците днес да работят с повишена ефективност, по-ниски оперативни разходи и по-високо ниво на безопасност.

Автономните превозни средства, SCADA системите и GPS-базираното проследяване на оборудване и работници позволяват в реално време да се управляват и оптимизират основните производствени процеси от ръководните кадри в предприятието. Използването на сензори и IoT технологии подобряват мониторинга на параметри, като температура, налягане, наличие на вредни емисии, както и вибрации, с което се намалява рискът от инциденти и се повишава устойчивостта на миннодобивното предприятие.

Дигиталните модели и пространствени системи (GIS), съчетани с използването на дронове и сателитна визуализация, позволяват прецизно геоложко картографиране, планиране на добив и контрол върху въздействието на заобикалящата ни околната среда. В същото време, устойчивите практики като затворени водни цикли и пречиствателни инсталации минимизират екологичния отпечатък на добива върху водите.

Приносът на технологиите в социален аспект, чрез дистанционно обучение, симулационни платформи и дигитални инструменти и елементи се използва за повишаване на квалификацията на заетите в сектора, миннодобивните предприятия създават нови възможности за заетост и развитие на необходимите им кадри.

Технологичната трансформация в добивната индустрия е необратим факт, които не само повишава производителността и устойчивостта, но и я адаптира към изискванията на бъдещето – дигитална, безопасна и отговорна среда спрямо работещите хора и заобикалящата ни околна среда.

#### **4. Екологични технологии и устойчивост в открития добив**

Нарастващите екологични предизвикателства и глобалната необходимост от устойчиво използване на природните ресурси, както и технологиите за опазване на околната среда заемат основно значение в модернизацията на минната индустрия. Откритият добив, оказва значително въздействие върху околната среда – включително промяна на ландшафта, замърсяване на въздуха и водите, и отделяне на парникови газове (3). При получаването на тези въздействия върху околната среда съвременните рудници все по-често прилагат цялостни устойчиви решения, които са основани на научни принципи и международни екологични стандарти за опазването на околната среда. Модерните системи за **рекултивация на нарушените терени**, които целят да възстановят екосистемите, повторно залесяване, стабилизиране на почвите и адаптиране на ландшафта за бъдещо икономическо или екологично използване.

- **Настоящите системи за рекултивация на нарушени терени в открития добив**



Една от най-сериозните екологични последици на открития добив е трайното изменение на ландшафта и изземането на почвения хумусен слой (които в последствие бива върнат там от където е иззет). Нарушените терени, следствие разработването на дадено находище, често се характеризирани с ерозионна нестабилност, загуба на биологично разнообразие, като тези проблеми при открития добив изискват системно и научно издържан подход за възстановяване за бъдещото им използване. **Днешните технологии за рекултивация** се утвърждават, като неразделна част от устойчивото управление на миннодобивната индустрия.

Съвременните системи за рекултивация се основават чрез **подхода**, при който целта не е просто визуално възстановяване на нарушените терени, а пълноценно **възстановяване на екологичните функции** на терена – като тези терени отново да бъдат плодородни, да се възвърне водният им баланс, биоразнообразие в района да бъде възстановено, както и да се интегрира рекултивацията заедно със заобикалящата я околна среда.

Рекултивационните дейности се подразделят на няколко етапа:

1. **Техническа рекултивация** – Оформяне на нарушените терена чрез насипване, терасиране, дренажен и ерозионен контрол, като целта на този тип рекултивация е да се изгради устойчивостта на терена за последващите дейности в цялостната рекултивацията.
2. **Биологична рекултивация** – Полагане на почвения хумусен слой (предварително иззет и депониран за биологичната рекултивация) полагане на почвени субстрати (подобрители за почвения слой), микробиологична активизация, както и засаждане на устойчиви растителни видове за дадения регион, както и бързо растящи култури.
3. **Мониторинг и управление** – Проследяване на екологични индикатори (почвено плодородие, флората и фауната, както и устойчивост на засушаване) следени от мониторинга и приложното коригиране на различните действия в дългосрочен план.

Освен това, въвеждането на **технологии за устойчиво управление на водни ресурси**, като затворени водни цикли и модерни системи за пречистване, допринася за ограничаване на водната консумация и предотвратяване на замърсяването на повърхностните и подземни водоизточници.

#### - **Технологии за устойчиво управление на водните ресурси в открития добив**

Водните ресурси са изключително важни за функционирането на миннодобивната индустрия (4) – те се използват, както за преработка на добиваната руда, така и за прахоподтискане на пътищата и различните технологични процеси, охлаждане на оборудване и поддръжка на санитарно-битови нужди.

#### **Основни технологични решения прилагани в устойчивото управление на водните ресурси:**

1. **Затворени водни цикли;**  
Прилагането на такъв тип системи за вътрешно рециклиране на технологичната вода значително намалява необходимостта от използването на свежа вода. Водата се използва многократно чрез пречистване и рецикулация в различни технологични процеси (напр. флотация, шламови потоци, прахоподтискане);
2. **Механично и биологично пречистване;**  
Изграждането на многостепенни пречиствателни станции позволява отстраняването на тежките метали, суспендирани твърди вещества и химически замърсители преди водата да бъде върната в околната среда.
3. **Системи за добив и управление на дъждовни и дренажни води**  
Дренажните системи насочват повърхностния и подземния отток на водата към контролирани резервоари, където тя се третира и/или използва повторно. Това предпазва, както от ерозия, така и от замърсяване на съседни екосистеми в близост до рудника и неговата фабрика.
4. **Воден мониторинг в реално време (IoT и SCADA системи)**  
Интегрирани сензори и дистанционно управление чрез SCADA платформи позволяват непрекъснато наблюдение на параметрите, като дебит, рН, минерален състав, както и замърсители в нея, което улеснява адаптивното управление на водните потоци.
5. **Зелени технологии за водозадържане и възстановяване на водния баланс;**



Използването на зелени инфраструктури, като изкуствени влажни зони, растителни системи за инфилтрация и почвени резервоари, които спомагат за естественото пречистване и възстановяване на локалния воден цикъл.

Паралелно с това, рудодобивните предприятия въвеждат **енергийно ефективни процеси**, които минимизират **въглеродния отпечатък** от дейността си чрез оптимизация на електрическото потребление, използване на възобновяеми енергийни източници и прилагане на системи за управление на въглеродните емисии.

#### - Енергийно ефективни процеси в открития добив

Миннодобивната индустрия е един от енергоемките отрасли, в който добивът, преработката и транспортът на суровини изискват значителни количества електрическа и горивна енергия. Енергийната ефективност се превръща в стратегическа необходимост, както за намаляване на въглеродния отпечатък, така и за оптимизиране на производствените разходи в предприятието.

#### Основни направления и технологии:

##### 1. Автоматизация и интелигентно управление на оборудването

Внедряването на интелигентни системи за контрол и управление (*например SCADA и PLC системи*) позволява оптимизиране на енергийната консумация в реално време.

##### 2. Електрификация на мобилното оборудване

Преходът от дизелови към електрически багери, самосвали и транспортни средства значително намалява както енергийния разход на тон руда, така и локалните емисии на парникови газове и финните прахови частици. Пример за това са използваните **електрически самосвали с регенеративно спиране**, които възстановяват енергия при спускане.

##### 3. Използване на възобновяеми енергийни източници (ВЕИ)

Интеграцията на фотоволтаични системи, вятърни турбини и хибридни енергийни инсталации в минни комплекси осигурява локално производство на чиста енергия.

##### 4. Рециклиране на отпадна топлина и ко-генерация

В рудодобивните и преработвателни инсталации, отпадната топлина от смилаци и флотационни процеси може да се използва повторно чрез **топлообменни системи**, допринасяйки за термична ефективност и намаляване на първичното енергийно потребление.

##### 5. Енергийни одити и стандарти за ефективност

Провеждането на регулярни енергийни одити дава възможност за системно идентифициране на слаби звена и прилагане на технологични подобрения.

Тези технологични решения формират основата на **устойчив модел на добив**, в който икономическата ефективност се съчетава отговорно към природната и социална среда. Така устойчивостта в минните предприятия се превръща от морално задължение в стратегическо предимство, като въвежда редица иновации и повишава конкурентоспособността.



Фиг.1. Основни предизвикателства в периода 2025 – 2035г.



На фиг.1 са представени предизвикателствата с които ще се сблъска открития добив в следващото десетилетие.

- **Устойчив модел на добив: Стратегия за балансирано развитие на минната индустрия**

Устойчивият модел на добив представлява цялостна концепция за развитие на миннодобивната индустрия, която съчетава икономическа ефективност, екологична отговорност и социална ангажираност.

**Ключови принципи на устойчивия добив:**

**1. Икономическа ефективност и ресурсна оптимизация**

Чрез използване на иновации и цифровизация се постига **максимално извличане на полезни компоненти**, минимизиране на загубите и оптимизация на разходите.

**2. Екологична отговорност и кръгов икономически подход**

Устойчивият добив включва прилагане на **чисти технологии**, минимизиране на емисиите, управление на отпадъци, **рекултивация на нарушените терени** и повторно използване на водни и енергийни ресурси. Преминва се от линеен модел към **кръгова икономика** с фокус върху повторна употреба и рекултивиране.

**3. Социална ангажираност и партньорство с местни общности**

Съвременните рудодобивни предприятия поддържат открит диалог с общностите, инвестират в местна инфраструктура, здравеопазване и образование, както и въвеждат политики за защита на труда и равнопоставеност.

**4. Управление на риска и дългосрочно планиране**

Устойчивият модел изисква **интеграция на екологични, технически и социални индикатори** в управлението на риска и вземането на стратегически решения. Включва сценарии за декарбонизацията, климатична адаптация и преоценка на активи спрямо екологичните регулации.

**5. Прозрачност и сертификация по международни стандарти**

Добивните компании следва да отчетат своята дейност чрез устойчиви индикатори (ESG показатели).

**6. Заключение**

Откритият добив е изправен пред необратимата и дълбока трансформация, диктувана от съвременните изисквания за екологична устойчивост, технологична ефективност и социална отговорност. Иновациите са основополагащи за този преход – чрез автоматизация, дигитален мониторинг и внедряване на екологични технологии, индустрията постепенно изгражда нов облик на работа, ориентиран към своята устойчивост.

Този нов модел не само подобрява ефективност, като намалява и екологичния отпечатък, но и осигурява прозрачна и отговорна рамка за взаимодействие със заинтересованите страни. Въвеждането на ESG стандарти, както и академите към тях, интелигентни системи за управление на ресурси и устойчиви практики за рекултивация превръща открития добив в сфера с потенциал да бъде част от една добра основа за глобалното решение на устойчиво развитие – а не източник на проблеми.

Успешният преход към иновативен и устойчив добив зависи от стратегическо мислене на компаниите работещи в сферата, инвестиции в технологии, както и подготвени кадри, и най-вече – от ангажираността на индустрията към бъдещето на света.

Литература:

1. Ивайло Копрев, Евгения Александрова, „Открит добив на полезни изкопаеми“ 2022, ИК МГУ «Св. Иван Рилски», 498 с., ISBN - 978-954-353-459-3;
2. Даниел Георгиев, Симеон Асеновски, Димитър Кайков, Люпчо Димитров, Ивайло Копрев ;EVALUATION OF THE POSSIBILITIES FOR SUSTAINABLE EXPLOITATION OF A DEPOSIT FOR



- KAOLIN AND SILICA SANDS; ГОДИШНИК на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски" Annual of the University of mining and geology "St. Ivan Rilski" - София, 1999, ISSN 1312-1820, 2019 г., с. 25 - 28
3. И.Джобов, П.Златанов, И.Копрев; Приложение на оптимизационните методи за минното производство; Сборник на XII Научна конференция с международно участие по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, Варна, 2013, стр. 197-199 ISSN:1314-8877
  4. Ивайло Копрев; Математическо моделиране в откритото разработване на полезни изкопаеми; Изд. Авангард Прима, ISBN 978-619-160-954-3, 2018, стр.3-71.