

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ
ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ**



СБОРНИК ДОКЛАДИ

Втора национална научно-техническа конференция

ЕКОЛОГИЧНИ АСПЕКТИ В МИНЕРАЛНО-СУРОВИННИЯ ОТРАСЪЛ НА БЪЛГАРИЯ

**16-17 юни 2026 г.
гр. Копревщица**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ
ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ



ДРМ METALS



СЪОРГАНИЗАТОРИ

Федерация на научно-техническите съюзи в България
Българска минно-геоложка камара
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“
Българско геологическо дружество
Геологически институт – Българска академия на науките
Секция „Науки за Земята“ – Съюз на учените в България

СБОРНИК ДОКЛАДИ

Втора национална научно-техническа конференция

„ЕКОЛОГИЧНИ АСПЕКТИ В МИНЕРАЛНО-СУРОВИННИЯ ОТРАСЪЛ НА БЪЛГАРИЯ“

КОНСУЛТАТИВЕН СЪВЕТ

проф. д-р Анатолий Ангелов, д-р инж. Ботьо Табаков,
инж. Георги Петров, инж. Иван Иванов,
доц. д-р инж. Кремена Деделянова,
инж. Мариела Джиджинкова, проф. д-р Михаил Тарасов,
доц. д-р Силвия Лаврова

ISSN: 3134-2078

Научно-технически съюз по минно дело,
геология и металургия



АСАРЕЛ МЕДЕТ - АД

МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС - ГР. ПАНАГЮРИЩЕ



МИННО-ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС
„Асарел-Медет“ АД
4500 Панагюрище, България
e-mail: pbox@asarel.com
www.asarel.com







YEARS
35 **GEOTECHMIN**

SMALL STEPS. BIG TRACES.

ГЕОСТРОЙ

ГРУПА ГЕОТЕХМИН

ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ИНФРАСТРУКТУРНИ ОБЕКТИ

ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ПРОМИШЛЕНИ ОБЕКТИ

ПРОЕКТИРАНЕ И СТРОИТЕЛСТВО НА ГРАЖДАНСКИ ОБЕКТИ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИ УСЛУГИ

WWW.GEOSTROY.COM





THE
PARTNER
YOU
CAN **RELY ON**

geotrading.bg



УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ - СТАНДАРТ ЗА КАЧЕСТВЕН ЖИВОТ

ГОДИНИ
50
ЕЛАЦИТЕ МЕД
25 ГОДИНИ В ГРУПА ГЕОТЕХМИН



УПРАВЛЕНИЕ

с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 21,
e-mail: office@ellatzite-med.com

РУДОДОБИВЕН КОМПЛЕКС

гр. Етрополе 2180, Тел: (02) 923 76 72,
e-mail: mine.complex@ellatzite-med.com

ОБОГАТИТЕЛЕН КОМПЛЕКС

с. Мурково 2086, Тел: (02) 923 77 29,
e-mail: flotation.complex@ellatzite-med.com





KAOLIN

A COMPANY OF QUARZWERKE GROUP

ПРИРОДА И ИНДУСТРИЯ В БАЛАНС

ОТГОВОРЕН ДОБИВ. УСТОЙЧИВО БЪДЕЩЕ.

Каолин ЕАД добива и преработва неметални полезни изкопаеми — пясъци, каолин, фелдшпaг и глинн, като ги превръща във висококачествени индустриални продукти. С над 100 години опит и глобално присъствие, ние предоставяме надеждни решения за индустрии като керамика, стъкло, леярство и строителство.

Качество. Надеждност. Устойчивост.

100+

Години традиция

Добив, преработка и доставка на висококачествени минерални суровини за широк спектър от индустрии като керамика, стъкло, леярство, хартия и др.

40+

Пазара по света

10+ производствени бази и 150+ продукта, доставяни до клиенти на четири континента — с инвестиции в нискоемисионни технологии и водооборотни системи.

100%

Грижа за природата



Всяка отработена площ се връща към природата — техническа и биологична рекултивация, опазване на местообитания и биоразнообразие.

КОМПАНИЯТА




„Каолин“ ЕАД

Част от Quarzwerke Group — независима немска семейна компания с повече от 140 години опит в добива, преработката и рафинирането на индустриални минерали.

АДРЕСИ

-  ул. „Дъбрава“ 8
7038 гр. Сеново,
обл. Русе, България
-  ул. „Оборище“ 43
1504 гр. София, България

КОНТАКТИ

-  +359 84 612 500
-  office@kaolin.bg
-  www.kaolin.bg
-  ISO 9001 · ISO 14001
ISO 45001 · ISO 50001



• МИНИ МАРИЦА-ИЗТОК • ЕАД

ЕНЕРГИЙНА НЕЗАВИСИМОСТ И НАЦИОНАЛНА СИГУРНОСТ



„Мини Марица-изток“ ЕАД, гр. Раднево е най-голямото открито въгледобивно предприятие в Република България. Неговата дейност е с определяща значимост, както за националния енергиен баланс, така и за икономическия просперитет на региона и страната. Основната мисия и цел на дружеството е: енергийна независимост и национална сигурност чрез ритмичната доставка на въглища за термичните централи в региона. Дружеството има три открити рудника в експлоатация: рудник „Трояново-1“, рудник „Трояново-север“ и рудник „Трояново-3“. Те доставят лигнитни въглища на термичните електроцентрали в комплекса „Марица-изток“: „ТЕЦ Марица изток 2“ ЕАД, „ТЕЦ Контур Глобал Марица Изток 3“ АД, ТЕЦ „Ей И Ес-Гълъбово“ и „Брикел“ ЕАД.

Седемдесет години историята на „Мини Марица-изток“ е историята на съвременния открит въгледобив в България. Най-голямото българско въгледобивно дружество работи за енергийна независимост и сигурността за развитието на националната икономика. „Мини Марица-изток“ ЕАД (ММИ) е 100% държавно предприятие, което експлоатира най-големите лигнитни мини в България, разположени в югоизточната част на района на Горнотракийската низина с обща площ на лигнитното находище около 240 кв.км.

Добиваната електроенергия от лигнитните въглища е с относително най-ниска себестойност и висока конкурентоспособност, което предопределя изключително важното значение на добива от Източномаришкото находище за енергийния баланс и енергийната независимост на страната.

Цяло седемдесетилетие лигнитните въглища, добивани в „Мини Марица-изток“ са единственият конкурентен местен енергиен ресурс в електроенергийния баланс на Република България сред останалите енергийни източници.

От началото на експлоатацията на „Мини Марица-изток“ ЕАД до юли 2022 г. вкл. в дружеството са добити 1 278 527 986 тона въглища и са разкрити, транспортирани и насипани 4 940 182 548 кубични метра земна маса.

„Мини Марица-изток“ ЕАД е живата история на откритият въгледобив в България. развитието на дружеството е цел и мисия на няколко поколения българи. От основаването си досега, комплексът е част от енергийната независимост на страната ни. Той е най-големият на Балканския полуостров и стратегически обект от националната сигурност.

Водеща компания в добива на оловно-цинкови руди



Минстрой Холдинг АД
бул. „Д-р Г. М. Димитров“ №57
1700 София
tel.: +359 2 963 55 55
fax: +359 2 962 50 85
www.minstroy.com



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ СЪЮЗ ПО МИННО ДЕЛО, ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛУРГИЯ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL UNION OF MINING, GEOLOGY AND METALLURGY

Member of:



The Federation of the Scientific Engineering Unions
in Bulgaria - FNTS



The World Mining Congress - WMC



The International Academy of Ecology &
Life Protection Sciences



The Balkan Association
of Mining Experts "BALKANMINE"



The International Society for Rock Mechanics
and Rock Engineering - ISRM

Наука и бизнес заедно



Bulgaria, 1000 Sofia, 108, Rakovski Str.
Tel.: +359 2 986 13 79
e-mail: mdgm@fnts.bg www.mdgm.org



140
ГОДИНИ

ФЕДЕРАЦИЯ
НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИТЕ
СЪЮЗИ В БЪЛГАРИЯ



СЪДЪРЖАНИЕ

НАЙ-ДОБРИ ЕКОЛОГИЧНИ ПРАКТИКИ В ХВОСТОХРАНИЛИЩА: АКЦЕНТ ВЪРХУ ПРАХОПОТИСКАНЕ И КОНТРОЛ НА ВЕТРОВАТА ЕРОЗИЯ	1
Вера Николова, Кремена Деделянова	
AirCarbon – ИНОВАТИВНО РЕШЕНИЕ ЗА ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУ КРЪГОВА ИКОНОМИКА И ESG РАМКИ В МИНЕРАЛНО- СУРОВИННИЯ СЕКТОР	9
Тончо Живков, Полина Величкова	
ИЗВЛИЧАНЕ НА ЖЕЛЯЗО ОТ ШЛАКА ОТ СТОМАНОДОБИВНАТА ПРОМИШЛЕНОСТ С ЦЕЛ НАМАЛЯВАНЕ НА ОТПАДЪКА	16
Ванеса Кирилова, Кремена Деделянова	
ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ПЪРВИЯ ЕТАП НА НАЦИОНАЛНА НАУЧНА ПРОГРАМА "КРИТИЧНИ СУРОВИНИ"	20
Светослав В. Георгиев, Росица Василева, Стоян Георгиев, Никола Ботушаров, Ирена Григорова, Росица Титоренкова, Виолина Ангелова, Емилия Ченгелова, Румяна Вацева, Ирена Пейчева, Димитър Антонов, Янко Герждиков, Росица Иванова	
КРИТИЧНИ СУРОВИНИ И ЕНЕРГИЯ ЗА „ЗЕЛЕН“ ПРЕХОД – КОНВЕНЦИОНАЛНИ РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛТАТИ В НАЦИОНАЛНАТА НАУЧНА ПРОГРАМА РП I.3.1.	30
Н. Ботушаров	
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ДАННИ И ФУНКЦИОНАЛНОСТИ НА УЕБ- БАЗИРАНА ИНФОРМАЦИОННА СИСТЕМА ЗА КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ	36
Румяна Вацева, Дейвис Динков, Аглаида Тотева, Антоанета Пенева, Милослав Кацаров	
ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A BIOELECTROCHEMICAL SYSTEM FOR THE TREATMENT OF ORGANIC- AND SULFATE- LADEN WASTEWATER	43
Anatoliy Angelov, Mariya Georgieva, Petia Genova	
LED БИОСЕНЗОР ЗА МОНИТОРИНГ В РЕАЛНО ВРЕМЕ НА ВОДИ ЗАМЪРСЕНИ С ТЕЖКИ МЕТАЛИ	50
Росен Иванов	

ОРГАНИЗИРАНЕ И ИЗПЪЛНЕНИЕ НА МОНИТОРИНГА НА БИОЛОГИЧНОТО РАЗНООБРАЗИЕ В РАЙОНА НА “АСАРЕЛ-МЕДЕТ” АД – ГР. ПАНАГЮРИЩЕ	55
Павел Господов, Валери Шишков, Невен Настев	
РЕЗУЛТАТИ ЗА КАЧЕСТВО НА СЕДИМЕНТИ ОТ БАСЕЙНИТЕ НА Р. ЮГОВСКА И Р. ЧЕПЕЛАРСКА С ПРИЛОЖЕНИЕ НА ХАРМОНИЗИРАН ПРОТОКОЛ SIMONA СЪГЛАСНО ЕВРОПЕЙСКАТА РАМКОВА ДИРЕКТИВА ЗА ВОДИТЕ (WFD EU2000)	77
Златка Милаковска, Милена Вецева, Петьо Филипov, Ирена Пейчева, Атанас Хиков, Лора Биджова, Валентин Ганев, Даниел Ишлямски	
ПРИЛОЖЕНИЯ НА КОНДИЦИОНИРАНИ ЗЕМНИ МАСИ ОТ ТУНЕЛНО-ПРОБИВНИ МАШИНИ: ИНЖЕНЕРНА, ЕКОЛОГИЧНА И ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА	87
Борислав Борисов, Павел Павлов	
МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФСКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА АМФИБОЛИТИТЕ ОТ НАХОДИЩЕ „МАРТИН“, ЗАПАДНИ РОДОПИ, БЪЛГАРИЯ	98
Милослав Кацаров, Росица Василева, Силвина Георгиева, Борислав Сотиров	
ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ЕКОЛОГИЧНО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЛИГНИТНИ ВЪГЛИЩА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ХУМИНОВИ ПОДОБРИТЕЛИ НА ПОЧВАТА	107
Ирена Михайлова, Георги Стоянчев	
ВЛИЯНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ИЗТОЧНОМАРИШКИТЕ ЛИГНИТИ ВЪРХУ ПОТЕНЦИАЛА ИМ ЗА ГАЗИФИКАЦИЯ И ВТЕЧНЯВАНЕ	111
Деница Апостолова, Ирена Костова, Данаил Йовчев	
ОБЗОР НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА РЕГЛАМЕНТ (ЕС) 2024/1252 В КОНТЕКСТА НА ОСИГУРЯВАНЕТО НА УСТОЙЧИВ ДОСТЪП ДО СУРОВИНИ ОТ КРИТИЧНО ЗНАЧЕНИЕ В ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ	117
Велислава Паничкова	



НАЙ-ДОБРИ ЕКОЛОГИЧНИ ПРАКТИКИ В ХВОСТОХРАНИЛИЩА: АКЦЕНТ ВЪРХУ ПРАХОПОТИСКАНЕ И КОНТРОЛ НА ВЕТРОВАТА ЕРОЗИЯ

инж. Вера Николова, доц. д-р Кремена Деделянова
Катедра „Инженерна екология“, Химикотехнологичен и металургичен университет – София
vera_ugrinova@abv.bg, k.dedelyanova@uctm.edu

РЕЗЮМЕ

Хвостохранилищата са съставна част от технологичния процес в минно-преработвателната индустрия и също така са значим генератор на прахово замърсяване поради ветрова ерозия на финозърнестата им повърхност. При все по-засилени изисквания за устойчиво развитие и ESG политики, управлението на хвостохранилищата изисква внедряване на съвременни екологични практики и иновативни технологии. Настоящият доклад представя преглед на методи за прахопотискане, като са разгледани химични реагенти като полиакриламид, лигниносулфонат, биополимери. Също така и механични и хидравлични методи, като водно омокряне, ветрозащитни прегради и биологични методи, фитостабилизация.

Ключови думи: хвостохранилище, прахопотискане, ветрова ерозия, биополимер, фитостабилизация, НАТ

BEST ECOLOGICAL PRACTICES IN TAILINGS STORAGE FACILITIES: FOCUS ON DUST SUPPRESSION AND WIND EROSION CONTROL

ABSTRACT

Tailings storage facilities are an integral part of the technological process in the mining and industry and are also a significant generator of dust pollution due to wind erosion of their fine-grained surface. With increasing demands for sustainable development and ESG policies, tailings management requires the implementation of modern environmental practices and innovative technologies. This report presents a review of dust suppression methods, considering chemical reagents such as polyacrylamide, lignin sulfonate, biopolymers. Also mechanical and hydraulic methods such as water wetting, windbreaks and biological methods, phytostabilization.

Keywords: tailings storage facility, dust suppression, wind erosion, biopolymer, phytostabilisation, BAT

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Минната индустрия е сред стратегическите отрасли за развитието на съвременната икономика, но също така е изправена пред значителни екологични предизвикателства [13]. Един от основните проблеми при добива и обогатяването на полезни изкопаеми е управлението на отпадъчните материали, депонирани в хвостохранилища [14]. Финозърнестият материал е изключително податлив на ветрова ерозия и е генератор на ФПЧ (ФПЧ₁₀/ ФПЧ_{2.5}), които са доста токсични поради съдържанието на тежки метали като Pb, As, Cd, Hg, Cu, Zn. [8]

Съвременните европейските регулации и водените екологични политики отварят нуждата от използването на екологосъобразни реагенти с ниска токсичност и минимален въглероден отпечатък [9,18].

Изследвания на хвостохранилище от нефелинов сиенит в Канада с полеви и ветрово-тунелни тестове показват, че ФПЧ₁₀ емисиите са обратно пропорционални на якостта на повърхностната кора. [5] Физическото нарушение на повърхността напр. от вятърна абразия или превозни средства увеличава емисиите с до два порядъка – дори при предварително приложени прахопотискащи агенти. [5]



При изследването на McKenna Neuman et al. (2009) чрез ветрова тунелна симулация се установява, че степента на нарушение на повърхностната коричка, свиването и напукването при изсъхване, и повторното омокряне са определящи за контрола на емитираните ФПЧ₁₀ от хвост. [6]

Целта на настоящия доклад е да систематизира верифицираните методи за прахопотискане, като всяко конкретно твърдение е подкрепено с посочен автор, година и пореден номер на изследването в литературния списък.

2. ОСНОВНИ ЕКОЛОГИЧНИ ПРОБЛЕМА ПРИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

2.1. Физика на ерозионния процес

Ветровата ерозия на насипни материали протича чрез три механизма: повърхностно пълзене (creep) при $d > 500 \mu\text{m}$, отскачане (saltation) при $d = 70\text{--}500 \mu\text{m}$ и суспензионен транспорт при $d < 70 \mu\text{m}$. [1] Суспендираните частици ФПЧ₁₀ ($d < 10 \mu\text{m}$) представляват най-голям риск за здравето, като могат да навлязат в алвеолите на белите дробове. [8]

Ветрово-тунелна симулация на хвост показва, че емисиите от ФПЧ₁₀ нарастват рязко при намаляване на влажността под критично ниво и са силно зависими от якостта на повърхностния слой. Праговата скорост на триене (u^*t) при суха хвостова повърхност е ниска поради финия гранулометричен диапазон. [5,6]

2.2. Специфика на хвостовия субстрат

За разлика от почвите, хвостът има специфичен минерален и химичен състав (присъствие на сулфидни минерали, тежки метали, нисъко рН при AMD-генериращ хвост), което изисква по-висока концентрация на стабилизиращ агент за ефективно образуване на кора. [3,4]

Така, например тестове с акрилов кополимер на хвост от медна мина показват, че при третиране се образува коричка и се повишава водозадържащата капацитет и прахоустойчивостта чрез агломерирани на частиците на повърхността им (потвърдено чрез SEM анализ). [4]

3. ХИМИЧНИ ПРАХОПОТИСКАЩИ АГЕНТИ

Химичните агенти действат чрез свързване на повърхностните частици в стабилна матрица, намаляваща аеродинамичното им откъсване. Разгледаните по-долу класове са верифицирани чрез публикувани лабораторни и/или полеви изпитвания, специфично за хвостови материали.

3.1. Полиакриламид (РАМ) и акрилови кополимери

Полиакриламидът (РАМ) е сред най-добре документираните агенти при хвостохранилища. Сравнителни тестове върху хвост от медна мина при ветрова скорост 10 m/s показват, че РАМ осигурява по-добра устойчивост от калциевият хлорид понеже полимерният филм свързва частиците по-трайно от кристалната структура на хлоридните соли; пенетрационната якост на оптимизираните проби достига 373.9 kPa. [7]

При тестване на акриловите кополимери, приложени на хвост от медна мина, се наблюдава намаляване на емисиите от ФПЧ₁₀ и ФПЧ_{2.5} до ~95% при лабораторни условия и ~80% в полеви тестове, като в същото време се подобрява якостта, водозадържането и микроструктурата на финните частици. [4]

Тест на четири търговски прахопотискащи продукта показва, че при три от тях се постигат добри резултати при поток от чист въздух, но емисиите на ФПЧ₁₀ нараства с до два порядъка при абразия от пясъчна бомбардировка вследствие на многократни удари на частици. Авторите препоръчват периодична повторна апликация и отчитане на конкретните полеви условия преди избора на продукт. [5]



3.2. Лигниносулфонат (LS)

Калциевият лигниносулфонат е биологичен отпадъчен продукт от целулозно-хартиената промишленост. Сравнителни опити с PAM, поливинилов алкохол (PVA), LS и халиди потвърждават, че загубата на хвостов материал при вятър намалява с нарастване на концентрацията и разхода на агента; PAM е по-ефективен сред полимерните агенти. [7]

Обзорът на Kung et al. (2024) посочва, че ефективността на лигниносулфонатите намалява рязко при обилни валежи. За подобряване на трайността натриевият LS се омрежва с акриламид и метиленбисакриламид, с което се постигат по-високи ефективности, но материалът придобива корозивни свойства и токсичност за водни организми. [8]

3.3. Биополимери: ксантан и гуарова гума

Биополимерните реагенти са може би една от най-перспективните технологии за устойчиво прахопотискане [17]. Те са базирани на природни или модифицирани органични съединения, които образуват стабилизиращ повърхностен слой върху на хвоста [15].

Сред използваните материали са:

- лигнин и лигносулфонати;
- нишестени производни;
- ксантанова гума;
- целулозни полимери [17].

Ветрово-тунелни изпитвания и тестове за влагозадържане с хвост показват, че ксантановата гума и гуаровата гума са ефективни за повишаване на влагозадържания капацитет, прахоустойчивостта и повърхностната якост. И двата биополимера образуват покривни слоеве около частиците на хвоста и ги свързват помежду им, надминавайки ефекта на омокрянето само с вода. [3]

По-ранно изследване на Chen et al. (2013) с хвост от медна мина установява, че гуаровата гума е по-ефективна от ксантановата за увеличаване на течна граница и якост при срязване при еднакви концентрации, поради по-високия си вискозитет и по-силно свързване с отделните частици. [2]

Обзорът на Kung et al. (2024) обобщава, че биополимерите (ксантан, гуар, нишесте, хитозан) са биоразградими и екологично безопасни и имат по-висок хигроскопен и агломерационен потенциал от чистата вода, но трайността им е ограничена от микробна деградация. [8]

3.4. Сравнителна таблица на химичните агенти

Таблица 1 обобщава сравнителните характеристики на разгледаните агенти.

Агент	Верифициран ефект (от изследванията)	Ключово наблюдение	Ограничение (ако е посочено)	Изт.
PAM (полиакриламид)	По-добра ефективност от калциев хлорид при хвост; пенетрационна якост 373.9 kPa при 10 m/s [7]	Полимерният филм по-траен от калциев хлорид кристали; ефектът нараства с концентрацията [7]	Само 2 доза/ден без PAM хибрид; ефектът спада при физическо нарушение [5,7]	[7]
Акрилов кополимер	~95% редуция ФПЧ ₁₀ (лабор.); ~80% (поле) [4]	Подобрява якост, водозадържане, микроструктура (SEM) [4]	Образуване на бял прах при изсъхване – изисква наблюдение [4]	[4]



Агент	Верифициран ефект (от изследванията)	Ключово наблюдение	Ограничение (ако е посочено)	Изт.
4 търговски продукта (сравнение)	Добри при чист въздух; 2 порядъка по-слаби след физическо нарушение [5]	ФПЧ ₁₀ емисии обратно пропорционални на якостта на кората [5]	Полевите условия (реставрация, ветрова абразия) трябва да се отчитат [5]	[5]
Лигниносулфонат (LS)	Ефективен сред полимерните агенти; материалните загуби намаляват с конц. [7]	РАМ по-ефективен от LS за полимерен клас при сравнителни опити [7]	Рязък спад при дъжд; омержен Na-LS подобрява трайност, но корозивен [8]	[7,8]
Ксантанова гума	Подобрява влагозадържане и прахоустойчивост над ефекта на чиста вода [3]	Образува покривни слоеве около хвостовите частици; тунелни опити [3]	Биоразградима; трайност ограничена от микробна деградация [8]	[3,8]
Гуарова гума	По-ефективна от ксантан за якост и течна граница при хвосты [2,3]	По-висок вискозитет → по-силно свързване с хвостовите частици [2]	Биоразградима; трайност ограничена от микробна деградация [8]	[2,3,8]

Забележка: Всички данни в таблицата са взети директно от цитираните верифицирани публикации. Точните стойности варират в зависимост от вида на хвоста, климатичните условия и начина на апликация.

4. МЕХАНИЧНИ И ХИДРАВЛИЧНИ МЕТОДИ ЗА ПРАХОПОТИСКАНЕ

4.1. Водно омокряне

Поддържането на повърхностният слой мокър е основен механизъм за предотвратяване на ерозионното откъсване на фини прахови частици. Ветрово-тунелната симулация показва, че ФПЧ₁₀ емисиите са обратно пропорционални на повърхностната якост, а якостта е тясно свързана с влажността. [5,6]

Хибридно напояване (вода + нисък % РАМ) е по-ефективно от чистото поливане: полимерът закрепва частиците след изсъхване и намалява честотата на повторна апликация, потвърдено при лабораторни изпитвания с хвост. [4,7]

4.2. Ветрозащитни прегради

Ветрозащитните прегради (windbreaks) намаляват скоростта на вятъра в подветрената зона, а ефектът зависи от порьозността, формата и височината на преградата – принципна основа, изведена от Bagnold (1941). [1] определя ветрозащитните прегради като НАТ за контрол на прах при хвостохранилища: временни геотекстилни мрежи за активни съоръжения и живи ветрозащитни пояси за дългосрочна рекултивация. [9]

4.3. Временни покривала (Erosion Control Blankets)

При периоди без активно депониране BREF Mining (2018) препоръчва покриване на незащитената повърхност с биоразградими покривала (Erosion Control Blankets, ECB), геотекстилни мрежи или почвен слой. [9]



5. БИОЛОГИЧНИ МЕТОДИ ЗА ДЪЛГОСРОЧНА СТАБИЛИЗАЦИЯ

5.1. Фитостабилизация

BREF Mining (2018) определя фитостабилизацията като основна дългосрочна НАТ при хвостохранилища: растителната покривка обездвижва тежките метали в ризосферата и формира трайна механична защита срещу ветрова ерозия. [9]

Полеви изпитвания на Tang et al. (2024) с тревни видове (*Astragalus adsurgens*, *Lolium perenne*, *Cynodon dactylon*) показват, че ПАМ благоприятства развитието на растенията в хвоста, докато калциевият хлорид намалява адаптивността им и затруднява нормалното покълване. Растенията, отгледани в хвост с ПАМ, развиват по-добър корен; кореновият почвен комплекс увеличава якостта при срязване на субстрата. [7]

5.2. Подобряване на субстрата

Прякото засяване върху суров хвост рядко е успешно поради токсично ниско рН, дефицит на органична материя и азот, също така и значителните концентрации на тежки метали. Корективните мерки (варуване, компост, нанасяне на почвен слой) са признати НАТ по BREF Mining (2018). [9]

6. МОНИТОРИНГ НА ПРАХОВИ ЕМИСИИ

6.1. Нормативни изисквания

Директива 2008/50/ЕО установява ПДК за ФПЧ₁₀: 50 µg/m³ (24-часова средна, допустими 35 надвишения/год.) и 40 µg/m³ (годишна средна). СЗО Насоки (2021) препоръчват по-строги стойности: 45 µg/m³ (24 ч) и 15 µg/m³ (год.) за ФПЧ₁₀. [11,12] Директива 2008/50/ЕО; СЗО, 2021 BREF Mining (2018) изисква непрекъснат автоматизиран мониторинг в минимум 4 точки около хвостохранилищата с площ над 50 ha. [9]

6.2. Инструментални методи

Стандартният метод за полеви измервания на фугитивни емисии от хвостохранилища е PI-SWERL (Portable In-Situ Wind Erosion Laboratory), използван от McKenna Neuman & Boulton (2020) при директно сравнение на прахотискащи продукти. Резултатите показват, че полевите условия (адвекция, ресуспензия) трябва да се отчитат при избора на продукт. [5]

посочва, че лазерните дифракционни сензори за ФПЧ₁₀/ФПЧ_{2.5} са използвани при полеви тестове на хвостохранилища полимерни агенти, при което полимерите намаляват емисиите до 95%. [8]

6.3. Изисквания за план за мониторинг

Съвременните екологични практики включват внедряване на системи за мониторинг в реално време [9].

Използват се:

- станции за мониторинг на ФПЧ₁₀ и ФПЧ_{2.5};
- метеорологични станции;
- дронове;
- GIS системи;
- CFD моделиране за прогнозиране на разпространението на прах [16].

BREF Mining (2018) изисква план за мониторинг с конкретни прагови стойности за задействане на прахотискащи мерки, честота на проверките и документация. Директива 2006/21/ЕО задължава операторите да докладват надвишенията на компетентния орган. [9,10]

7. РЕГУЛАТОРНА И НОРМАТИВНА РАМКА

Ключовите регулаторни документи, пряко свързани с прахотискането при хвостохранилища:

- Директива 2006/21/ЕО – задължава план за управление на отпадъците, вкл. мерки за контрол на прахообразуването, финансова гаранция и дългосрочен мониторинг след закриване. [10]



- BREF Mining (2018) – дефинира НАТ: автоматизирано напояване, ветрозащитни прегради, химично стабилизиране, фиторемедиация и непрекъснат мониторинг. [9]
- Директива 2008/50/ЕО – ПДК за $\text{ФПЧ}_{1.0}$ ($50/40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) и $\text{ФПЧ}_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) в атмосферния въздух. [11]
- СЗО Насоки за качество на въздуха (2021) – по-строги прагови стойности: $\text{ФПЧ}_{1.0} \leq 45/15 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $\text{ФПЧ}_{2.5} \leq 25/5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [12]

8. ИНТЕГРИРАНА СТРАТЕГИЯ ЗА ПРАХОПОТИСКАНЕ

McKenna Neuman & Boulton (2020) заключават, че нито един от изпитаните търговски продукти не осигурява трайна защита при физическо нарушение на повърхностната кора. [5] Следователно интегрираният подход (химично стабилизиране + биологична рекултивация + адаптивен мониторинг) е задължителен, а не опционален. [9]

Tang et al. (2024) демонстрират, че комбинирането на РАМ с тревни видове превъзхожда самостоятелното прилагане на агента: растенията подобряват дългосрочната якост на субстрата чрез кореновата система. [7]

Таблица 2 представя препоръчителна стратегия по фази, изведена изцяло от цитираните верифицирани изследвания и нормативни документи.

Таблица 2. Препоръчителна интегрирана стратегия за прахопотискане по фази (всяка мярка с посочен верифициран извор)

Фаза на управление	Краткосрочни мерки (0–2 год.) + Извор	Средносрочни (2–10 год.) + Извор	Дългосрочни (> 10 год.) + Извор
Активно ХХ (при депониране)	Водно напояване + РАМ [4,7]; временни ветрозащитни мрежи [9] []	РАМ + тревни видове [7]; мониторинг $\text{ФПЧ}_{1.0}$ [11]; мрежован LS при сухи условия [8] []	Живи ветрозащитни пояси [1,9]; адаптивен мониторинг [9,11] []
Неактивно ХХ (след запиране)	Акрилов кополимер [4] или РАМ [7]; ЕСВ покривала [9] []	Фитостабилизация с местни видове [9]; варуване [9] []	Стабилна тревна покривка [3,7]; периодичен мониторинг [9,11] []
Историческо ХХ (ремедиация)	ЕСВ покривала [9]; спешна варовикова корекция [9] []	Местни тревни видове + почвени подобрители [9]; мониторинг [11] []	Дългосрочен мониторинг ≥ 30 год. [10]; биополимери при $\text{pH} > 6$ [3,8] []

9. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Хвостохранилищата представляват значим екологичен риск, който налага прилагане на съвременни и устойчиви технологии за управление, като най-добрите екологични практики включват интегриран подход за контрол на праховите емисии, повърхностна стабилизация, рекултивация и мониторинг [13,14,9]. Въз основа на анализа на верифицираните изследвания се формулират следните изводи:

1. РАМ осигурява по-добра прахоустойчивост от калциевият хлорид при хвост; акриловите кополимери намаляват $\text{ФПЧ}_{1.0}/\text{ФПЧ}_{2.5}$ до ~95% (лабор.) и ~80% (поле). И двата агента изискват периодична повторна апликация при физическо нарушение на кората. [4,7]
2. Дори при предварително приложен прахопотискащ агент, физическото нарушение на кората увеличава $\text{ФПЧ}_{1.0}$ емисиите с два порядъка – физическата защита и мониторингът са неотменни. [5]



3. Биополимерите (гуар, ксантан) са ефективни за влагозадържане и прахоустойчивост; гума гуар е по-ефективна от ксантина по якостни показатели при хвост. [2,3]
4. Лигниносулфонатът е приложим при сухи условия, но ефективността рязко спада при дъжд; омрежената форма подобрява трайността, но внася корозивност. [7,8]
5. Комбинирането на ПАМ с тревни видове (*Lolium perenne*, *Cynodon dactylon*) превъзхожда моно-методите: растенията повишават дългосрочната якост на субстрата чрез коренов комплекс. [7]
6. Интегрираният подход (химично + биологично + мониторинг) е НАТ по BREF Mining (2018) и задължително условие за съответствие с Директива 2006/21/ЕО и Директива 2008/50/ЕО. [9,10,11] BREF Mining, 2018; Директива 2006/21/ЕО; Директива 2008/50/ЕО

Бъдещите изследвания следва да бъдат насочени към разработване на комбинирани методи и системи за прахопотискане както и интегриране на цифров мониторинг и оценка на екологичната ефективност чрез LCA [18].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London. [Препечатка: Dover Publications, 2012].
- [2] Chen, R., Zhang, L., Budhu, M. (2013). Biopolymer stabilization of mine tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(10), 1802–1807. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000902.
- [3] Chen, R., Lee, I., Zhang, L. (2015). Biopolymer stabilization of mine tailings for dust control. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2), 04014100. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001240.
- [4] Parameswaran, K., Ekholm, J., Zhang, L. (2014). Evaluation of mine tailings dust control. In: *GeoEnvironmental Engineering*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 241, pp. 80–89.
- [5] McKenna Neuman, C., Boulton, J.W. (2020). A wind tunnel and field evaluation of various dust suppressants. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(10), 1090–1102. DOI: 10.1080/10962247.2020.1779148.
- [6] McKenna Neuman, C., Boulton, J.W., Sanderson, R.S. (2009). Wind tunnel simulation of environmental controls on fugitive dust emissions from mine tailings. *Atmospheric Environment*, 43(3), 520–529. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.072.
- [7] Tang, S., Yang, Y., Luo, Z., Fu, T. (2024). Combined use of chemical dust suppressant and herbaceous plants for tailings dust control. *Environmental Geochemistry and Health*, 46, 329. DOI: 10.1007/s10653-024-02119-8.
- [8] Kung, H.-C., Lin, W.-C., Huang, B.-W., Mutuku, J.K., Chang-Chien, G.-P. (2024). Techniques for suppressing mineral dust aerosol from raw material stockpiles and open pit mines: A review. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(2), 1–18. DOI: 10.4209/aaqr.230166.
- [9] European Commission (2018). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries (BREF Mining)*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [10] Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from the extractive industries. *Official Journal of the European Union*, L 102, pp. 15–34.
- [11] Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*, L 152, pp. 1–44.
- [12] World Health Organization (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, NO₂, SO₂ and CO*. WHO, Geneva. ISBN 978-92-4-003422-8.
- [13] Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (3rd ed.). Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-12419-8.
- [14] UNEP (2020). *Mine Tailings Storage: Safety is No Accident*. United Nations Environment Programme, Nairobi.



- [15] Jones, D., Harrison, R. (2018). Dust control methods in tailings storage facilities. *Journal of Environmental Management*, 212, 123–135. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.01.075.
- [16] Blight, G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press / Taylor & Francis, London.
- [17] Wang, J., Li, X., Liu, Y., Chen, H., Zhao, Z. (2021). Biopolymer-based dust suppressants for mining applications. *Powder Technology*, 379, 336–348. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.060.
- [18] ISO 14040:2006. *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. International Organization for Standardization, Geneva.



AirCarbon – ИНОВАТИВНО РЕШЕНИЕ ЗА ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУ КРЪГОВА ИКОНОМИКА И ESG РАМКИ В МИНЕРАЛНО-СУРОВИННИЯ СЕКТОР

Тончо Живков, Полина Величкова
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700, България
E-mail: toncho.jivkov@mgu.bg; polina.velichkova@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия представя комплексен модел за трансформация на минерално-суровинната индустрия чрез синергията между принципите на кръговата икономика и екологичните, социални и управленски (ESG) критерии. Акцентът е върху иновативната технология AirCarbon - метод за улавяне на парникови газове (метан и CO₂) и тяхното биологично преобразуване в биоразградимия полимер полихидроксипутират (PHB). Графично са представени последиците от прилагането на технологията в международни и национални минни компании, както и представители на енергийния сектор с реални и теоретични данни от последните 5 години. Позовавайки се на най-новите световни изследвания в тази област (2021-2026 г.), се доказва, че „въглеродно-отрицателното“ производство е не само технологично възможно, но и стратегически наложително за устойчивото развитие на сектора.

Ключови думи: Кръгова икономика, ESG, Минерално-суровинен сектор, AirCarbon, PHB

Новата парадигма в минната индустрия

В началото на XXI век минерално-суровинният сектор се намира в състояние на фундаментална пренастройка. Глобалните климатични цели и стремежът към „Net Zero“ до 2050 г. изискват от минните предприятия да преосмислят своята роля в световната икономика. Както се посочва в доклада на PwC "Mine 2023", устойчивостта вече не е пожелателен елемент, а основен фактор за „социалния лиценз за работа“ (Social License to Operate). Този лиценз не е официален документ, а степента на доверие, която обществото и регулаторите гласуват на бизнеса.

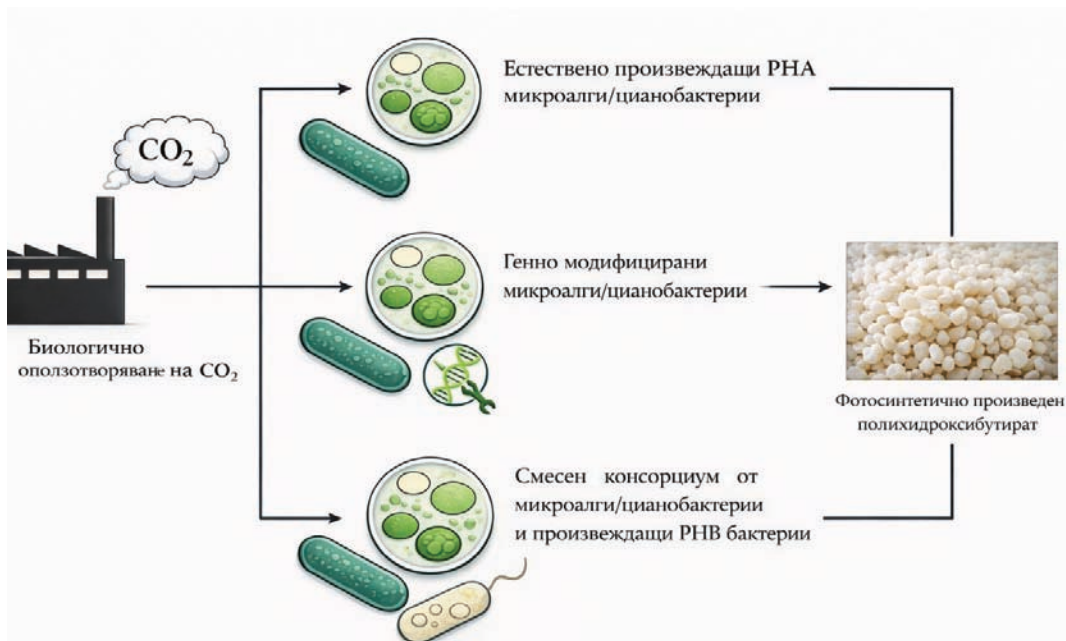
ESG критериите (Environmental, Social, and Governance) се утвърдиха като основен инструмент за оценка на корпоративното представяне пред инвеститори и финансови институции. В българския минен контекст това означава не само спазване на законовите норми, но и доброволно поемане на ангажименти за повишена прозрачност и конкретни действия за намаляване на емисиите. Инвеститорите вече не питат „колко печалба генерирате?“, а „как я генерирате и какъв е отпечатъкът ви върху планетата?“.

Докато ESG задава стратегическите цели, кръговата икономика предоставя технологичната рамка за тяхното реализиране. Преходът от линейния модел „добив-употреба-отпадък“ към циркулярен модел позволява ресурсите да остават в икономиката възможно най-дълго. В статията ще се анализира как технологията AirCarbon затваря този цикъл, превръщайки емисиите от „екологичен пасив“ (замърсяване, за което се плащат глоби и квоти) в „икономически актив“ (суровина за нов продукт).

Теоретичен контекст

Спецификата на минния добив е свързана с генерирането на значителни преки емисии често под формата на метан (CH₄), отделян при разработката на рудните тела. Според United Nations Environment Programme (UNEP, 2020), метанът е парников газ с изключително висок потенциал за затопляне (над 25 пъти по-силен от CO₂), което налага спешни мерки за неговото улавяне. Пасивните мерки (като простото филтриране) вече са недостатъчни. Необходим е активен подход за оползотворяване на въглерода (CCU - Carbon Capture and Utilization), който превръща проблема в решение.

Анализът на стратегиите на компании като Newmont Corporation (2024) и Teck Resources (2025) показва, че успехът в ESG управлението зависи от иновативния капацитет. Тези лидери вече инвестират в проекти за улавяне на газове и рециклиране на технологични води, което подобрява техните позиции в глобалните ESG индекси (като Dow Jones Sustainability Index). Те доказват, че устойчивостта и рентабилността не са взаимоизключващи се, а се подсилват взаимно чрез технологичен напредък. Настоящата статия разглежда внедряването на AirCarbon като следващото стъпало в тази еволюция – преход към напълно биологично производство в индустриална среда. Технологията е уникална, защото използва естествени микробиологични процеси за фиксиране на въглерод от атмосферата или от индустриални емисионни потоци (фиг. 1). Тя имитира процеси, които протичат в океаните от милиони години, но ги оптимизира за индустриални нужди.



Фиг. 1. Технологична схема на получаване на РНВ от въглероден диоксид (заимствана от Sirohi et al., 2021)

Технологично решение за намаляване въглеродния отпечатък

Конвенционалните пластмаси създават сериозно замърсяване, докато полихидроксиалканоатите (РНА) са биоразградими, биосъвместими и с подобни свойства на традиционните пластмаси. Въпреки това, те представляват много малък дял (1–1.4%) от пазара на биопластмаси. До 40 % от разходите при производството им идват от субстрата (въглеродния източник). Освен това разходите за извличане и пречистване, енергия и мащабиране също са високи. Затова се търсят евтини суровини (отпадъци, отпадъчни води) и по-ефективни технологии. Сред решенията са използване на отпадъчни материали и биомаса, смесени микробни култури и по-ефективни методи за екстракция, което би довело до интеграция в кръгова биоикономика (Gautam et al., 2024).

Автотрофни микроорганизми (напр. цианобактерии и микроводорасли (*Chlorella*)) фиксират CO₂ чрез фотосинтеза. При стресови условия (липса на азот/фосфор) те натрупват полихидроксибутират (РНВ) като енергиен резерв. РНВ е биоразградим, с подобни свойства на полипропилен, и има приложения в опаковки, медицина и земеделие. С помощта на генното инженерство могат да се увеличат добивите (до ~55% в някои случаи). Основният проблем е високата цена на производството, главно заради въглеродния субстрат. Затова се търсят евтини източници на CO₂ (дори от индустриални газове) като суровина. Въпреки това производството на РНВ от CO₂ чрез автотрофи е обещаваща устойчива технология, но за да е максимално изгодна, е нужно да се подобрят



микроорганизмите, да се оптимизират процесите и да има ефективно индустриално мащабиране (Sirohi et al., 2021).

Akkoynlu et al. (2024) използват симулационен модел (SuperPro Designer софтуер v12.0) за цялостна оценка на материални потоци, енергийни нужди и производствени разходи при производство на полихидроксibuтират в индустриален мащаб, използвайки различни въглеродни източници – фруктоза, мравчена киселина и CO₂. Целта е да се сравнят икономическата ефективност и устойчивостта на тези варианти. Те заключават, че фруктозата е икономически най-изгодният вариант (~3.64 \$/kg PHB), а CO₂ и мравчената киселина са по-устойчиви, но все още скъпи (над 10 \$/kg PHB), но с допълнителни изследвания могат да станат реална алтернатива за зелено производство на биопластмаси.

Pham et al. (2024) проучват производството на полихидроксibuтират чрез метанотрофни бактерии тип II (напр. *Methylocystis*, *Methylosinus*) и за първи път доказват едновременно преобразуване на CH₄ и CO₂ в PHB. Тъй като двата газа са основни парникови газове, биоконверсията им в биопластмаса предлага решение за намаляване на емисиите и производство на устойчиви материали. Метанотрофите пък са особено подходящи, защото естествено използват метан като източник на въглерод и енергия. Резултатите показват, че добавянето на CO₂ увеличава продуцирането на PHB със 140–162 % (при различните щамове).

Пример за успешно прилагане на технологията е AirCarbon, разположена в Хънтингтън Бийч, Калифорния, където използват метанотрофни бактерии за преобразуване на метана и въглеродния диоксид в PHB (<https://aircarbon.com/>). Пластмасовите филamenti се използват в опаковъчната индустрия (за производство на биоразградими опаковки, хранително-вкусовата индустрия (за опаковки и прибори за еднократна употреба, безопасни за контакт с храна), текстилната индустрия (при създаване на устойчиви влакна и материали), потребителски стоки (в продукти като калъфи, бутилки, аксесоари и други изделия от пластмаса), автомобилната индустрия (за вътрешни компоненти и части, където се търсят по-леки и екологични материали), строителството (използва се в някои композитни материали и елементи с по-нисък въглероден отпечатък).

Научните изследвания продължават да се развиват в тази насока като Lv et al. (2026), дори използват синергията между различни микроорганизми в смесени микробни консорциуми (микроводорасли *Chlorella pyrenoidosa* и бактерии *Methylocystis hirsuta*) за преобразуване на метан и въглероден диоксид в биопластмаса (PHB) като така подобряват фиксацията на CO₂ и повишават конверсията на CH₄ спрямо чисти култури. Освен това се подобрява масообмена (газ–течност), намалява натрупването на токсични междинни продукти и се повишава метаболитната стабилност на системата. Синергията се състои в това, че микроводораслите фиксират CO₂ чрез фотосинтеза и произвеждат кислород и органични съединения, а метанотрофните бактерии използват CH₄ като въглероден и енергиен източник и синтезират PHB, тоест получава се затворен въглероден цикъл. Такава технология допринася за развитието на стратегиите за биопроизводство с отрицателен въглероден диоксид като подкрепя устойчивата биоикономика и климатичните цели.

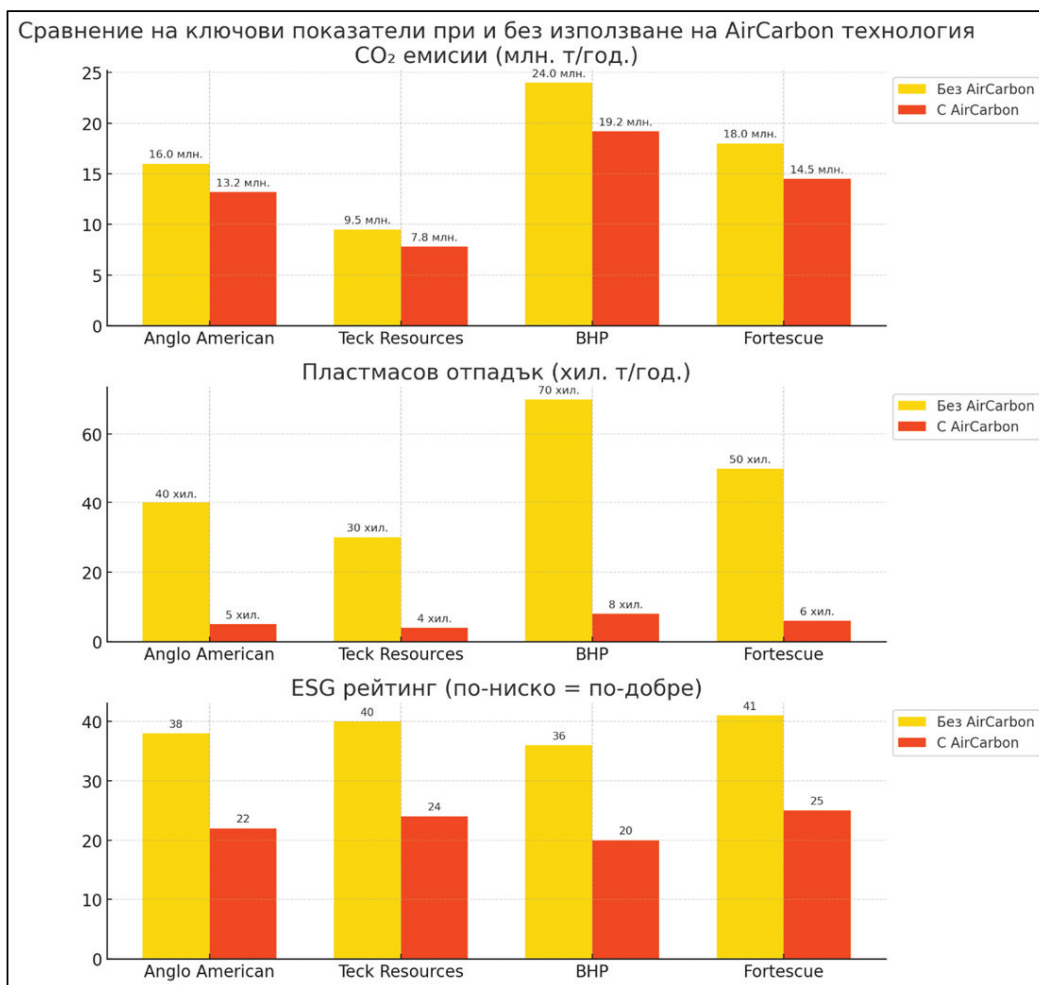
Приложение в контекста на кръговата икономика и ESG стратегиите

Въпреки напредъка в прилагането на кръговата икономика в ESG стратегиите, компаниите продължават да търсят иновации за по-бърз преход към устойчивост. Технологията AirCarbon се откроява като обещаващо решение, превръщайки въглеродни емисии и пластмасови отпадъци в ценен ресурс и подобрявайки екологичните показатели и ESG рейтингите.

Сценарийното моделиране и прогнозите подпомагат стратегическото планиране, като позволяват оценка на рискове и адаптация към динамична среда, особено в минерално-суровинния сектор. На фигура 2 е визуализиран теоретичният ефект от AirCarbon върху емисии и отпадъци, базиран на ESG данни на четири водещи международни минни компании - Anglo American, Teck Resources, BHP и Fortescue Metals Group за периода 2021–2025 г. Технологията на Newlight Technologies използва микроорганизми, които преобразуват парникови газове в PHB – биополимер, алтернатива на пластмасите, като процесът е въглеродно-отрицателен (за всеки произведен килограм AirCarbon се



улавят и съхраняват повече парникови газове, отколкото се отделят). Прилагането ѝ позволява на една минна компания да улавя своите емисии директно от вентилационните системи и да ги превръща в PNH гранули на място. Тези гранули могат да се използват за производство на биоразградими детайли, лични предпазни средства или опаковки. Най-важното предимство е, че в края на жизнения си цикъл тези продукти се разграждат по естествен път в почвата или водата, връщайки въглерода в биосферата без натрупване на микропластмаса.



Фиг. 2. Теоретичен ефект от прилагането на технологията AirCarbon върху емисиите, пластмасовия отпадък и ESG показателите в международни минни компании (2021–2025).

От графиките на фиг. 2 се вижда, че чрез внедряване на тази технология в минната индустрия ще се постигне значителен напредък в устойчивото управление на ресурсите.

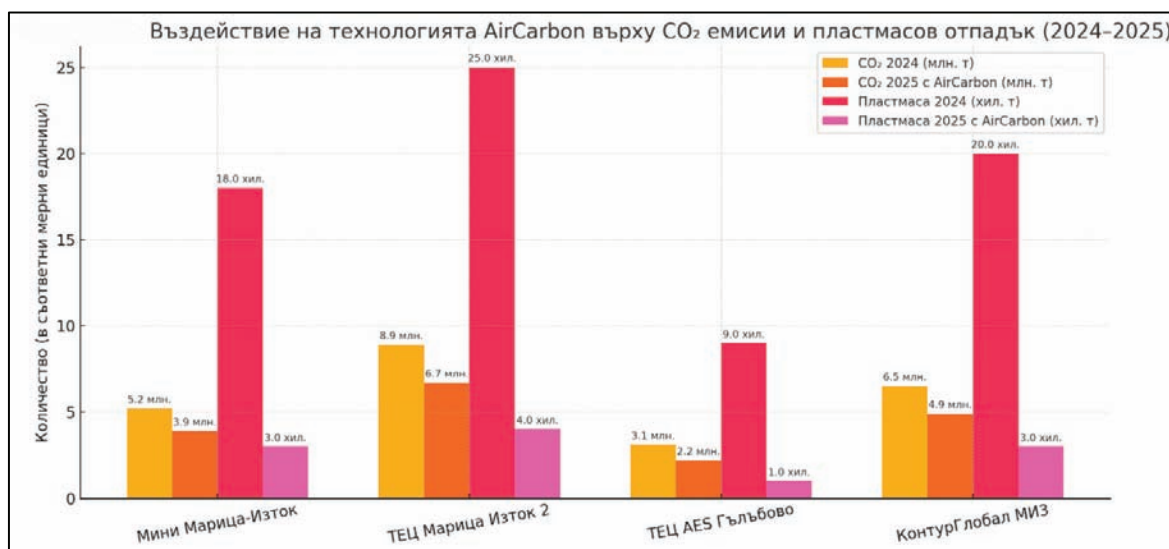
Основните източници за данни в този модел са публичните годишни отчети на водещите минни компании за периода 2021-2023 г. като Anglo American, Teck Resources, BHP и Fortescue Metals Group, както и теоретичните стойности за 2025 г., които са изчислени на база реалните стойности и ефекта от внедряването на AirCarbon. Технологията позволява въглеродно улавяне (2.5–3.0 кг CO₂ за всеки 1 кг AirCarbon), заместване на пластмаса в опаковки и оборудване с биоматериали AirCarbon (до 80–90%), и очаквано подобрене на ESG рейтингите по стандарти като Sustainalytics и MSCI.

Примера показва, как за компанията BHP, емисиите на CO₂ спадат от 24 Mt на 19.2 Mt (~20%), докато пластмасовият отпадък намалява от 70 хил. т на 8 хил. т (–88%). ESG рейтингът на компанията се подобрява от 36 на 20, като разходите за екологични корекции се класифицират като „ниски“ спрямо базовата стойност, която е била „висока“. Този модел демонстрира как внедряването на една-



единствена иновационна технология – AirCarbon – може да доведе до цялостна трансформация на устойчивостта, като интегрира кръговата икономика и усилва ESG устойчивите си стратегии. Моделът показва практическото приложение на кръговата икономика в индустрия с висока интензивност на ресурсна и енергийна консумация. Също така не се компрометира производственият капацитет, а се предлагат възможности за значителни икономически и екологични ползи, които могат да подкрепят прехода на индустрията към по-устойчиви практики.

Като пример на национално ниво, е представена графика на фиг. 3 с данни за теоретично въздействие на технологията AirCarbon върху парниковите емисии и пластмасов отпадък в българския енергиен и минен сектор за периода 2021–2025 г.



Фиг. 3. Теоретично въздействие на технологията AirCarbon върху CO₂ емисии и пластмасов отпадък в българския енергиен и минен сектор (2021–2025)

Реалните данни за периода 2021-2024 г. са взети от Националния статистически институт (НСИ), Министерството на околната среда и водите (МОСВ), както и публични доклади на ключови предприятия в енергийния и минния сектор, като „Мини Марица-Изток“ ЕАД, ТЕЦ „Марица Изток 2“, ТЕЦ „AES Гълъбово“ и ТЕЦ „КонтурГлобал Марица Изток 3“. Теоретичните изчисления за 2025 г. с внедряването на технологията AirCarbon са базирани на данни от Newlight Technologies и показват, че за всеки 1 кг произведен AirCarbon, се улавят между 2.5 и 3.0 кг CO₂, което демонстрира значителен потенциал за намаляване на въглеродните емисии. Моделирането на ефектите от внедряването на AirCarbon се базира на текущите стойности за емисии и пластмасов отпадък през 2021 г. и предвижда сценарий, в който между 10-15% от пластмасовите консумативи и компоненти в индустриалните процеси се заменят с AirCarbon.

От графиката на фиг. 3 се вижда, че пластмасовият отпадък може да бъде редуциран с до 85%, благодарение на свойствата на AirCarbon като биоразградим и устойчив материал, подходящ за многократна употреба и без негативно въздействие върху околната среда. Прилагането на модела води до намаление на CO₂ емисии с между 15% и 25%; драстично редуциране на пластмасов отпадък с между 80% и 90%; подобрение на ESG рейтингите с около 30–40%; нивото на инвеститорско доверие преминава от "средно" или "ниско" към "високо".

Икономическата жизнеспособност, анализирана от Akkoynlu et al. (2024), показва, че макар разходите за биопластмаса да са по-високи, те се балансират от ESG ползите: намалени въглеродни данъци, по-добър имидж пред инвеститорите и социална легитимност (Social License to Operate). Според симулационните модели, използването на емисионни газове като „безплатна“ суровина променя коренно икономическата логика на биопластмасите. Суровините обикновено съставляват до



60% от разходите при производството на РНВ. Чрез AirCarbon този разход се превръща в спестяване, не само поради липсата на разходи за суровина, но и поради избягнатите емисионни квоти по европейската схема EU ETS. Технологията не само предоставя екологична алтернатива на традиционните методи за управление на въглеродни емисии, но също така се явява стратегическа платформа, която насърчава индустриите да преминат от реактивен към проактивен модел на устойчиво развитие. Чрез интегрирането на напреднали технологични решения, AirCarbon създава възможности за минерално-суровинния сектор да адаптира своите процеси към изискванията на съвременните ESG стандарти и принципи на кръговата икономика. Технологията предлага реални, измерими и устойчиви ползи за индустриите, като не само намалява въглеродния отпечатък, но и създава условия за постигане на дългосрочни екологични и социални цели. За българския минен сектор това означава възможност за предлагане на продукция с изключително нисък въглероден интензитет. В близко бъдеще това ще бъде решаващо при избора на доставчици от страна на европейските автомобилни и технологични гиганти, които имат заложен строг ESG изисквания към своите партньори по веригата.

Заключение

Внедряването на AirCarbon позволява на минните предприятия да преминат отвъд простото спазване на екологичните норми. Синергията между технологичния напредък и стратегическото ESG планиране са единственият път към дългосрочна устойчивост в минерално-суровинния сектор. Интеграцията на кръговата икономика и ESG стратегии не е само теоретично възможна, но и стратегически ключова за минния сектор. Технологиите, базирани на принципите на кръговата икономика (като AirCarbon) имат потенциала не само да намалят въглеродния и пластмасовия отпечатък, но и да служат като инструмент за подобряване на социалната и управленската ефективност на предприятията. Комбинирането на иновации с устойчиви практики засилва конкурентоспособността на компаниите и отговаря на очакванията на инвеститори, регулатори и обществото. Това затвърждава тезата, че ESG стратегиите, подкрепени от конкретни технологични решения, са не просто политически ангажимент, а икономически и екологичен приоритет в дългосрочен план. Интеграцията на кръгова икономика и ESG е не само екологично наложителна, но и икономически изгодна стратегия за декарбонизация. Тя осигурява дългосрочна устойчивост и устойчивост на бизнеса срещу бъдещи въглеродни данъци. Технологичният капацитет за превръщане на парниковите газове в биополимери вече е налично и научно доказано решение, което чака своето индустриално внедряване. Българският минен сектор притежава потенциала да се превърне в лидер на регионално ниво чрез прилагане на подобни иновативни сценарии, съчетавайки традиционния добив с високите биотехнологии.

Използвана литература

- [1] AirCarbon, URL: <https://aircarbon.com/>
- [2] Akkoyunlu B., Gabarre C., Daly S., Casey E., Syron E. (2024) Process modelling for industrial scale polyhydroxybutyrate production using fructose, formic acid and CO₂: Assessing carbon sources and economic viability, *Bioresource Technology*, 393, 130139, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130139>
- [3] Gautam S., Gautam A., Pawaday J., Kanzariya R.K., Yao Z. (2024) Current Status and Challenges in the Commercial Production of Polyhydroxyalkanoate-Based Bioplastic: A Review. *Processes*, 12, 1720, <https://doi.org/10.3390/pr12081720>
- [4] Lv X., Zhou H., Niu Y., Feng K., Ren N., Xing D. (2026) Synergistic conversion of CH₄ and CO₂ into bioplastic by microalgal- bacterial consortia, *Chemical Engineering Journal*, 528, 172037, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.172037>
- [5] Mine 2023: 20th edition. The era of reinvention. PwC. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/tla/content/PwC-Mine-Report-2023.pdf>
- [6] Newmont Corporation, Sustainability. 2024. URL: <https://sustainability.newmont.com/>



- [7] Pham D. N., Mai D. H. A., Lee E. Y. (2024) Biosynthesis of polyhydroxybutyrate from methane and carbon dioxide using type II methanotrophs, *Bioresource Technology*, 405, 130931, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130931>
- [8] Sirohi R., Lee J. S., Yu B. S., Roh H., Sim S. J. (2021) Sustainable production of polyhydroxybutyrate from autotrophs using CO₂ as feedstock: Challenges and opportunities, *Bioresource Technology*, 341, 125751, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125751>
- [9] Teck Resources, Sustainability. 2025. URL: <https://www.teck.com/sustainability>
- [10] United Nations Environment Programme (UNEP). Sustainability Reporting in the Mining Sector: Current Status and Future Trends, 2020, 114 pages. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/33924>



ИЗВЛИЧАНЕ НА ЖЕЛЯЗО ОТ ШЛАКА ОТ СТОМАНОДОБИВНАТА ПРОМИШЛЕНОСТ С ЦЕЛ НАМАЛЯВАНЕ НА ОТПАДЪКА

инж. Ванеса Кирилова, доц. д-р инж. Кремена Деделянова
Химикотехнологичен и металургичен университет
vanesakirilova@abv.bg, k.dedelyanova@uctm.edu

РЕЗЮМЕ

Целта на това проучване е минимизиране на отпадък от кофъчно-пещни инсталации (КПИ). Те са ключови съоръжения в съвременната стоманодобивна промишленост. Служат за вторична обработка на течната стомана, източена от първичния агрегат, в случая електродъгова пещ (ЕДП). В тях най-общо се поддържа или повишава температурата на стоманата до необходимите нива за леење и се коригира химичния състав, с добавяне на вар и феросплави за постигане на конкретната марка стомана. Този отпадък, наречен шлака от кофъчно-пещни инсталации, се генерира по време на рафиниране на стомана (вторично стоманопроизводство) в кофъчно-пещни инсталации (КПИ), след първично производство в електродъгови пещи (ЕДП)[1].

За да се види съдържанието на полезните компоненти като желязото, с цел намаляване на отпадъка, в това проучване представителна проба от шлака е подложена на магнитна сепарация. Чрез този процес пробата се разделя на магнитни и немагнитни фракции, след което е направен анализ на всяка една фракция, за да се изрази баланс по схемата на магнитна сепарация.

Увод

Стоманодобивната промишленост е един от основните източници на индустриални отпадъци, като значителна част от тях са шлаките, по-голяма част от тях са от електродъговите пещи (ЕДП), а по-малка от кофъчно-пещни инсталации (КПИ). Голяма част от шлаката от ЕДП се влага като изкуствен агрегат в строителната индустрия [2], [3], [4], докато шлаката от КПИ все още няма толкова широко приложение и често се разглежда като отпадъчен материал.

Годишното производство на шлака от кофъчно-пещни инсталации надхвърля 20 милиона тона [5]. В шлаката от КПИ се съдържат редица тежки метали. При складиране тя се раздробява, което води до образуване на прах и замърсяване с тежки метали [6]. Натрупването на шлака създава екологични проблеми, свързани с нейното съхранение и въздействие върху околната среда. Освен това, загубата на тежки метали в нея води до неефективно използване на ресурсите. Поради тази причина все по-голямо внимание се обръща на възможностите за повторно използване и оползотворяване на този вид отпадък.

В настоящото проучване се разглеждат методи за извличане на желязо от шлака, получена при стоманодобивни процеси или по-конкретно от вторичния процес на стоманодобива, в кофъчно-пещни инсталации (КПИ). Основната цел е да се проучи доколко ефективно може да се възстанови съдържанието на желязо и съответно да се намали количеството на отпадъка.

Чрез прилагането на подходящи технологични методи може да се постигне както икономическа полза, така и намаляване на негативното въздействие върху околната среда, което прави темата актуална и значима за съвременното развитие на черната металургия.

Стоманените шлаки имат няколко основни приложения [7]. Те могат да се върнат отново в процеса на стоманодобив, след като се отделят примесите и останат само шлаките с високо съдържание на желязо, също така може да се използват и като флюс в основното производство на стомана, като предварително се охлаждат и пресяват за премахване на големите парчета метал, след което магнитно се разделят и се смесват с вар [8], [9], [10]. Шлаките също се използват като суровина в строителната индустрия, например в циментовото производство и като допълнителен циментов материал в циментиращите минни засипки [11], [12], [13]. Шлаки могат да се използват, след като се преработят, в селското стопанство като торове или подобрители за почвата [14], [15] или като пълнители за нитрил-бутадиенов каучук. В този контекст използването на шлаки от КПИ като заместители на калциев карбонат в нитрил-бутадиенов каучук може да се разглежда като пример за



кръгова икономика - отпадъчният материал от стоманодобивната индустрия се оползотворява като нов ресурс при производството на каучукови смеси [1]. Друго приложение намират в пречистването на отпадъчни води, в ролята на коагуланти, филтри, абсорбенти и неутрализатори/стабилизатори [16].

Шлакът от КПИ съдържа редица метали като Al, Ca, Cr, Fe, Mg, Na, Zn, Si и други. Тези метални съставки могат да бъдат извлечени чрез различни техники за преработка на минерали, раздробяване, магнитно разделяне, флотация, печене и други [17].

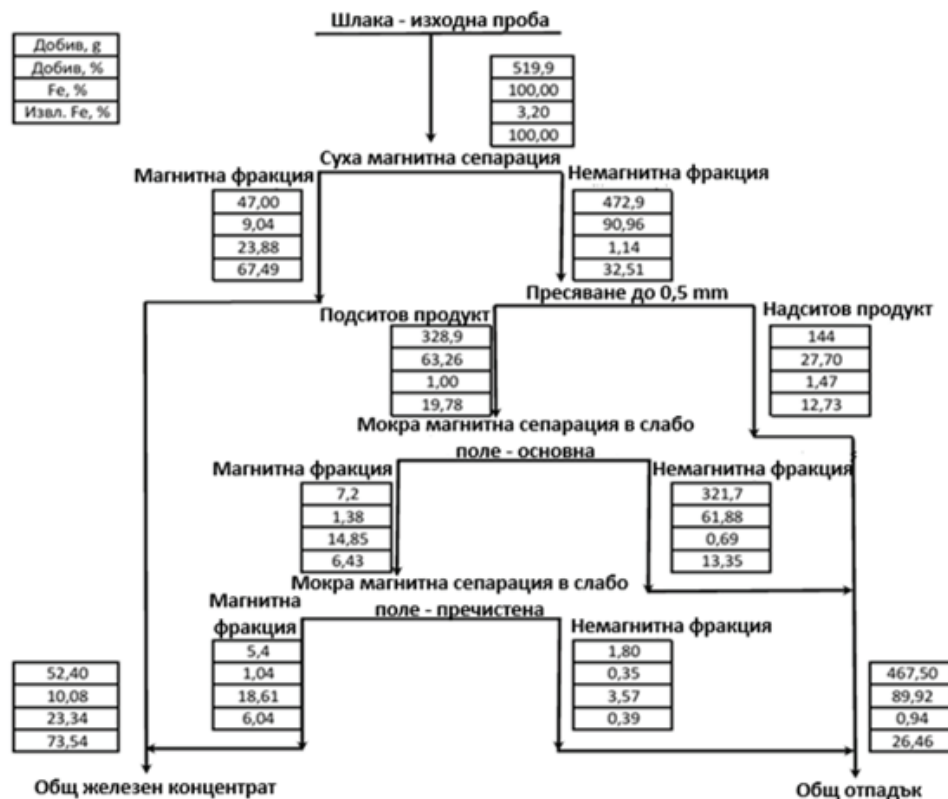
Методи

Шлакът от КПИ се охлажда при околна температура за около 48 часа, след което преди да бъде третирана отлежава на отделна площадка. Тъй като съдържа големи метални парчета, търпи разделяне. Отстраняват се големите парчета метал и остава само прахообразния материал, който всъщност след това се третира по различен начин, в зависимост от това какво искаме да извлечем. В този конкретен случай се стремим към извличане на желязото, за целта е използван методът на магнитната сепарация.

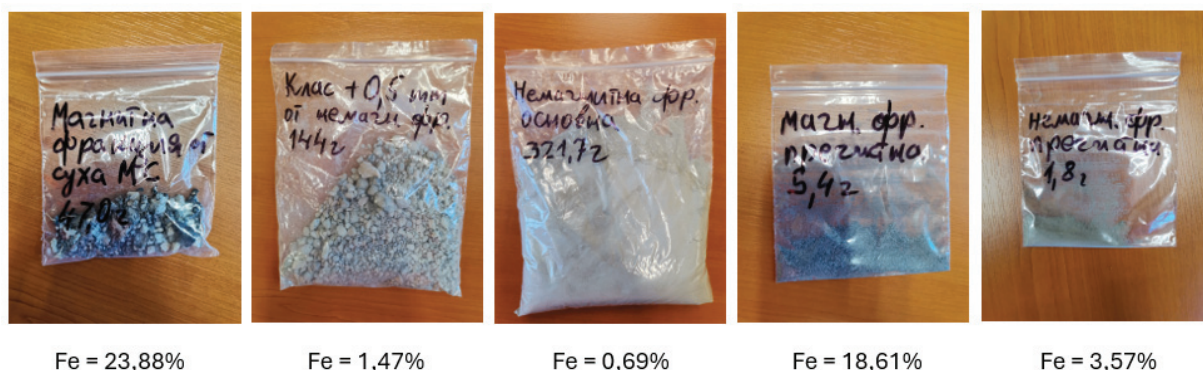
Магнитната сепарация е високоефективен процес за разделяне на магнитни от немагнитни материали. Тя се базира на разликата в магнитната възприемчивост на минералите, като феримагнитните се обогатяват в слабо магнитно поле с индукция от 0,1 до 0,15 Т, а парамагнитните в поле с индукция от 0,8 до 1,6 Т. Магнитната сепарация е ключова в индустрии като обогатяването на полезни изкопаеми, рециклирането на отпадни суровини, осигурявайки високо качество на съответните минерални концентрати. Едно от приложенията, които касаят това проучване, е извличането на продукт, набогатен на желязо от основния отпадък на електродъговите пещи в завод Стомана, Перник.

Резултати

Взета е охладена представителна проба от КПИ шлага, отпадък от стоманодобивен завод. Изходна проба от 519,9 гр. е подложена на суха магнитна сепарация, чрез която пробата се разделя на магнитна и немагнитна фракция.



Фигура 1. Суха магнитна сепарация на шлага от КПИ на „Стомана Индъстри“ АД, Перник



Фигура 2. Проба от шлага от КПИ на „Стомана Индъстри“ АД, Перник

След отделянето на едрите късове и леяци от пробата посредством магнитна сепарация е направено пресяване по клас 0,5 мм и надситовия продукт впоследствие е добавен към немагнитната фракция. Класата – 0,5 мм е подложена на суха магнитна сепарация в слабо поле, създадено от постоянни магнити тип Nd₂Fe₁₄B с редуваща се полярност по схема с основна и пречистна операции. Получен е набогатен продукт с 23,34% желязо, добив – 10,08% от изходната проба и извличане 73,54%. В немагнитната фракция съдържанието на желязо е 0,94% при извличане 26,46%. Причината за непълното извличане на желязото в магнитната фракция е наличието на вюстит FeO, който е със слабомагнитни свойства.

Изводи и препоръки

Получената магнитна фракция би могла да намери приложение като добавка към мергела в циментовата промишленост за увеличаване съдържанието на желязо в изходната смес до необходимия процент, за да се получат впоследствие при термичния процес циментовите минерали. Тъй като съдържанието на желязо е 23,34% поради адхезията между железните минерали и фините прахови частици, би могло обогатителния процес да се продължи чрез досмилане и мокра магнитна сепарация, при което съдържанието му чувствително ще се увеличи. По отношение на немагнитната фракция – тя би могла да намери приложение като заместител на строителните пясъци в различни бетонни конструкции, като добавка в асфалта за пътно строителство, а също така и като пълнител за изработката на плочки, бордюри и други декоративни елементи.

Усвояването на тази суровина ще изисква допълнителни изследвания за установяване качествата на цимента, получен с добавката на тази магнитна фракция, здравината и устойчивостта на асфалта и бетонните елементи с добавката на немагнитната фракция и въз основата на тези данни ще може да се направи оценка на приложимостта на тези продукти в съответните промишлености.

Литературни източници

- [1] Anna Gobetti, Giovanna Cornacchia, Marcello Gelfi, Giorgio Ramorino, White steel slag from ladle furnace as calcium carbonate replacement for nitrile butadiene rubber: A possible industrial symbiosis, Results in Engineering, 18, 2023, 101229
- [2] Yi Jiang, Tung-Chai Ling, Caijun Shi, Shu-Yuan Pan, Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review, Resources, Conservation and Recycling, 136, 2018, 187-197
- [3] Carlo Pellegrino, Vittorio Gaddo, Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate, Cement and Concrete Composites, 31, 9, 2009, 663-671
- [4] Flora Faleschini, Katya Brunelli, Mariano Angelo Zanini, Manuele Dabalà, Carlo Pellegrino, Electric Arc Furnace Slag as Coarse Recycled Aggregate for Concrete Production, Journal of Sustainable Metallurgy, 2, 2016, 44-50



- [5] Liushun Wu, Hui Li, Haiqing Mei, Lei Rao, Haichuan Wang, Ningning Lv, Generation, utilization, and environmental impact of ladle furnace slag: A minor review, *Science of The Total Environment*, 895, 2023, 165070
- [6] Bo Xu, Yaolin Yi, Use of ladle furnace slag containing heavy metals as a binding material in civil, *Science of The Total Environment*, 705, 2020, 135854
- [7] Xin Liu, Yan-ping Bao, Separation and extraction of iron resources from hazardous electric arc furnace (EAF) steel slag: Aggregation of Fe-rich layers, magnetic separation, powder characterization, *Process Safety and Environmental Protection*, 190B, 2024, 420-428
- [8] Jianlong Guo, Yanping Bao, Min Wang, Steel slag in China: Treatment, recycling, and management, *Waste Management*, 78, 2018, 318-330
- [9] Suguna Soumya Varanasi, Venu Madhava Rao More, M. Bhaskar Venkata Rao, Sankar Reddy Alli, Anil Kumar Tangudu, Dey Santanu, Recycling Ladle Furnace Slag as Flux in Steelmaking: A Review, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5, 2019, 449-462
- [10] Matteo Lugano, Damiana Chinese, Marina Campolo, Marco Fulgosi, Multicriteria assessment of pre-treatment and material handling systems for improved recycling of ladle slag in electric steelmaking, [Results in Engineering](#), 26, 2025, 105403
- [11] Kuizhen Fang, Dongmin Wang, Jihui Zhao, Ming Zhang, Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: Influences on the hydration and hardening properties of cement, *Construction and Building Materials*, 299, 2021, 124265
- [12] Paulo AraosHenríquez, Diego Aponte, Jordi Ibáñez-Insa, Marilda Barra Bizinotto, Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement, *Construction and Building Materials*, 289, 2021, 123106
- [13] Noureddine Ouffa, Tikou Belem, Romain Trauchessec, Cécile Diliberto, Pascal Lemoine, Youssef Benarchid, Mostafa Benzaazoua, Water quenching and grinding of ladle furnace slag for use as supplementary cementitious material in cemented mine backfills, [Cement and Concrete Composites](#), 160, 2025, 106048
- [14] Di Gao, Fu-Ping Wang, Yi-Tong Wang, Ya-Nan Zeng, Sustainable Utilization of Steel Slag from Traditional Industry and Agriculture to Catalysis, *Waste Utilization and Resource Recovery*, 12(21), 2020, 9295
- [15] Valentina Colla, Teresa Annunziata Branca, Roland Pietruck, Simon Wölfelschneider, Agnieszka Morillon, David Algermissen, Sara Rosendahl, Hanna Granbom, Umberto Martini, Delphine Snaet, Future Research and Developments on Reuse and Recycling of Steelmaking By-Products, *Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector*, 13(4), 2023, 676
- [16] J.N. Sahu, Y. Kapelyushin, Devi Prasad Mishra, Prabir Ghosh, B.K. Sahoo, E. Trofimov, B.C. Meikap, Utilization of ferrous slags as coagulants, filters, adsorbents, neutralizers/stabilizers, catalysts, additives, and bed materials for water and wastewater treatment: A review, *Chemosphere*, 325, 2023, 138201
- [17] Niladri Shekhar Samanta, Pranjal P. Das, Simons Dhara, Mihir K. Purkait, An Overview of Precious Metal Recovery from Steel Industry Slag: Recovery Strategy and Utilization, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62, 2023, 23



ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ ПЪРВИЯ ЕТАП НА НАЦИОНАЛНА НАУЧНА ПРОГРАМА "КРИТИЧНИ СУРОВИНИ"

Светослав В. Георгиев¹, Росица Василева¹, Стоян Георгиев¹, Никола Ботушаров², Ирена Григорова³, Росица Титоренкова⁴, Виолина Ангелова⁵, Емилия Ченгелова⁶, Румяна Вацева¹, Ирена Пейчева¹, Димитър Антонов¹, Янко Герджиков², Росица Иванова¹

¹ Геологически институт, Българска академия на науките, София 1113

² Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, Катедра Геология, палеонтология и изкопаеми горива, София 1504

³ Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700

⁴ Институт по Минералогия и Кристалография, Българска академия на науките, София 1113

⁵ Аграрен Университет, Катедра Химия, Пловдив 4000

⁶ Институт по философия и социология при БАН, София 1000

MAIN RESULTS FROM THE FIRST STAGE OF THE BULGARIAN NATIONAL SCIENTIFIC PROGRAM “CRITICAL MINERALS”

Svetoslav V. Georgiev¹, Rositsa Vassileva¹, Stoyan Georgiev¹, Nikola Botoucharov², Irena Grigorova³, Rositsa Titorenkova⁴, Violina Angelova⁵, Emilia Chengelova⁶, Rumiana Vatsseva¹, Irena Peytcheva¹, Dimitar Antonov¹, Ianko Gerdjikov², Rositsa Ivanova¹

¹ Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev Str., bl. 24, 1113 Sofia

² Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Department of Geology, Paleontology and Fossil Fuels, 1504 Sofia

³ University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Sofia 1700

⁴ Institute of Mineralogy and Crystallography Acad. I. Kostov, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev Str., bl. 107

⁵ Department of Chemistry, University of Agriculture, Mendeleev Street 12, 4000 Plovdiv, Bulgaria

⁶ Institute of Philosophy and Sociology, Bulgarian Academy of Sciences., Sofia 1000, Bulgaria

ABSTRACT

The National Scientific Program “Critical and Strategic Raw Materials for Green Transition and Sustainable Development” (2024–2029) is a nation-wide research initiative that unites more than 220 researchers from 14 universities and research institute studying various aspects of critical minerals in Bulgaria. The first of five stages of the Program finished at the end of 2025. Here, we provide an overview of the structure of the work activities within the Program and summarize the main outcomes from the first stage. These include a number of scientific publications, critical mineral summaries, outreach activities and others. Detailed information on the goals, participants, and results from the Program are available on the recently launched website of the Program at <https://kss.geology.bas.bg/bg>.

Keywords: Bulgaria, mining, processing, public opinion, environment

Увод

В края на 2024 г. стартираха дейностите по петгодишната Национална научна програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ (ННП КСС). Програмата обединява над 220 учени от 14 научно-изследователски и образователни организации с водещ партньор Българската академия на науките. Основните цели на програмата са изследване на потенциала на България за устойчив добив, преработка и рециклиране на критични и стратегически суровини, оценка на обществената нагласа за приемането им и информиране на обществото по



темата. Настоящият доклад обобщава основните резултати от първият етап на програмата, както и част от междинните резултати след приключването на етапа.

Първият етап на Програмата, завършил през м. декември 2025 г., бе основополагащ за успешното изпълнение на предвидените цели. През него бяха сформирани основните колективи по работните задачи, бе закупена научна апаратура и бяха започнати първите изследвания. Отчитането на етапа по количествени параметри, заложи в работния план на Програмата, показва висока ефективност на колектива. През първата година са отчетени 31 участия в престижни международни и национални форуми с международно участие, 6 организирани научни семинари или сесии на национално и международно ниво и 4 организирани информационни и медийни събития и изложби. Публикувани или приети за печат са 29 научни публикации в специализирани списания с импакт фактор и/или импакт ранг. Изготвени са 9 публично достъпни обобщения за критични и стратегически суровини в България. Публичната ангажираност на участниците в Програмата също бе на много високо ниво, като се отчитат 42 участия в публични информационни и медийни събития, включително водещи телевизии, радиопредавания и вестници, както и изложби или участия със специализиран щанд. Настоящият обзор показва като конкретни примери част от публикуваните резултати. Основните резултати от дейностите по програмата (статии, обзори, презентации, новини, медийни изяви и др.) са налични на интернет страницата на Програмата на адрес <https://kss.geology.bas.bg/bq>.

Резултати по работни пакети

Основните дейности по ННП КСС са структурирани в 7, т. нар. „хоризонтални“, работни пакети (I.1. до I.7.) с ясно дефинирани работни задачи. Три допълнителни „вертикални“ работни пакети (II.1. до II.3.) обобщават наличната информация и подпомагат изпълнението на дейностите по Програмата.

РП. I.1. Находища и проявления на критични и стратегически суровини в България – изясняване и преоценка на наличните количества за уточняване на геоложки райони с висок потенциал за нови открития на критични суровини.

Дейностите в работен пакет I.1. целят изясняване на наличието и количеството на критични и стратегически суровини (КСС) в известни типове минерални находища. Съществена част от работата е насочена и към преоценка на условията за натрупване на значими количества от КСС и за разкриване на нови типове находища и проявления на потенциални суровини. За изпълнение на целите в пакета са формулирани пет основни задачи, обхващащи: обобщаване и систематизиране на наличната информация за КСС (I.1.1.); изследователски дейности по установяване на количество, пространствено разпределение, минерали концентратори и носители на критични и стратегически суровини в рудни находища (I.1.2.), в пегматити, магмени и метаморфни скали (I.1.3.), както и в седиментни скали (I.1.4.); и определяне на геоложки райони с висок потенциал за откриване на нови находища на КСС (I.1.5.).

През първата година, наред със систематизирането на наличната информация под формата на обзори (<https://kss.geology.bas.bg/bq>), основният фокус беше поставен върху първичните източници и известните минерални находища. Получените резултати за съдържанието на полезни компоненти в рудни райони (например медно-порфирни системи и Pb-Zn находища) показват наличие на КСС не само в рудната минерализация, но и във вместващите скали и отпадъчните продукти.

Изследванията върху минералния състав и съдържанието на КСС в пегматити и метаморфни скали бяха съсредоточени върху минерализации в западната част на Родопския масив (Ag-Mo-Au находище Бабяк и пегматитите при Вищерица; Stavrev et al., 2025), централната част (Pb-Zn находище Джурково; Vassileva et al., 2025) и източната част (Маджаровски руден район), както и частично в Средногорската зона, свързана с Росенския плутон. Минералите концентратори на редкоземни елементи, като апатит, и съдържанията на КСС в алкални скали са изследвани и в райони от Стара планина и Краището. Проучванията върху седиментни находища са фокусирани основно върху целестинови проявления, въглища от Станянския басейн и манганорудни минерализации.



На базата на новите данни за пространственото разпределение на различните типове скали и съдържанията на КСС в минералите бяха очертани перспективни райони за последващи изследвания.

РП I.2.: Структурен контрол, петролого-геохимични индикатори и модели за формиране на находища и проявления на КСС в България

В рамките на работния пакет са заложили дейности по актуализация и преоценка на регионалната геоложка обстановка в металогенните зони, структурния контрол и магмено-хидротермалните системи, генетично свързани с КСС. През първата отчетна година усилията бяха насочени към организационното обезпечаване на екипа и дефинирането на специфичните задачи по направления. Проведени са систематични проучвания за обобщаване на данни от специализирана научна литература и архивни геоложки доклади, съхранявани в Националния Геофонд към Министерството на енергетиката. Стартирана е изследователска работа по конкретни геоложки проблеми, паралелно с подготовката на научни публикации и представянето на междинни резултати в специализирани форуми. Основните резултати включват:

Дефиниране на параметрите на базите данни и ГИС. За унифициране на базите данни за КСС в България и синхронизиране на геоложката информация за тях с налична на европейски платформи бяха организирани работни срещи с участници от РП1.1. Обсъдена бе структурата на ГИС-базирана база данни за КСС и синхронизиране с EuroGeoSurveys за изясняване изискванията на EGD1 платформата (European Geological Data Infrastructure), свързани със структурата на метаданните за находища, прагови стойности за класификация на избрани суровини, геоложки карти и др. Уточнени са важни параметри, които трябва да присъстват в базата данни и е започнала работа по систематизирането на достъпната информация. Извършени са дейности по създаване и попълване на геохимични и геохронологични бази данни за магмени, метаморфни и хидротермални събития свързани с КСС.

Работа по нова тектонска подялба на територията на България. Извършва се оценка и критичен анализ на съществуващите тектонски модели. За някои ключови райони се работи по изготвянето на нови тектонски карти и модели. Подготвяне на металогенна карта на България в М 1:1 000 000. Георефериране на геоложки карти и попълване на шаблони за атрибутивната информация. Стиковане на карти на ключови рудни райони.

Дефиниране и работа в ключови рудни райони. Набелязани са конкретни ключови райони на изследване и е започната конкретна работа по събиране на публикувани данни, обработка на образци за конкретни изследвания и обобщаване на информацията. Конкретните райони включват: 1) минерализации и магмени източници, характеристика на магматизма от Росенското рудно поле, връзка на подводния вулканизъм и седиментацията между Маслен нос и с. Резово и връзка на магматизма и орудяванията в околностите на с. Иглика. 2) Характеристика на пропилитовия тип изменения за извеждане на индикатори за позиция в хидротермалната система от района на находище Елаците. 3) Термохронологичка еволюция на структурите в находище Челопеч. 4) Характеристика на акцесорни минерали (циркон, апатит, титанит, аланит, монацит и др.) по С–Ю профил през Централно Средногорие. 5) Изучаване на минерализациите свързани с мафични интрузии – напр. Манастирския плутон. 6) Влияние на типа вулканизъм върху стила на минерализацията от различните геоложки епизоди – напр. в късната креда в Средногорието и еоцен-олигоцен в Източни Родопи. 7) Изследване на архитектурата на епитермалната жилна система в Крумовградското златно поле. Част от резултатите са представени в научни статии (напр. Georgiev et al., 2025; Ivanov et al., 2025)

РП.I.3. Оценка на потенциала на България за енергийни ресурси необходими за осъществяването на зелен преход.

През първата година от работата на РП I.3 се осъществиха дейности по прегледа и детайлен обзор на геофондовите материали, научната литература и предходни научни изследвания за създаване на геоложка, сондажно-геофизична, геохимична, хидрогеоложка и агро-биохимична и др. база данни, както и първоначални самостоятелни анализи.



Основните цели при събирането на значителен обем първична информация през първата година на проекта бяха: Запознаване с актуалното състояние на поставените въпроси в работния пакет; детайлен анализ на научната и научно-приложната изученост и постигнатото по всяка отделна задача до момента; набелязване на ключови геоложки профили, типови разрези, перспективни локации и конкретни обекти за специализирани геоложки, геохимични, хидрогеоложки, агро-биохимични и др. аналитични изследвания; информиран избор за прилагане на целесъобразни научно-изследователски методи и подходи в следващите етапи на работа; планиране на първоначални изследвания и първични анализи на събраната комплексна информация.

Постигането на поставените цели за първия етап от проекта беше основен акцент в работата и най-важната предпоставка за успешно преминаване към следващия етап от ННП, през който да започнат конкретни анализи и оценки за получаване на първите научно-изследователски резултати. Всички количествени показатели са постигнати, индикаторите за изпълнението на програмата, популяризираните и публикуваните материали за първата година от работата на колектива са преизпълнени (напр. Marinovska et al., 2025; Panova et al., 2025), което е положителен знак за експертизата и мотивацията на колектива. Предстоят конкретни и задълбочени изследвания и анализи, които ще предопределят научните и научно-приложните приноси на колектива.

Актуалността на отделните задачи се засили още повече с оглед на геополитическата обстановка в Света и динамичните промени в енергийният сектор през последната година. Резултатите от първата година са обнадеждаващи и ще могат заедно с извършеното през следващите етапи да очертаят важни изводи и да бъдат фундамент на една бъдеща стратегия в енергийния сектор.

РП.1.4. Ефективен добив и преработка на суровини в България и потенциал за попълно извличане на критични суровини.

Постигнати са значими научни и приложни резултати, които формират стабилна основа за следващи изследвания и технологични разработки. Извършена е системна идентификация и анализ на действащи минни обекти в България, съдържащи критични и стратегически суровини, включително рудници, насипища и хвостохранилища, като са оценени технологичните, икономическите и екологичните параметри на добива. Паралелно с това са дефинирани критерии и е осигурена техническа база за разработване на симулационни модели чрез внедряване на специализиран софтуер. Проведеният комплекс от съвременни инструментални аналитични методи за фазов, морфологичен и елементарен анализ потвърждава наличието на редица критични елементи (Sb, Bi, Co, Mn, Ag, V, Ti и др.) в полиметални руди и в техногенни отпадъци, като е изяснена тяхната минерална асоциация и форми на присъствие. Това създава надеждна научна основа за разработване на технологии за селективно и попълно извличане, както и за по-пълно оползотворяване на ресурсите. В технологично направление е постигнат съществен напредък при разработването и оптимизацията на хидрометалургичните процеси за извличане на критични елементи. Установени са зависимости между основните параметри на излужване (температура, концентрация на реагенти, съотношение твърдо/течно, хидродинамични условия и др.) и степента на извличане, като например увеличаване извличането на Cu до 81% при повишаване на температурата в изследвания температурен интервал. Съществен принос представлява разработването на интегрирани биоелектрохимически системи за третиране на руднични води, комбиниращи микробна сулфатредукция и микробни горивни клетки. Получените резултати демонстрират ефективно отстраняване на тежки метали и сулфати, както и потенциал за едновременно извличане на ценни компоненти и генериране на енергия. Паралелно са разработени методологични подходи за оценка на технологиите и риска на доставките на суровини, включително нови методи, основани на местното екологично въздействие и екологичната справедливост. Получените резултати надхвърлят част от планираните индикатори и създават предпоставки за разработване на иновативни, ресурсно-ефективни и екологосъобразни технологии за извличане на критични и стратегически суровини от първични и вторични източници (напр. Panayotova et al., 2025a; Panayotova et al., 2025b).



РП 1.5. Индустриални и битови отпадъци като източник на критични суровини

Големите количества отпадъци, генерирани от индустрията и бита, създават екологични проблеми, но същевременно представляват потенциален източник на КСС. По данни на НСИ в България ежегодно се образуват над 90 млн. тона отпадъци, значителна част от които са продукт от добивната, енергийната, металургичната и преработващата промишленост. Част от тези отпадъци съдържат ценни метали и компоненти с потенциал за повторно проложение. В съответствие с принципите на кръговата икономика и устойчивото управление на ресурсите, целта на работния пакет е да се изследват различни индустриални отпадъци и странични продукти, съдържащи КСС, с цел разработване на подходи за тяхното оползотворяване и приложение.

Основните научни приноси са представени в 12 публикации (напр. Nikolov et al., 2025; Vassilev et al., 2025). Изследвани са индустриални пепели от въглища и биомаса (слънчогледови люспи), както и на техните водоразтворими фракции, като са определени съдържанията на 35 критични елемента и е оценен потенциала им като вторичен ресурс. Характеризирани са химичния и минераложки състав на проби от две действащи хвостохранилища с цел оценка на съдържанието и разпределението на ценни и критични елементи. Извършени са минералого-геохимични изследвания на медно-златното находище Челопеч, при които са обобщени данни за концентрациите на микроелементи в пирит и са определени средните съдържания на злато в пирит, тенантит–тетраедрит, сфалерит и борнит. Установено е, че основните рудни минерали представляват потенциален източник на критични и стратегически суровини, включително Ge и Ga, с най-високи концентрации са установени в енаргит и сфалерит. Разработена е база данни за висши гъби и микроорганизми с потенциал за биоадсорбция на метали, като са идентифицирани перспективни видове за концентриране, извличане и утаяване на метали с критично значение (от групата на платината, мед и никел). Разработват се и устойчиви методи за извличане на биоактивни съединения от растителни ресурси чрез субкритична водна екстракция. Извършен е обзор и са охарактеризирани никел-хиперакумулаторни растения, като е документирана първата находка в България на *Noccaea fendleri* ssp. *glauca*. Разработена е устойчива свързваща система с потенциално приложение в строителството, базирана на черпакова шлака и летяща пепел от биомаса, с възможност за използване като алтернативен цимент. Синтезирани и изследвани са композитни материали с каталитични свойства, получени на основата на обработена манганова руда и активни фази от манганов, никелов, кобалтов и меден оксид, както и Ag наночастици. Получените материали показват висока ефективност при каталитично разграждане на озон (66–99%) и фотокаталитично разграждане на малахитово зелено багрило под UV светлина, като най-висока активност е установена при Ag-съдържащ композит. Предствени са и други научни публикации и разработки, свързани с приложна минералогия, геохимия и устойчиво оползотворяване на минерални и индустриални ресурси.

РП.1.6. Изследване на процеси на влияние на КСС върху околната среда за устойчиво развитие.

Работният пакет е насочен към интегрирано изследване на влиянието на критичните и стратегически суровини върху компонентите на околната среда, с акцент върху устойчивото управление на природните ресурси и ограничаването на екологичните рискове. Основен научен принос на пакета представлява прилагането на системен подход за анализ на взаимодействията между почвени, водни и биологични системи в райони, засегнати от минна и преработвателна дейност. Особено внимание е отделено на процесите на натрупване, трансформация и мобилност на тежки метали и промишлено значими елементи в екосистемите, както и на оценката на тяхната бионаличност и екологичен риск.

В рамките на задачите по РП 1.6 са реализирани комплексни изследвания върху замърсени почви, включващи тяхното идентифициране, характеризиране и мониторинг, както и оценка на възможностите за извличане на метални елементи и възстановяване на нарушени терени. Резултатите показват, че почвената среда функционира едновременно като резервоар на замърсители и като регулатор на тяхната достъпност за биологичните системи. В този контекст фиторемедиацията се



очертава като ефективен подход за устойчиво управление на замърсени почви чрез използване на растителни системи с различен акумулационен потенциал. Паралелно с това са проведени изследвания върху състоянието на компонентите на околната среда – въздух, повърхностни и подземни води, както и върху влиянието на климатичните фактори върху геохимичните процеси в засегнатите райони. Получените данни показват, че антропогенното въздействие, свързано с добива и преработката на минерални ресурси, води до комплексни изменения в екосистемите, включително в качеството на водните тела и динамиката на замърсителите. Съществен принос представляват изследванията върху разпределението и фазовия състав на критичните елементи в почвите и седиментите, при които са установени закономерности, свързани както с природните фактори, така и с техногенното въздействие. Разработени са концептуални модели за пренос и натрупване на елементите, които позволяват разграничаване на природния и антропогенния компонент на замърсяването. Допълнително е извършена оценка на риска за биоразнообразието и екосистемните функции в замърсени райони, като са предложени подходи за възстановяване и устойчиво управление на екологичните системи. Подчертано е значението на интегрираните методи, включващи геохимични, биологични и екологични показатели, при разработването на ефективни стратегии за управление на ресурсите. В обобщение, резултатите от Работен пакет 1.6, представени и в научни публикации (напр. Angelova et al., 2025; Stoykova and Atanassova, 2025) допринасят за развитието на научнообосновани модели за оценка и управление на замърсяването, свързано с критичните и стратегически суровини. Те създават основа за внедряване на устойчиви технологии за ремедиация и за оптимизиране на използването на природните ресурси в контекста на зеления преход и устойчивото развитие.

РП.1.7. Оценка на социално-икономическото въздействие на проучването, добива и преработката на критични и стратегически суровини.

В рамките на първата задача в работния пакет е разработена методология за качествено проучване за набиране на експертна информация с цел идентифициране на основните предизвикателства пред дейностите по добив и преработка на критични и стратегически суровини в България. Разработен е и инструментариума за изследванията - въпросник за дълбочинно интервю и сценарий за фокус групово дискусия. Проведени са 28 дълбочинни интервюта с експерти – учени, изследователи, геолози, специалисти, юристи, представители на държавни институции и добивни фирми, работещи в областта на проучването, добива и преработката на критични и стратегически суровини. Въз основа на интервютата е изготвен аналитичен доклад.

Разработена е изследователска методология за провеждането на националните представителни изследвания на общественото мнение и локалните изследвания в избрани населени места от България. Анкетната карта за самопопълване бе разработена при спазване на всички основни методологически стандарти. През октомври 2025 г. бе проведено базовото национално представително изследване на общественото мнение относно добива, приложението и ефектите от критичните и стратегически суровини. Събраната информация е подложена на статистико-математическа обработка и е изготвен подробен аналитичен доклад.

Разработена е методология за оценка на социално икономическото въздействие на дейностите по добива на критични и стратегически суровини и тяхното приложение в българската икономика. Проучени са наличните информационни източници за извършване на оценка за социално икономическите ефекти от добива на критични и стратегически суровини в Европейския съюз и в България. Проведени са 12 експертни интервюта с български специалисти, работещи в областта на добива на критични и стратегически суровини в България. На основата на информацията от проведените експертни интервюта са разработени три аналитични доклада – по един за всяка основна група респонденти.

Разработена е методология за демографска оценка в контекста на дейностите по добива на критични и стратегически суровини и тяхното приложение в българската икономика. Установена и генерирана е обективна статистическа информация, от чийто анализ са изведени основните тенденции в демографското развитие на населението в ключови населени места за демографската структура на



населението в България към 31.12.2024 г. Установени са регионални профили и различия и са изведени основните тенденции в демографското развитие на населението в ключови населени места.

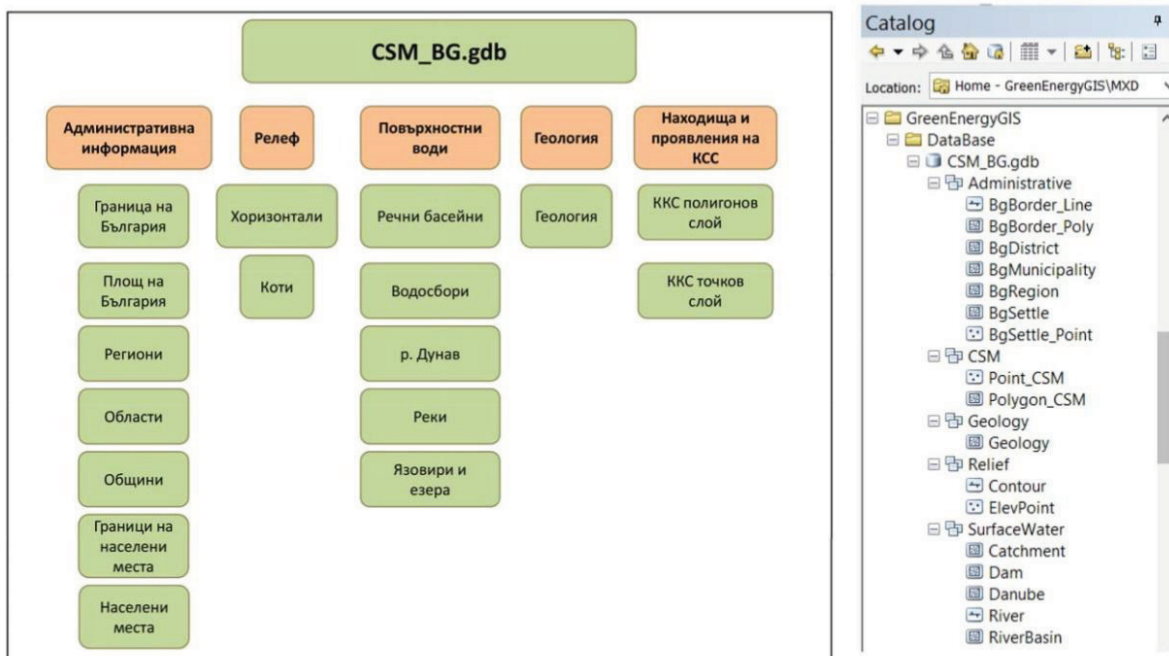
В последната задача от пакета е извършен систематичен преглед на наличните бази данни и музейни колекции в Минераложия отдел на Националния музей „Земята и хората“. Направен е анализ от кои руди и минерали се добива всяка една от критичните суровини. Идентифицирани са минерални образци от български находища с висока научна и музейна стойност, които ще бъдат обект на по-нататъшно проучване и представяне. Разработен е модел за досиета на геотопи и е стартиран процес по събиране на първична информация за минерални находища в България, подбрани въз основа на тяхната научна и образователна значимост. Организиран са три временни постерни експозиции.

РП.II.1. Създаване на единна информационна среда

В работния пакет се включват дейности за създаване на геопространствена база данни и обработка в ГИС среда на наличната геоложка и друга информация, свързана с КСС, както и на резултатите от извършените теренни проучвания, изследвания и анализи от полеви дейности, получени при изпълнение на другите работни пакети (Toteva et al., 2025; Кацаров и др., 2025). Работният пакет включва три задачи.

По *Задача РП.II.1.1. Организация, обработка и систематизиране на наличната информация* са събрани и обработени налични източници на информация, изготвени са таблици, графични материали и векторни данни, осъществена е координация с екипите по други задачи. Получени са първични масиви от данни, съдържащи геоложка и пространствена информация, свързана с КСС. Архивирани са и са систематизирани над 100 документа – карти, таблици и справки. Извършен е обзор и локализиране на публична атрибутивна информация за концесии и находища на подземни богатства в България, включително карти и таблици, подготвени са векторни слоеве с географски контури. Изготвени са базови карти за последващи анализи.

По *Задача РП.II.1.2. Създаване на база данни* е създадена геобаза данни CSM_BG.gdb (Critical and Strategic Materials in Bulgaria) в координатна система WGS 1984 UTM Zone 35N (Фиг. 1). Базата данни (БД) има възможност за допълване и разширяване.



Фиг. 1. Схема на база данни CSM_BG.gdb и изглед в програмата ArcMap 10.5



В БД са импортирани слоеве (.shp) от други бази данни, трансформирани са данни от таблици и .kml файлове, включени са слоеве с информация за КСС. Създадени са два слоя: полигонов (Polygon) и точков (Point). Към всеки слой има атрибутивна таблица с данни и възможност за селекция.

По *Задача РП II.1.3. Създаване на онлайн единна информационна система* са обсъдени изискванията на платформата EGDI (European Geological Data Infrastructure), свързани със структурата на метаданните за находища, праговите стойности за класификация на избрани суровини, геоложките карти и др. Изяснени са основните характеристики и архитектурата на разработваната единна информационна система. Създадена е концепция за разработване на web-базирана система за КСС, като избраният подход за реализация на web-системата се основава на т. н. модел „тънък клиент“ („thin client“), при която терминал с ниска консумация на енергия („тънкия клиент“) се свързва с централен сървър, извършващ по-голямата част от обработката и съхранението на данните. „Тънкия клиент“ действа като точка за достъп, има потребителски интерфейс и събира въведените от потребителя данни, които изпраща на сървъра за обработка. Тази конфигурация има редица предимства, като опростява управлението, повишава сигурността, осигурява лекота при актуализиране на данните и има незначителни изисквания за ресурси от страна на клиента.

РП.II.2. Международно сътрудничество

Изпълнението на дейностите по пакета е фокусирано върху четири приоритетни задачи, чиято реализация цели задълбочаване на стратегическото партньорство и научния обмен. В рамките на Етап 1, по работна задача „Анализ на международни практики“, бе извършено цялостно проучване на официалните документи на ЕС. Процесът включваше сравнителен анализ на държавите от Балканския регион, с фокус върху България, както и систематичен обзор на стратегическите рамки и добрите практики в Китай, Великобритания, Украйна и САЩ. Паралелно с аналитичните дейности, по работна задача „Международен обмен на учени“, бе осъществено ключово работно посещение на водещ изследовател от университета „Фридрих-Александър“ (Германия) в България. Резултатът от тази визита е успешно проведено пилотно изследване за идентифициране на нови екологично чисти енергийни източници (Antonov et al., 2025). Международната видимост на проекта бе допълнително подсилена чрез дейностите по направление „Международни конференции и други прояви“. Те включваха активно участие с лекции на престижните глобални форуми „Future Minerals Forum“ в гр. Рияд, Саудитска Арабия, и на официалния щанд на ЕС по време на Конгреса на Асоциацията на проучвателите в минното дело на Канада (PDAC`2025) в гр. Торонто, Канада. Докато дейностите по направление „Млади учени“ са планирани за реализация през Етап 2, съгласно актуализирания график на проекта, постигнатите до момента резултати очертават ясна тенденция на развитие. Като заключение от дейностите по Работен пакет II.2 за първата година може да се обобщи, че международното сътрудничество в областта на критичните и стратегическите суровини бележи интензивен напредък. За успешното надграждане на тези постижения е необходимо по-нататъшно укрепване на институционалните механизми, изграждане на устойчиво взаимно доверие и реализиране на съвместни инвестиции в иновативни технологии.

РП.II.3. Публично представяне и комуникация на получените научни резултати в обществото

Основната цел на планираните в РП.II.3. дейности е разпространението на информация за ННП и получените научни резултати, достигайки до максимално широк сегмент от заинтересовани (и потенциално заинтересовани) обществени групи у нас и в чужбина. Съответно, основната задача през първата година беше работата по сайт, който да предоставя възможно най-пълна и актуална информация на български и английски език за научните екипи, техните цели и задачи, научната инфраструктурата, новини, събития и получени научни резултати. Сайтът е публикуван на адрес: <https://kss.geology.bas.bg/bg> и е в процес на непрекъснато актуализиране. В началото на периода бяха създадени профили на програмата в социалните мрежи, които освен допълнителни канали за разпространение на информация, дават възможност за непосредствена комуникация с



професионалисти и с любознателни последователи. Съдържанието, което се публикува достига до все по-голям брой потребители. През последните 2 месеца публикациите във ФБ имат 4911 гледания и ръст от 237% в сравнение с предходните два месеца. Повишеният обществен и медиен интерес към темата на ННП през 2025 г. подпомогна съществено изпълнението на част от планираните дейности. Координаторът на програмата проф. д-р С. Георгиев, ръководители на РП, както и членове на екипите са търсени за анализ и коментар по темата от печатни издания и електронни медии с национално покритие (БТВ, Нова ТВ, БНР, Евронюз България, Дарик радио, Bulgaria on Air, TV Bloomberg и др.). Организиран са научни сесии, изложби, академични лекции, както и 4 официални публични информационни събития с участие на Н. Пр. г-жа Кирсти Похянкука, посланик на Финландия в България, представители от МОН, МЕ и БМГК. Научната програма беше представена на два много престижни международни форума – четвъртото издание на „Future Minerals Forum“ в Рияд, Саудитска Арабия, от 14 до 16 януари и PDAC'2025, в Торонто, Канада, от 2 до 6 март 2025.

Заклучение

Национална научна програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ е мащабна научна инициатива, в която учени от различни организации изследват различни аспекти на критичните суровини в България. Настоящият обзор представя структурирането на дейностите в Програмата и обобщава напредъка по работни пакети през първата година. Въз основа на показаните резултати отчитаме успешен старт на Програмата и очакваме предвиденото държавно финансиране за дейностите по втория етап.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.

Литература

- Кацаров, М., Вацева, Р., Тотева, А., Динков, Д., Пенева, А. 2025. Концепция за разработване на Web-базирана система за критични и стратегически суровини в България. Сб. Доклади Шеста национална научно-техническа конференция “Минералните ресурси и устойчивото развитие”, НТС, София, 20 ноември 2025 г. ISSN:2534-9295, 16–21.
- Angelova, V., Ihtjarova, M. 2025. Evaluation of phytoremediation potential of plants from Asteraceae family. *60th Croatian and 20th International Symposium on Agriculture, 1–6 June 2025, Bol – Brač Island, Croatia*, *Proceedings*, pp. 247–251.
- Antonov, D., Toleva, Tz., Burdin, B, Georgiev, SV, Grötsch, J. 2025. First data on elevated natural hydrogen occurrence at a site in SE Sofia, Bulgaria. *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 86, 3, 76–79, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.76>.
- Georgiev, S., Kurylo, S., Lazarova, A., Broska, I., Balkanska, E., Vladinova, Tz., Vassileva, R. 2025. Late Variscan magmatism with evolving I to S-type affinity in the Central Sredna Gora Zone, Bulgaria: Time constraints and petrology. *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 86, 2, 132–137, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.2.132>.
- Ivanov, B., Georgieva, Y., Zhivkov, N., Márton, I., Metodiev, S., Georgiev N. 2025. Architecture of the epithermal vein system in the Krumovgrad ore field and its relationship to the structure of the NE-flank of the Kesibir-Kardamos dome: insights from structural analyses and 3D modelling. *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 86, 2, 226–230, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.2.226>.
- Marinovska, E., Pehlivanova, R., Botoucharov, N., and Georgiev, S. Reassessment of the Hydrocarbon Reserves of Exhausted and Perspective Areas in Bulgaria by Applying Contemporary Methods for Future Sustainable Exploration. 2025. *Inzynieria Mineralna, Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 8 p., <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-03-01>.



- Nikolov, A., Kostov V, Petrova N, Tsvetanova L, Vassilev SV, Titorenkova R. Sunflower Shells Biomass Fly Ash as Alternative Alkali Activator for One-Part Cement Based on Ladle Slag. 2025. *Ceramics*, 8 (3):79. <https://doi.org/10.3390/ceramics8030079>.
- Panayotova, M., Dimitrov, I., and Sofronieva, A. Initial Characterization of Titanium and Vanadium-Rich Magnetite from the Manastir Heights in Southeast Bulgaria Aiming at Future Environmentally Friendly Beneficiation. 2025a. *Minerals*, 5, 9, 964, <https://doi.org/10.3390/min15090964>.
- Panayotova, M., Pysmennyi, S., and Panayotov, V. “Antimony Recovery from Industrial Residues – Emphasis on Leaching: A Review”. 2025b. *Separations*, 12, 6, 156. <https://doi.org/10.3390/separations12060156>.
- Panova, S., Georgiev, S.V., Botoucharov, N. 2025. Geochemical characterization and assessment of organic matter of selected Lower–Middle Jurassic sedimentary rocks from the Ozirovo and Etropole Formations, Central Northern Bulgaria. *Rev. Bul. Geol. Soc.*, 86, 3, 132–140, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.132>.
- Stoykova, M., Atanassova, I. 2025. Origin of critical raw materials in technogenically disturbed soils from the territory of a steel metallurgical plant in Southeastern Europe. *Bulgarian Journal of Soil Science Agrochemistry and Ecology*, 59 (4), 3–15. <https://doi.org/10.61308/JZUT1154>.
- Stavrev, M., Vassileva, R.D., Georgieva, S., Chavdarova, S., Peytcheva, I. 2025. Geochemical and mineralogical insights into early Eocene greisen-like hydrothermal zones and pegmatites from the Babyak–Vishteritsa area: differentiation via white mica composition. *Review of the Bulgarian Geology Society*, 86, 2, 138–144.
- Toteva, A., Vatsева, R., Katsarov, M., Dinkov, D., Peneva, A., Ivanov, Y. 2025. Designing and structuring of a database for critical and strategic raw materials in Bulgaria. *Rev. Bulg. Geol. Soc.*, 86, 3, 95–98, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.95>.
- Vassilev, S., Vassileva, C., Velyanova, G., Georgieva, M., 2025. Preliminary evaluation on the occurrence of critical elements in Bulgarian coal fly ashes and their potential industrial significance. *Geologica Balcanica*, 54, 3, 25–49, <https://doi.org/10.52321/GeolBalc.54.3.29>.
- Vassileva, R.D, Georgieva, S., Milenkov, G., Georgieva, Y., Skoda, R., Cempírek, J., Yovchev, D. 2025. Magnesian skarns from the Djurkovo Pb-Zn deposit: mineral composition and retrograde alteration. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 78, 11, 1655–1668.



КРИТИЧНИ СУРОВИНИ И ЕНЕРГИЯ ЗА „ЗЕЛЕН“ ПРЕХОД – КОНВЕНЦИОНАЛНИ РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛТАТИ В НАЦИОНАЛНАТА НАУЧНА ПРОГРАМА РП I.3.1.

Н. Ботушаров
СУ „Св. Кл. Охридски“, ГГФ, botnd@gea.uni-sofia.bg

CRITICAL RAW MATERIALS AND ENERGY FOR "GREEN" TRANSITION - CONVENTIONAL SOLUTIONS AND RESULTS IN THE NATIONAL SCIENTIFIC PROGRAM WP I.3.1.

N. Botoucharov
Sofia University "St. Kl. Ohridski", GGF, botnd@gea.uni-sofia.bg

ABSTRACT

Critical raw materials are economically and strategically important for Bulgaria and the countries of the European Union, but energy for a green transition requires significant amounts of fossil hydrocarbons.

One of the main goals of the work is to outline the relevance of the problem and the energy and environmental challenges in the next few decades.

The exploration and future exploitation of hydrocarbon deposits in Bulgaria involves modern analysis of these resources and the creation of models for their effective utilization. During the first year of work under WP I.3.1, a review of the available archives, literature and previous scientific research was carried out to create a geological, geophysical and geochemical database, as well as initial analyses and studies.

Въведение

Критичните суровини са икономически и стратегически важни за страните в Европейския съюз (ЕС), но наличните на континента доказани запаси са недостатъчни за съвременното търсене, а вносът се характеризира с висок риск на доставките [7]. Приложението им в електрониката, производството на стомана, автомобилната и военната индустрия, авиацията и още много други промишлени области ги прави незаменими в съвременните общества. Основен производител за повече от половината от критичните елементи е Китай, а другите страни доставчици също са извън Европа. Войните, конфликтите и икономическите кризи особено последните 4 години оказаха силно негативно влияние върху европейската и световната икономика. Това наложи преосмислянето на икономическите, научните и стратегическите приоритети на ЕС. Първоначално определените от Европейския съюз като „критични“ седемнадесет елемента станаха 34, като поне половината от тях са стратегически.

Търсенето, проучването, добива, преработката и рециклирането на критичните и стратегически суровини, обаче, изисква огромно количество енергия. Следователно, зеленият преход и устойчивото обществено-икономическо развитие в България е тясно свързан с използването на потенциала на страната ни за добив на стратегически елементи и ефективно използване на наличните ни енергийни източници. Развитието на технологиите показва, че дори считани за екологично замърсяващи източници на енергия като изкопаемите горива за момента са незаменими и могат да бъдат оползотворени по нов и нискоемисионен начин. Доброто им познаване и прилагането на доказано ефективни и екологични съвременни технологии ще позволят да използваме енергийните ресурси, с които разполагаме, и това ще намали зависимостта ни от внос на такива от чужбина. В тази връзка РП I.3.1. „Преценка на потенциала на конвенционални въглеводородни системи и разработване на методика за оптимизация на добива в газонепфени и газокондензатни находища в България“ от Националната Научна Програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ предлага свои решения в тази посока. Нещо повече бъдещата енергийна стратегия на България трябва да вземе под внимание българският потенциал от изкопаеми горива, което ще даде възможност да се преосмисли идеята за зелен преход в следващите десетилетия.



Търсенето, проучването и бъдещата експлоатация на въглеродородните находища в България минава през съвременен анализ на тези ресурси и създаване на модели за тяхното ефективно оползотворяване. Изучаването и характеристиката на конвенционалните ресурси от нефт и природен газ са важни не само за определяне на техния произход, анализ на взаимосвързаните процеси на генерация-миграция-акумулация, но и за екологичния и безопасен добив [1].

Критични суровини, обществени предизвикателства, енергийни и екологични аспекти на конвенционалните въглеродородни ресурси

Организацията на обединените нации (ООН) декларира целенасочен курс за елиминиране на въглеродните емисии до 2050 г., което изисква използването на алтернативна “зелена” енергия, различна от изгаряне на изкопаеми горива. Екологично чистите енергийни технологии, обаче, също се нуждаят от множества минерали и метали [7]. Те изискват голямо количество невъзобновяеми суровини произхождащи от първични геоложки източници (рудни и нерудни) или вторична доставка (повторна употреба или рециклиране). Амбицията на ЕС да се достигне до напълно кръгова икономика, в която търсенето на суровини може да бъде задоволено чрез повторна употреба и рециклиране, е все още далеко. Все още не са намерени и заместители на критични елементи като алуминий, кобалт, литий и др., а рециклирането им за нова употреба не достига до необходимите нива на търсенето им.

Обществените предизвикателства в ЕС и България са много, като по-важните от тях са свързани със сигурността на доставките на критични суровини; изсяняване на реалния ни потенциала на критични суровини; ефективно и екологично добиване и използване на суровините; осигуряване на нужната енергия; ресурсна ефективност и действия за устойчиво социално-икономическо развитие.

Изкопаемите горива са един от замърсители на околната среда с голям нетен принос към повишаване количеството на парникови газове. Тяхното изгаряне за индустриални цели, производство на електрическа и топлинна енергия, е свързано с отделянето на значителни количества въглероден диоксид, серни и азотни съединения, отпадъци и фини прахови частици. Основно отговорни за тези замърсявания са страните нуждаеща се от значителен енергиен ресурс с най-развити икономики или изключително бързо развиваща се промишленост в Северна Америка (САЩ) и Азия (Китай и Индия). Усилията са насочени на първо място в замяна на въглищата и нефта с природен газ, който макар и да представлява невъзобновяем ресурс, се характеризира със значително по-нисък въглероден отпечатък. За част от страните в ЕС, включително и България, където енергията получена за сметка изгарянето на въглища възлиза на между 20% през лятото и често над 45 % през зимните месеци; от енергийния микс, тази промяна вероятно ще доведе до значителни проблеми в снабдяването с енергия [11]. Войната в Украйна, военните конфликти в Близкия изток и Иран, както и преустановяването на доставките на природен газ от Русия, демонстрираха не само силната зависимост на Европа от трети страни, но и рисковете от използването на природния газ като единствено гориво за осъществяване на зеления преход.

Втората насока за редуциране на парниковите емисии е свързана с инсталирането на допълнителни мощности за добив на възобновяема енергия. В това отношение страната ни е свидетел на истински бум, който обаче се оказва икономически неизгоден за нашите стандарти, като инсталираните предимно фотоволтаични мощности не могат да се ползват целогодишно, поради намалено слънце греене през есента и зимата. Предвид рязко спадналите борсови цени на електроенергията добита от ВЕИ от 2021 г. до сега, много е вероятно голяма част от тези предвидени в бъдеще „зелени“ инвестиции да не се осъществят. В този смисъл, ако намеренията за съществено ограничаване на дялът на енергията получена от изкопаеми горива след 2025 г. се осъществят [Националния енергиен и климатичен план за периода 2021-2030], то може да се очаква сериозен недостиг на електроенергия точно в зимните месеци, което естествено ще окаже значителен влияние върху енергийната сигурност на страната.

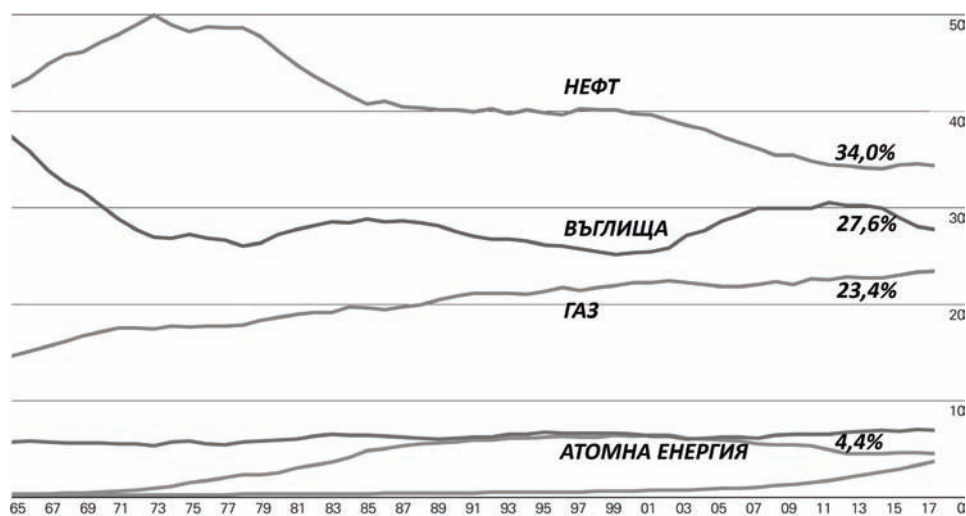
Третата насока е екологичната безопасност свързана с разграждане на нефтопродукти в замърсени почви и рекултивация на околната среда след подземен добив на полезни изкопаеми, които заемат също важна част от съвременните подходи срещу замърсяването [2].



Следователно, като член на ЕС за България е изключително важно да направи преоценка на потенциала на страната не само за критични суровини, но и за собствените си енергийни източници. В Световен мащаб замяната на конвенционалните въглеродородни ресурси с нискоемисионни източници няма да стане скоро и използването на въглища, нефт и природен газ остава от първостепенно значение. Детайлният анализ и преоценка на конвенционалните въглеродороди трябва да вземе под внимание съвременното ниво на технологиите и нуждите на обществото от енергийна независимост.

Актуалност на проблема и текущи научно-приложни резултати в РП I.3.1. от ННП КСС

Изкопаемите горива, в това число нефт, газокондензат и природен газ, ще останат доминиращи източници в производство на енергия и замяната им с други видове екологична „зелена“ енергия е сериозно предизвикателство не само у нас, но и в световен мащаб (Фиг. 1).



Фиг. 1. Дялове на първостепенните енергийни ресурси в Световния микс (%), BP Statistical Review of World Energy [12].

Разрешаването на това предизвикателство през следващите поне 2 десетилетия ги прави изключително актуални и ще изисква актуализация на геоложката информация и много добро познаване на ресурсите от течни и газообразни ископаеми горива в България. Актуалността на отделните задачи се засили още повече с оглед на геополитическата обстановка в Света и динамичните промени в енергийния сектор през последната година. В тази връзка оптимизацията на добивите от работещи или дори „изтощени“ находища ще гарантират устойчивото развитие на енергийния сектор в близко бъдеще.

Целите на енергийния работен пакет в Националната Научна Програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ се простират от използването на научни методите за изучаване на ископаеми горива, характеризирани на критериите за нефтогазоносност и главните геоложки фактори, през анализ на процесите и механизмите на действащите петролни системи в България до съставянето на ефективни модели за ре-експлоатация на считани за изчерпани находища.

Преките и косвени признаци за присъствие на въглеродороди, съвременните технологии и съпътстващите геоложки, геофизични и геохимични изследвания са важна основа, върху която ще се изгражда работата в пакета. Последователно ще се разгръщат и решават поставените научно-приложни задачи за очертаването на нефтогазоносно перспективни площи и бъдещи препоръки за търсецо-проучвателните дейности за нефт и газ.

Обзорът на сондажната информация за търсене на нефт и газ в Северна България, както и първоначалните изследвания са изключително важни, защото освен възможността за запознаване със скалите дават възможност да се интерпретират проведените геофизични изследвания за съставяне на



карти, диаграми и профили с висока степен на достоверност [8]. Съвременният поглед върху сеизмичните материали и сеизмостратиграфските интерпретации ще позволяват детайлно изучаване на геоложките разрези, тектонските структури, веществения състав и физическите свойства на скалите за оценка на перспективността на отделни райони на изследване в Северна България.

През първата година от работата по РП I.3.1 се осъществи обзор на геофондовите материали, научната литература и предходни научни изследвания за създаване на геоложка, сондажно-геофизична и геохимична база данни, както и първоначални анализи и изследвания.

Основните задачи при събирането на значителен обем първична информация през първата година на проекта бяха:

- Запознаване с геофондовите доклади и актуалното състояние на търсещо-проучвателния процес за нефт и газ в България;
- Преглед на научната и научно-приложната изученост и постигнатото до момента;
- Изучаване на ключови геоложки профили, типови разрези, перспективни локации и конкретни обекти за специализирани геоложки, петро-физични и геохимични и др. аналитични изследвания;
- Набелязване на целесъобразни научно-изследователски методи и подходи в следващите етапи на работа;
- Планиране на първоначални изследвания и първични анализи на събраната комплексна информация през втората година от работата по програмата.

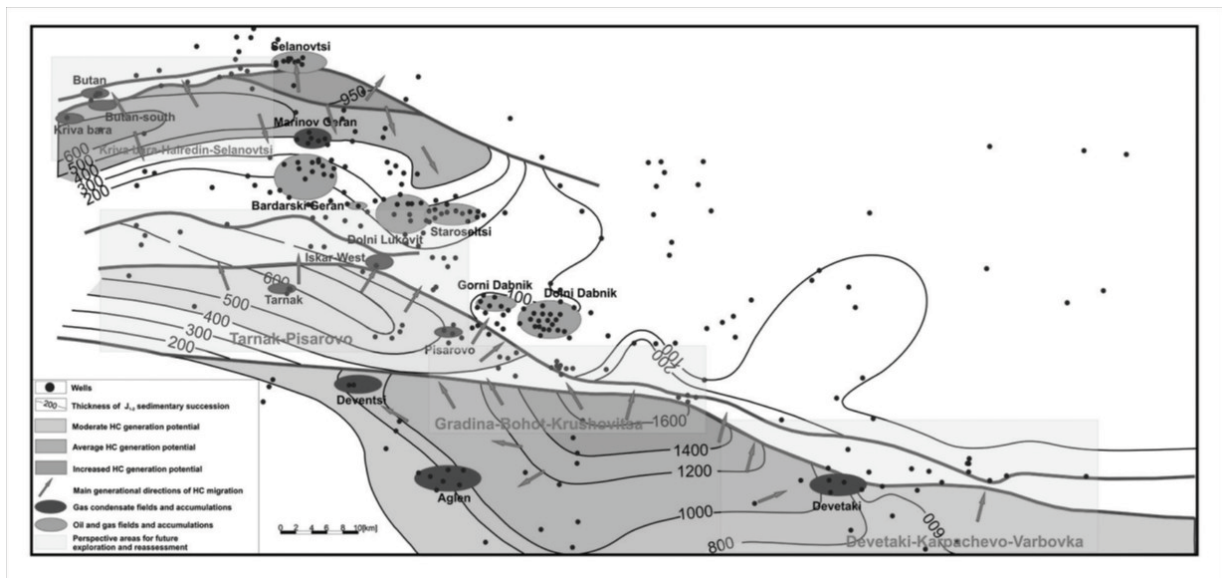
Постигането на поставените цели за първия етап от проекта беше основен акцент в работата и най-важната предпоставка за успешно преминаване към следващия етап от ННП, през който да започнат конкретни анализи и оценки за получаване на първите научно-изследователски резултати. Всички количествени показатели бяха постигнати, а индикаторите за изпълнението на програмата, популяризираните и публикуваните материали за първата година от работата на колектива са реализирани. В тази връзка постигнатите първоначални резултати и извършените дейности по РП I.3 ни дадоха необходимата увереност и потвърдиха важноста на всички задачи.

Осъществихме първоначални геохимични анализи на ядрови образци от долно-средноюрски скали в няколко ключови сондажна от изследвания район [10]. Измерването на основните елементи, заедно с определянето на общото съдържание на въглерод, водород, азот и сяра, и данните от Rock-Eval пиролизата, позволяват цялостен геохимична интерпретация – не само на химичния състав, но и предварителна оценка на въгледородния генерационен потенциал на изследваните седименти от Озировска и Етрополска свити.

Букоровският член на Озировска свита съдържа повече карбонатни компоненти, докато Стефанецкият член на Етрополска свита е обогатен на глина. Другите основни елементи показват сходни концентрации и в двете формации. Разликите между двата члена са ясно изразени, обаче, по отношение на общият въглерод и сяра, които са с по-високи концентрации в Букоровския член (Озировска свита), докато азотът и водородът са обратно с по-високи стойности в Стефанецкия член (Етрополска свита).

Цялостната оценка на органичното вещество включва анализ на най-важните показатели за количество, качество и термична зрялост на органичната материя, като демонстрират среден до добър потенциал за генерация на въгледороди, потвърждаващи предходни изследвания [3, 4, 5, 6]. Всички проби могат да бъдат класифицирани като кероген тип III и дори тип IV при висока степен на зрялост в рамките на „нефтения прозорец“.

Откритите до момента находища и въгледородните прояви в сондажните разрези са важен индикатор за нефтогазоносността на изучаваната територия. Съставянето на поредица от карти на въгледородните акумулации с различен ранг демонстрират основно местоположението, типът и мащабът им, но и позволяват да ги свържем с генерационното огнище чрез вероятните пътища на миграция (Фиг. 2).



Фиг. 2. Перспективни райони за търсещо-проучвателни дейности в Северна България, свързани със зоните на потенциална генерация от J_{1-2} седименти и насочената миграция на въглеводородите към акумулации с различен ранг. Характеристиката на нефтените, газовите и газо-кондензатните залежи, както и на въглеводородния потенциал се базира на геолого-геофизична, геохимична и сондажна информация и обзор на предходни изследвания [3, 4, 5, 9].

Заключение

Търсенето, проучването, добива, преработката и рециклирането на критичните и стратегически суровини изисква огромно количество енергия, която ще дойде до голяма степен от ефективното използване на наличните конвенционални въглеводородни източници. Развитието на технологиите показва, че дори считани за екологично замърсяващи източници на енергия като изкопаемите горива за момента са незаменими и могат да бъдат оползотворени по нов и нискоемисионен начин.

Конвенционалните решения ще бъдат все още актуални през следващите няколко десетилетия и изискват актуализация на геоложката информация и много добро познаване на ресурсите от течни и газообразни въглеводороди в България.

През първата година от работата по РП I.3.1 бяха прегледани гефондовите доклади и оценено актуалното състояние на търсещо-проучвателния процес за нефт и газ в България с оглед създаването на съвременна научно-изследователска стратегия. Набелязани бяха ключови геоложки профили, типови разрези, перспективни локации и конкретни обекти за специализирани геоложки, петро-физични и геохимични изследвания за изясняване на нефтогазоносната перспективност в следващите етапи на работа.

Първоначалните геохимични анализи на ядрови образци от долно-средноюрски скали в няколко ключови сондажна от изследвания район потвърдиха резултатите от предишни изследвания на органичното вещество. Провеждането на нови елементни и химически изследвания ще позволи да се разшири обхвата на задачите в работния пакет, като се съпоставят интересните в нефтогазоносно отношение свити и членове. Ясно се очертават перспективните за изследване райони в Северна България, които са свързани както със зоните на потенциална генерация на въглеводороди, така и с тези на възможна акумулация по пътя на насочената миграция.

Благодарности: Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.



Библиография

- [1] Ботушаров, Н. 2022. Картите в нефтената геология – ретроспекция и перспективи в България. - В: *Сборник с доклади, Национална научно-техническа конференция „Геоложкото картиране в България“, НТС по минно дело, геология и металургия, 14 септември 2022, София, България, ISBN 978-619-90939-8-6, 85-93.*
- [2] Драганов, Л., П. Павлов. 2000. Ефикасен метод за фиксиране и разграждане на нефтопродукти в замърсени почви и възможности за тяхното използване. - *Минно дело и геология, 9, 14-18.*
- [3] Botoucharov, N., Stefanova, M., Marinov, S., Borisova, B. 2015. Rock Eval Data of the Stefanets Member (Etropole Formation) from the Central South Moesian Platform Margin, Bulgaria. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Tome 68, 12, Geologie, ISSN 1310-1331, 1553-1558.*
- [4] Botoucharov, N., Stefanova, M., Marinov, S., Borisova, B. 2016. Biomarker Assemblage of the Stefanets Member (Etropole Formation) from the Central South Moesian Platform Margin, Bulgaria. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Tome 69, 1, Geologie, ISSN 1310-1331, 57-66.*
- [5] Botoucharov, N., Stefanova, M. and Marinov, St. 2020. Geochemical appraisal of Stefanets Member (Etropole Formation) from the eastern part of the West Forebalkan, Bulgaria. *Bulgarian Chemical Communications, Volume 52, Issue 1, DOI: 10.34049/bcc.52.1.5031, 62-67.*
- [6] Botoucharov, N., Zdravkov, A, Groß, D., Kostova, I., Bechtel, A. 2022. Hydrocarbon potential of Middle Jurassic sediments (Stefanets Mb. of Etropole Fm.) from the Western part of Balkan orogenic system, Bulgaria. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Tome 75, 9, Geologie, DOI: 10.7546/CRABS.2022.09.09, 1317-1324.*
- [7] Georgiev, S. 2024. Critical and strategic raw materials in Bulgaria: an outline of the new National Scientific Program. *Review of the Bulgarian Geological Society, 85, 3, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.3.80>, ISSN 0007-3938, 15–18.*
- [8] Marinovska, E., Pehlivanova, R., Botoucharov, N., Georgiev, S. 2025. Reassessment of the Hydrocarbon Reserves of Exhausted and Perspective Areas in Bulgaria by Applying Contemporary Methods for Future Sustainable Exploration. *Inzynieria Mineralna, Journal of the Polish Mineral Engineering Society, <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-03-01>, 8 p.*
- [9] Marinovska, E., Pehlivanova, R., Botoucharov, N., Panova, S., Georgiev, S., Dimitrov, H., Bidzhova, L. 2025. Reevaluating Northern Bulgaria's potential for conventional hydrocarbons: a first-year synthesis under the National Scientific Program for Critical Raw Materials. *Review of the Bulgarian Geological Society, 86, 3, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.80>, ISSN 0007-3938, 80–87.*
- [10] Panova, S., Georgiev, S., Botoucharov, N. 2025. Geochemical characterization and assessment of organic matter of selected Lower–Middle Jurassic sedimentary rocks from the Ozirovo and Etropole Formations, Central Northern Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society, 86, 3, <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.132>, ISSN 0007-3938, 132–140.*
- [11] <https://euracoal.eu/info/coal-industry-across-europe/>.
- [12] <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>.



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ДАННИ И ФУНКЦИОНАЛНОСТИ НА УЕБ-БАЗИРАНА ИНФОРМАЦИОННА СИСТЕМА ЗА КРИТИЧНИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ СУРОВИНИ

Румяна Вацева¹, Дейвис Динков², Аглаида Тотева¹, Антоанета Пенева¹, Милослав Кацаров¹
¹Геологически институт, Българска академия на науките, София 1113,
e-mail: rvatseva@geology.bas.bg, atoteva@geology.bas.bg, apeneva@geology.bas.bg,
mkatsarov@geology.bas.bg

²Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките,
София 1113, e-mail: davis.dinkov@geophys.bas.bg

DATA VISUALIZATION AND FUNCTIONALITIES OF A WEB-BASED INFORMATION SYSTEM FOR CRITICAL AND STRATEGIC RAW MATERIALS

Rumiana Vatseva¹, Davis Dinkov², Aglaida Toteva¹, Antoaneta Peneva¹, Miloslav Katsarov¹
¹Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria,
e-mail: rvatseva@geology.bas.bg, atoteva@geology.bas.bg, apeneva@geology.bas.bg,
mkatsarov@geology.bas.bg

²National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia
1113, Bulgaria, e-mail: davis.dinkov@geophys.bas.bg

ABSTRACT

Critical and strategic raw materials are essential for modern industries, clean energy technologies, digital transformation, and economic security. In connection with the work on the National Scientific Program "Critical and Strategic Raw Materials for Green Transition and Sustainable Development", this study presents discussion questions regarding the design of the web-based information system being built, which integrates heterogeneous data sets for critical and strategic raw materials, and transforms them into accessible, interactive tools for visualization and analysis. Core functionalities include interactive data management, work with individual objects, change in display scale, visualization of base and thematic maps (digital models), data analysis, personalized filtering, etc. Visualization techniques such as geospatial mapping, scenario-based diagrams and graphs are used. The platform architecture emphasizes scalability, interoperability and usability through responsive web technologies, modular databases and data integration. Particular attention is given to user roles, data quality assurance and secure access management. The proposed web-based information system supports researchers, policymakers, industry stakeholders, and other users.

Keywords: *Critical Raw Materials, Web-Based Information System, Data Visualization, Functionalities*

1. Увод

Критичните и стратегическите суровини (КСС) са сред основните фактори за развитието на съвременната икономика, високотехнологичните индустрии, цифровата трансформация и прехода към нисковъглеродна и устойчива енергия [1,2]. Ресурси като литий, кобалт, графит, редкоземни елементи и никел имат ключово значение за производството на батерии, електрически превозни средства, възобновяеми енергийни системи, електроника и отбранителни технологии [3,4]. Увеличаващото се глобално потребление на тези суровини, съчетано с ограниченото географско разпределение на находищата и зависимостта от външни доставчици, поражда значителни предизвикателства, свързани с устойчивостта на веригите за доставки, ресурсната сигурност и икономическата стабилност [5].

В този контекст нараства необходимостта от разработване на съвременни информационни системи, които да осигуряват надежден достъп до актуална информация, възможности за анализ и



средства за визуално представяне на данни, свързани с КСС [6]. Особено значение имат уеб-базираните платформи, които позволяват интегриране на разнородни източници на данни, централизирано управление на информацията и интерактивен достъп за широк кръг потребители [7]. Чрез използването на съвременни уеб технологии и средства за визуализация подобни системи могат значително да подпомогнат процесите за анализ, мониторинг и вземане на решения [8].

Настоящото изследване е свързано с дейностите по Националната научна програма „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“ и разглежда концептуални и приложни аспекти при разработването на уеб-базирана информационна система за критични и стратегически суровини [9,10]. Основната цел е да бъдат обсъдени функционалностите и подходите за визуализация на данни, които позволяват ефективно представяне и анализ на пространствени, статистически и тематични данни.

Разработваната система интегрира хетерогенни набори от данни и ги трансформира в достъпни и интерактивни инструменти за визуализация и анализ. Основните функционалности включват интерактивно управление на данни, работа с индивидуални обекти, промяна на мащаба на визуализацията, представяне на базови и тематични карти (цифрови модели), филтриране на информация и анализ на данни. За визуализацията се използват различни подходи, включително геопространствени карти, тематични слоеве, диаграми, графики и сценарийно-базирани модели, които подпомагат интерпретацията на сложни зависимости и тенденции.

Архитектурата на платформата е проектирана с акцент върху мащабируемостта, оперативната съвместимост и удобството при използване чрез прилагане на адаптивни уеб технологии, модулни бази данни и механизми за интеграция на данни. Специално внимание е отделено на управлението на потребителските роли, осигуряването на качество на данните и сигурния достъп до информацията. Разработваната информационна система има потенциал да подпомага научни изследвания, разработването на политики, индустриалния анализ и процесите по стратегическо планиране, свързани с критичните и стратегически суровини.

2. Концептуален модел на уеб-базирана информационна система за критични и стратегически суровини

Разработването на уеб-базирана информационна система за КСС изисква създаването на интегрирана концептуална рамка, която да осигурява ефективно управление, обработка и визуализация на разнообразни по структура и произход данни. Системата е ориентирана към поддръжка на научни изследвания, анализ на ресурси, пространствени изследвания и подпомагане на процесите по вземане на решения.

Концептуалният модел на платформата включва няколко взаимосвързани основни компонента:

- Модул за събиране и интеграция на данни – осигурява извличане на данни от разнородни източници като геоложки бази, статистически източници, сателитни наблюдения, теренни изследвания и др. Използват се ETL процеси (Extract–Transform–Load), които позволяват стандартизация и хармонизация на данните [11].
- Модул за съхранение и управление на данни – изграден върху реляционни и пространствени бази данни (напр. PostgreSQL/PostGIS). Осигурява структурирано съхранение на пространствени и атрибутивни данни, както и поддръжка на версии и метаданни [12].
- Аналитичен модул – включва инструменти за статистически анализ, пространствен анализ, моделиране на зависимости и сценарийни симулации. Този модул е критично важен за оценка на ресурсната наличност, риска във веригите на доставки и прогнозиране на тенденции [13].
- Модул за визуализация – осигурява представянето на данните чрез интерактивни карти, графики, диаграми и тематични слоеве. Подходът се базира на принципите на визуалния анализ, при които човешкото възприятие се използва като аналитичен инструмент [14].
- Потребителски интерфейс и система за управление на достъпа – осигурява уеб-базирано взаимодействие (интеракция) със системата чрез адаптивен интерфейс, като поддържа различни



роли на потребители (научни изследователи, администратори, политици, индустриални потребители). Реализира се контрол на достъпа чрез автентикация и авторизация [15].

Съществен елемент на концептуалния модел е интеграцията на геопространствени данни с тематични (атрибутивни) данни. Това позволява създаването на многослойни цифрови модели, съдържащи информация от различни източници – геоложки бази данни, статистически регистри, пространствени данни, резултати от теренни изследвания, научни публикации и външни информационни системи. Хетерогенният характер на данните налага използването на стандарти за геопространствени данни (OGC стандарти, ISO 19115 за метаданни), които гарантират съвместимост и повторна използваемост на информацията [16].

Визуалният анализ е интегрална част от концептуалния модел и представлява комбинация от автоматизирани аналитични методи и интерактивна визуализация [17]. Позволява разработване на тематични цифрови карти и пространствени анализи, свързани с КСС, откриване на модели и тенденции чрез визуални средства. Включва анализ на времеви серии, пространствен анализ на ресурсите, разработване на модели, сравнителен анализ и т.н.

3. Функционалности и архитектура на информационната система

Основните функционалности на разработваната уеб-базирана система са насочени към осигуряване на интерактивен достъп до информация, ефективно управление на данни и визуален анализ на пространствени и статистически зависимости.

3.1. Управление на данни

Системата предоставя възможности за въвеждане, редактиране, актуализиране и организиране на данни от различни източници. Реализирани са механизми за контрол на качеството и валидиране на информацията с цел гарантиране на надеждност и актуалност на данните.

Поддържа се работа както със структурирани, така и с пространствени данни, включително:

- геоложки и минераложки данни;
- информация за находища;
- статистически показатели;
- производствени и икономически данни;
- картографска информация.

3.2. Интерактивна визуализация

Визуализацията е един от ключовите компоненти на системата. Потребителите могат да работят с различни типове визуално представяне в зависимост от характера на данните и аналитичните задачи.

Използваните средства за визуализация включват:

- базови и тематични карти;
- интерактивни слоеве;
- графики и диаграми;
- сценарийно-базирани модели;
- времеви графики и сравнителни анализи.

Системата позволява промяна на мащаба, филтриране на данни, избор на тематични слоеве и работа с индивидуални обекти. Чрез тези функционалности се подобрява възприемането на сложни пространствени и статистически зависимости.

3.3. Аналитични функционалности

Информационната система предоставя инструменти за анализ на данни и генериране на справки. Аналитичните функционалности подпомагат:

- оценка на ресурсния потенциал;



- анализ на пространственото разпределение на суровините;
- идентифициране на рискови зони;
- проследяване на тенденции;
- сравнение на различни показатели и сценарии.

Интеграцията на аналитични инструменти с визуалните компоненти позволява по-ефективна интерпретация на резултатите и подпомага процесите по стратегическо планиране и научен анализ.

3.4. Архитектура и технологии

Архитектурата на системата е изградена на модулен принцип с цел осигуряване на мащабируемост, гъвкавост и възможност за бъдещо разширяване. Платформата използва уеб-базираните технологии, които осигуряват достъпност през различни устройства и операционни среди.

Основните технологични компоненти включват:

- клиентска уеб среда за визуализация и взаимодействие;
- сървърна логика за обработка на заявки и анализ на данни;
- релационни и пространствени бази данни;
- интерфейси за обмен и интеграция на данни;
- механизми за сигурност и управление на достъпа.

Използването на модулна архитектура позволява добавяне на нови функционалности, интеграция с външни системи и адаптиране към различни типове потребителски изисквания.

Особено внимание е отделено на сигурността на информацията чрез реализиране на механизми за удостоверяване на потребители, контрол на достъпа и защита на данните. Управлението на потребителските роли позволява диференциран достъп до различни функционалности и нива на информация.

4. Дискусия

Разработването на уеб-базирана информационна система за КСС поставя редица съществени научни, технологични и организационни въпроси, свързани както с управлението на данни, така и с тяхната интерпретация и използване в процесите на вземане на решения. В контекста на съвременните изисквания за устойчиво управление на ресурсите и дигитална трансформация, подобни системи се разглеждат като ключов инструмент за интегриране на разпределени информационни източници и тяхното превръщане в аналитично приложима информация.

Един от основните проблеми, който се дискутира при изграждането на системата, е хетерогенността на данните. Информацията за критичните суровини произхожда от множество източници – геоложки бази данни, индустриални регистри, статистически източници и научни изследвания – като всеки източник използва различни формати, стандарти и нива на детайлност. Това налага необходимостта от разработване на надеждни механизми за интеграция, трансформация и стандартизация на данните (ETL процеси), както и прилагане на единни модели за описание и метаданни.

Друг съществен аспект е свързан с качеството на данните. При анализа на КСС често се работи с непълни, несъвместими или времево неактуални данни. Това може да доведе до изкривявания в анализа и погрешни изводи. Поради това е необходимо въвеждане на механизми за валидиране, оценка на достоверността и проследимост на данните, както и ясно дефинирани правила за тяхната актуализация и управление.

Особено внимание заслужава и въпросът за интероперабилността между различни системи и платформи. В условията на нарастваща дигитализация, информационните системи трябва да бъдат способни да обменят данни чрез стандартизирани протоколи и формати (например OGC стандарти за геопространствени данни). Това позволява интеграция с външни геоинформационни системи, статистически платформи и научни инфраструктури, което значително увеличава приложимостта на системата.



Важен дискуссионен аспект е ролята на визуализацията на данни като средство за аналитично мислене. Съвременните изследвания показват, че визуалните представяния не са само инструмент за презентация, а активен компонент в процеса на анализ на данни. Чрез използване на интерактивни карти, диаграми и сценарийни модели, потребителите могат да идентифицират зависимости, аномалии и тенденции, които трудно биха били открити чрез традиционни таблични представяния.

Същевременно възниква въпросът за баланса между сложността на визуалните инструменти и тяхната използваемост. Прекомерно сложните визуализации могат да затруднят интерпретацията, особено за потребители без техническа подготовка. Поради това е необходимо системата да поддържа адаптивен интерфейс, който да се съобразява с различни потребителски профили и нива на експертиза.

Друг ключов проблем е свързан със сигурността и управлението на достъпа до данни. Критичните суровини имат стратегическо значение, което означава, че част от информацията може да бъде чувствителна. Това налага прилагането на многостепенни модели за автентикация, авторизация и логване на действията на потребителите, както и защита на данните както на ниво приложение, така и на ниво база данни.

От гледна точка на приложимостта, системата има потенциал да подпомага широк кръг от потребители – от научни изследователи и анализатори до представители на държавни институции и индустрията. Това включва подпомагане на стратегическо планиране, оценка на ресурсната зависимост, анализ на веригите на доставки и идентифициране на рискови региони. В този смисъл системата функционира като инструмент за подпомагане на политики, свързани със зеления преход и устойчивото развитие.

В допълнение, интегрирането на аналитични и визуални модули създава предпоставки за бъдещо разширение чрез използване на методи на изкуствен интелект и машинно обучение. Това би позволило автоматизирано откриване на модели, прогнозиране на тенденции и по-ефективно управление на риска във веригите за доставка на критични суровини. Може да се добави, че основното предизвикателство при подобни системи не е само техническата реализация, а създаването на балансирана архитектура, която съчетава интеграция на данни, аналитична мощ и интуитивна визуализация, като същевременно гарантира надеждност, сигурност и мащабируемост.

5. Заключение

Настоящото изследване представя концептуален модел на разработването на уеб-базирана информационна система за критични и стратегически суровини, насочена към интеграция, управление и визуализация на хетерогенни данни в подкрепа на научни анализи, стратегическо планиране и процеси на вземане на решения. В контекста на нарастващото значение на критичните суровини за индустриалното развитие, енергийния преход и цифровата трансформация, необходимостта от надеждни, мащабируеми и аналитично ориентирани информационни платформи става все по-ясно изразена.

Основен резултат от разработката е дефинирането на интегриран концептуален модел, който обединява процеси по събиране, съхранение, обработка, анализ и визуализация на данни. Моделът позволява обединяване на различни типове информация – геопространствени, статистически, икономически и тематични данни – в единна цифрова среда, която осигурява последователност, достъпност и аналитична стойност на информацията.

Особено значение има функционалният аспект на системата, който включва интерактивно управление на данни, работа с индивидуални обекти, многослойна визуализация, мащабируемост на картографските представяния и възможности за персонализирано филтриране. Тези функционалности създават условия за по-задълбочен анализ на пространствени и времеви зависимости, свързани с разпределението, добива и потреблението на критични суровини.

Визуализацията на данни е ключов елемент на системата, който значително улеснява интерпретацията на сложни информационни структури. Чрез използване на интерактивни карти,



тематични слоеве, графики, диаграми и сценарийно-базирани модели се подобрява разбирането на зависимостите между различни фактори, като географско разпределение, пазарна динамика и рискови профили.

Архитектурният подход, базиран на модулност, интероперабилност и уеб технологии, осигурява висока гъвкавост и възможност за бъдещо разширяване на системата. Това включва интеграция с външни информационни източници, разширяване на аналитичните възможности и внедряване на интелигентни алгоритми за прогнозен анализ и автоматизирано откриване на зависимости.

От гледна точка на практическата приложимост, разработената система има потенциал да подпомага различни групи потребители – научни изследователи, експерти в публичната администрация, представители на индустрията и политици. Чрез предоставяне на структурирана и визуално достъпна информация тя улеснява оценката на ресурсната сигурност, идентифицирането на рискове във веригите на доставки и формулирането на устойчиви стратегии за управление на критични суровини.

В заключение може да се обобщи, че уеб-базираните информационни системи, интегриращи геопространствени данни и визуален анализ, представляват съвременен и ефективен инструмент за управление на сложни ресурсни системи. Представената концепция демонстрира как комбинирането на данни, аналитични методи и интерактивна визуализация може да допринесе за повишаване на прозрачността, ефективността и качеството на решенията в областта на критичните и стратегически суровини.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г. и финансирана от МОН.

Литература

- [1] European Commission. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Brussels, 2020.
- [2] Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T., Drexhage, J. (2023). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. © World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/40002> License: CC BY-NC 3.0 IGO.
- [3] Elshkaki, A., Graedel, T. E. (2013). Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 59, 260–273. DOI:10.1016/j.jclepro.2013.07.003
- [4] Ali, S., Giurco, D., Arndt, N. et al. (2017). Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature*, 543, 367–372. DOI:10.1038/nature21359
- [5] European Commission. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.
- [6] Kraak, M.-J., Ormeling, F. (2020). Cartography: Visualization of Geospatial Data. CRC Press, 261 p. <https://doi.org/10.1201/9780429464195>
- [7] Peterson, M.P. (2017). Web-Mapping Services. In International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology (eds D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu and R.A. Marston). <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0890>
- [8] Andrienko, N., Andrienko, G. (2013). A visual analytics framework for spatio-temporal analysis and modelling. *Data Min Knowl Disc* 27, 55–83. <https://doi.org/10.1007/s10618-012-0285-7>
- [9] Toteva, A., Vatsева, R., Katsarov, M., Dinkov, D., Peneva, A., Ivanov, Y. (2025). Designing and structuring of a database for critical and strategic raw materials in Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, vol. 86, no. 3, pp. 95–98. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.95>
- [10] Кацаров, М., Вацева, Р., Тотева, А., Динков, Д., Пенева, А. (2025). Концепция за разработване на Web-базирана система за критични и стратегически суровини в България. Сб. Доклади Шеста



- национална научно-техническа конференция “Минералните ресурси и устойчивото развитие”, НТС, София, 20 ноември 2025 г. ISSN:2534-9295, 16-21.
- [11] Golfarelli, M., Rizzi, S. (2009). Data warehouse design: Modern principles and methodologies. McGraw Hill, 480 p.
- [12] Bailis, P., Hellerstein, J. M., Stonebraker, M. (2015). Readings in Database Systems. Fifth Edition, MIT Press, eBook (Fifth Edition, Creative Commons Licensed), 878 p.
- [13] Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Systems and Science. John Wiley & Sons, 496 p.
- [14] Thomas, J. J., Cook, K. A. (2005). Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. IEEE Press, 184 p.
- [15] Shadbolt, N., Berners-Lee, T. and Hall, W. (2006). The Semantic Web Revisited," IEEE Intelligent Systems, vol. 21, no. 3, pp. 96-101, doi: 10.1109/MIS.2006.62.
- [16] ISO 19115 -1:2014: (2014). Geographic Information – Metadata. International Organization for Standardization. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/1d9e3baf-33a7-48ee-82c0-f5cb23322073/iso-19115-1-2014>
- [17] Keim, D., Andrienko, G., Fekete, JD., Görg, C., Kohlhammer, J., Melançon, G. (2008). Visual Analytics: Definition, Process, and Challenges. In: Kerren, A., Stasko, J.T., Fekete, JD., North, C. (eds) Information Visualization. Lecture Notes in Computer Science, vol 4950. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70956-5_7



ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A BIOELECTROCHEMICAL SYSTEM FOR THE TREATMENT OF ORGANIC- AND SULFATE-LADEN WASTEWATER

Anatoliy Angelov, Mariya Georgieva, Petia Genova

Department of Engineering Geocology, University of mining and geology “St. Ivan Rilski”, Sofia 1700, Bulgaria, E-mail: tonyagev@mgu.bg,

ABSTRACT

This study evaluates the performance of a bioelectrochemical system (BES) based on microbial sulfate reduction (MSR) for the treatment of organic- and sulfate-rich wastewater. Three electron donors—lactate, distillery stillage, and vinasse—were investigated in a laboratory-scale microbial fuel cell with an air cathode. The results demonstrate a strong influence of substrate type on system performance. The highest current (up to 3.2 mA), coulombic efficiency (8.6%), and energy efficiency (6.1%) were obtained with distillery stillage, indicating its suitability for simultaneous treatment and energy recovery. Vinasse showed moderate performance, while lactate resulted in lower long-term efficiency. Optimal operation was observed at 60–72 h contact time, after which performance declined due to substrate depletion and sulfide accumulation.

The findings confirm that competition between sulfate reduction and electrogenesis limits energy recovery. Nevertheless, BES shows potential as a sustainable approach for combined wastewater treatment and electricity generation.

Key words: Bioelectrochemical systems, Sulfates, Ethanol stillage, Vinasse, Microbial sulfate reduction, Coulombic efficiency.

АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА БИОЕЛЕКТРОХИМИЧНА СИСТЕМА ПРИ ТРЕТИРАНЕ НА ОРГАНИЧНО И СУЛФАТНО НАТОВАРЕНИ ОТПАДЪЧНИ ВОДИ

Анатолий Ангелов, Мария Георгиева, Петя Генова

Катедра Инженерна геоекология, Минно-Геоложки Университет “Св. Иван Рилски”, София 1700, България, E-mail: tonyagev@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Настоящото изследване оценява ефективността на биоелектрохимична система (БЕС), базирана на микробна сулфатредукция (МСР), при третиране на отпадъчни води с високо съдържание на органични вещества и сулфати. Изследвани са три донори на електрони — лактат, спиртна шлемпа и винаса — в лабораторна микробна горивна клетка с въздушен катод. Резултатите показват силно влияние на вида на субстрата върху работата на системата. Най-високи стойности на тока (до 3.2 mA), кулонова ефективност (8.6%) и енергийна ефективност (6.1%) са получени при използване на спиртна шлемпа, което потвърждава нейната приложимост за едновременно пречистване и оползотворяване на енергия. Винасата показва умерена ефективност, докато лактатът води до по-ниска дългосрочна ефективност. Оптимална работа се наблюдава при контактното време 60–72 часа, след което ефективността намалява вероятно поради изчерпване на субстрата и натрупване на сулфиди.

Получените резултати потвърждават, че конкуренцията между сулфатредукцията и електрогенезата ограничава енергийното оползотворяване. Въпреки това, БЕС показва потенциал като устойчива технология за комбинирано третиране на отпадъчни води и генериране на електрическа енергия.

Ключови думи: биоелектрохимични системи, сулфати, спиртна шлемпа, винаса, микробна сулфатредукция, кулонова ефективност.



Introduction

Bioelectrochemical systems (BES), including microbial fuel cells (MFCs) and microbial electrolysis cells (MECs), represent innovative technologies in which the metabolic activity of microorganisms is utilized for the direct conversion of the chemical energy of organic substrates into electrical energy or valuable products (Logan et al., 2006; Logan, 2008). Of particular interest are configurations with an air cathode, where oxygen reduction occurs directly using atmospheric air, without the need for liquid catholytes and external aeration, resulting in simplified design and reduced operational costs (Zhang et al., 2005).

The typical configuration of a BES includes an anaerobic anodic chamber with an electroactive biofilm, an ion-selective membrane, and an air cathode. The latter is a multilayer electrode composed of a conductive carbon support, a catalytic layer, and a gas diffusion layer, ensuring a stable three-phase boundary necessary for efficient oxygen reduction (Santoro et al., 2017). However, the kinetics of this process at neutral pH remains a limiting factor, which is why both noble and platinum-free catalysts are employed to improve the electrochemical performance and long-term stability of the system (Yuan and He, 2015).

In the anodic zone, an anaerobic microbial consortium develops, capable of oxidizing organic substrates and transferring electrons to the anode. In systems based on microbial sulfate reduction, sulfate-reducing bacteria play a key role, where the electron flow is coupled to the reduction of sulfate to sulfide (Hao et al., 1996; Commault et al., 2015). The generated electrons are transported to the cathode through an external electrical circuit, while cations pass through the membrane, maintaining electroneutrality. In the cathodic zone, oxygen is reduced to water or hydroxide ions, and pH gradients are often formed, which, together with ohmic losses, affect the internal resistance and overall efficiency of the system.

The performance of MFCs is typically evaluated by coulombic efficiency (CE) and the degree of organic matter removal, expressed as chemical oxygen demand (COD). CE characterizes the fraction of electrons recovered as electrical current relative to those theoretically released during substrate degradation, thereby defining the relationship between COD removal and energy yield (Logan et al., 2006; Pant et al., 2010).

Wastewaters from the distillery industry represent a suitable substrate for application in BES due to their high organic load and good biodegradability. At the same time, their complex chemical composition, including the presence of organic acids, phenolic compounds, and sulfates, may limit microbial activity and process stability (Mohana et al., 2009; España-Gamboa et al., 2011). In this context, the role of sulfate-reducing microorganisms gains additional importance, as similar metabolic mechanisms underpin processes used in the treatment of acid mine drainage (AMD). These waters are characterized by low pH and high concentrations of sulfates and dissolved metals, where sulfate reduction to sulfide leads to the precipitation of metals as poorly soluble sulfides and partial neutralization of the medium (Hao et al., 1996). The integration of this process into bioelectrochemical systems creates opportunities for combining bioremediation with the utilization of electron flow in the form of electrical energy. Therefore, investigating the performance of bioelectrochemical systems in the treatment of wastewater with high organic and sulfate loads is essential for assessing their potential as sustainable technologies for simultaneous wastewater treatment and energy valorization.

The main objective of this study is to evaluate the efficiency of a BES based on the microbial sulfate reduction (MSR) process for the treatment of wastewater with high organic and sulfate loads, using three different electron donors—vinasse, distillery stillage, and lactate.

Materials and methods

For the purposes of this study, a bioelectrochemical system (BES) based on the microbial sulfate reduction (MSR) process and an air cathode was developed. The microbial fuel cell (MFC) was fabricated using 3D printing from ABS material in cylindrical vessels, with the anodic chamber having a geometric volume of 0.5 dm³ (Fig. 1b). The anode consists of a graphite rod with a diameter of 8 mm and a length of 100 mm, providing an active surface area of 0.030 m².

A cation exchange membrane (CEM), type CMI 7001 (Membrane International Inc.), with a diameter of 56 mm and an effective area of 0.0028 m², is installed between the anodic and cathodic zones, ensuring selective transport of cations. The cathode is designed as an air cathode, with a porous structure composed of granular activated carbon (2–4 mm) and a layer thickness of 24 mm, providing a well-developed active surface area and favorable conditions for the oxygen reduction reaction. A graphite current collector (Ø 8 mm), with an active length of 40 mm in contact with the carbon, is positioned in the cathodic zone. The cathode housing is also 3D-printed (60 × 24 mm, volume 0.068 dm³), with one side enclosed by a polyethylene mesh.

The schematic diagram of the laboratory setup (Fig. 1a) includes an MFC with an air cathode connected to an anaerobic bioreactor for MSR, where the main biochemical process takes place. The system is designed for simultaneous treatment of sulfate- and organic-loaded wastewater, as well as for the recovery of the generated electrical energy.

The feed solution (1) is supplied via a peristaltic pump (2) to the MSR bioreactor (3), where homogenization and stabilization of the inlet parameters occur. The flow then passes through a buffer vessel (4), equipped with a dosing system (5) for automatic pH adjustment. The liquid phase circulates between the bioreactor and the anodic chamber of the MFC (6), where, under anaerobic conditions, sulfate reduction occurs, accompanied by oxidation of the organic substrate. The generated electrons are transferred to the anode and, through the external electrical circuit (7), reach the cathode. The effluent from the cathodic zone is conveyed via a recirculation pump (8) to an outlet vessel (9).

Three identical installations were constructed to investigate different electron donors (vinasse, distillery stillage, and lactate). Each system includes an anaerobic fixed-bed bioreactor, an MFC, and a buffer vessel. The bioreactor has a volume of 0.5 dm³ (0.3 dm³ liquid phase), with 350 g of natural zeolite (clinoptilolite, 2.5–5.0 mm) used as a biomass carrier, pretreated with a solution (NH₄Cl – 10 g/L, K₂HPO₄ – 5 g/L, MgSO₄·7H₂O – 4 g/L). The buffer vessel has a volume of 0.4 dm³, and the total liquid phase volume in the system is approximately 1.2 dm³.

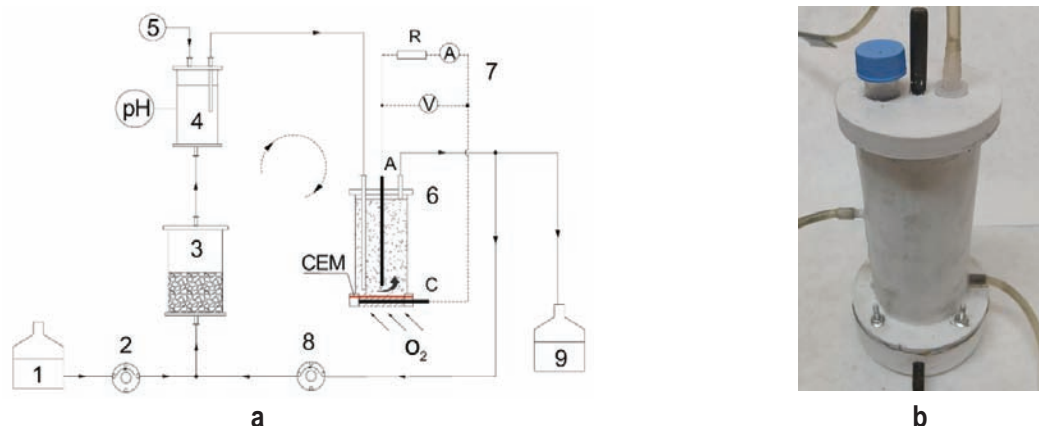


Figure 1. a) Schematic diagram of the laboratory setup based on a BES with an air cathode, used to investigate different organic waste substrates (distillery stillage and vinasse) as electron donors in the microbial sulfate reduction (MSR) process. 1 – feed solution; 2 – dosing pump; 3 – MSR bioreactor; 4 – buffer vessel for pH adjustment; 5 – 1 N NaOH solution; 6 – microbial fuel cell (MFC) with an air cathode and cation exchange membrane (CEM); 7 – external electrical circuit (load) of the MFC; 8 – recirculation pump; 9 – effluent.

b) Photograph of the air-cathode microbial fuel cell used in the experiments.

Inoculation was performed with 50 mL of a mixed culture of sulfate-reducing bacteria. Homogenization was ensured by recirculation at a flow rate of 5 dm³/h. pH and electrical conductivity were measured daily (pH meter WTW 3210; conductivity meter WTW LF 197-S). Sulfate concentration was determined spectrophotometrically (BaCl₂, 420 nm), while the organic load was assessed as chemical oxygen demand



(COD), according to standard methods (APHA, 1989). The initial sulfate concentrations for the three organic substrates (vinasse, distillery stillage, and lactate) were in the range of 3.1–3.2 g/L, while the initial COD values were as follows: vinasse – 30.1 gO₂/L, distillery stillage – 27.2 g O₂/L, and lactate – 6.45 gO₂/L.

Electrical parameters were measured using a Keithley 2110 multimeter, with an external resistance (up to 11 kΩ). Maximum power was determined from polarization curves, and current and power densities were calculated based on the geometric surface area of the electrodes.

In such systems, competition between electrogenesis and biological sulfate reduction for the available electrons is observed, which directly affects the generated current (*I*) and coulombic efficiency (CE).

To determine CE, Equation 1 was used -

$$CE = \frac{M \cdot I \cdot t}{F \cdot b \cdot V \cdot \Delta COD} \times 100 \% \quad (1),$$

where *M* = 32 is the molar mass of O₂; *t* (s) is the hydraulic retention time (HRT); *I* is the average current during the experiment (A); *F* (Faraday constant) is 96,485 C/mol; *b* = 4 is the number of electrons required for the oxidation of 1 mol of O₂; ΔCOD is the difference between the initial and final COD values (g O₂/L); and *V_{an}* is the volume of the anodic chamber.

Accordingly, the voltage efficiency (VE) was determined using Equation 2:

$$VE = \frac{U_{cell}}{E_{teor}} \cdot 100 \quad , \% \quad (2),$$

where *U_{cell}* is the average measured voltage of the MFC during the experiment (V), and *E_{teor}* is the theoretical electromotive force of the cell (V). The voltage efficiency indicates the fraction of the theoretical cell electromotive force that is actually achieved in the system.

The overall energy efficiency (EE) compares the actual electrical energy produced with the chemical energy of the removed organic matter (COD) and can be determined as follows:

$$EE = \frac{E_{elect}}{E_{chem}} \cdot 100 \quad (3),$$

където *E_{elect}* – electrical energy determined by -

$$E_{elect} = U_{avg} \cdot I_{avg} \cdot t \quad (4)$$

where *U_{avg}* – the average voltage (V), *I_{avg}* – the average current (A), *t* – the operation time (s), *E_{chem}* - represents the chemical energy of the removed COD. Often, the relationship between COD and the energy content of organic matter is used:

$$E_{chem} = \Delta COD \cdot V_{an} \cdot 14 \quad , (kJ/gCOD) \quad (5),$$

where - ΔCOD – the removed COD (g O₂/L), *V_{an}* – the volume of the anodic chamber (L), 14 kJ/g COD – the approximate energy content of the organic matter.

Results and discussions

To evaluate the effect of different electron donors on MFC performance, three substrates were investigated: lactate (control substrate), distillery stillage, and vinasse. Lactate represents a well-characterized and easily biodegradable organic matrix, frequently used as a model electron donor for sulfate-reducing bacteria. In contrast, distillery stillage and vinasse are complex industrial substrates with high COD values, containing a mixture of organic acids, sugars, and other reduced compounds.

The results for the main parameters characterizing the energy efficiency of the microbial fuel cell (Table 1) indicate that using three different electron donors in the anodic zone during microbial sulfate reduction leads to significant variations in COD removal (ΔCOD), generated current (*I*), and coulombic efficiency (CE). A higher degree of COD reduction suggests a larger theoretical electron flow; however, the actual CE value is determined by the fraction of electrons directed toward electrogenesis versus those involved in competing microbial processes, such as sulfate reduction and biomass synthesis. Comparison of



the three substrates allows assessment of how the composition and biodegradability of the organic matrix influence the distribution of electron flow between electrogenic and metabolic processes in the anodic biofilm, as well as the electrochemical performance of the microbial fuel cell.

The experimental setup (Fig. 1) is based on a bioelectrochemical system with an air cathode and a cation exchange membrane, in which microbial sulfate reduction (MSR) occurs in the anodic zone. The results for the main energy performance indicators of the microbial fuel cell (MFC), presented in Table 1, clearly demonstrate the significant influence of the type of organic substrate and the contact time on the energy efficiency of the system.

The comparative analysis shows that the highest current values were observed with distillery stillage, reaching up to 3.2 mA at a contact time of 60 h. During the same period, high open-circuit voltage (OCV) values were also recorded (up to approximately 780 mV), indicating intense electrogenic activity and good biodegradability of this substrate. Vinasse also exhibited relatively high OCV values (up to around 798 mV), but the generated current remained lower (up to 2.5 mA), which may be attributed to its more complex composition and potential mass transfer limitations. The lowest current values were observed with lactate (up to 1.3 mA), although the voltage remained relatively stable at around 700 mV, indicating a limited electron flow to the anode.

Coulombic efficiency (CE) exhibited significant differences depending on the substrate used. The highest values were recorded for distillery stillage, reaching a maximum of 8.6% at 60 h, indicating an optimal balance between microbial degradation of the organic matter and electron transfer to the anode. For lactate, higher initial CE values were observed (up to 6.5%), but they decreased to around 1.5% with increasing contact time, reflecting the intensification of competing processes associated with sulfate reduction. In the case of vinasse, the coulombic efficiency remained relatively low (2.6–4.8%) throughout the experimental period, indicating that a significant portion of electrons was diverted to side metabolic processes rather than contributing to electrical current generation.

Table 1. Changes in the main energy performance indicators* of the microbial fuel cell for the three organic substrates investigated at different contact times.

	Contact time	21 h	31 h	60 h	72 h	86 h	108 h	144 h
Lactate	OCV, mV	697	706	707	688	654	667	664
	I, mA	1.1	1,2	1,3	1,1	0,9	0,7	0,5
	SO ₄ , g/l	0.766	0.735	0.657	0.583	0.537	0.505	0.503
	DCOD, g/l	0.85	1.55	1.85	2.25	2.95	4.35	4.55
	COD, %	13.2	24.0	28.7	34.9	45.7	67.4	70.5
	CE, %	6.5	4	6.1	4.2	2.8	1.4	1.5
	VE, %	63.4	64.2	64.3	62.5	59.5	60.6	60.4
	EE, %	4.1	2.6	3.9	2.6	1.7	0.8	0.9
Distillery stillage	OCV, mV	701	727	780	752	737	709	687
	I, mA	2,4	2,7	3,2	3,0	2,8	2,5	2,1
	SO ₄ , g/l	0.246	0.105	0.088	0.087	0.082	0.061	0.053
	DCOD, g/l	7.7	8.1	8.7	9.1	9.6	11.9	11.9
	COD, %	28.3	29.8	32.0	33.5	35.3	43.8	43.8
	CE, %	3.9	5.2	8.6	7.8	7.1	4	4.4
	VE, %	63.7	66.1	70.9	68.4	67	64.5	62.5
	EE, %	2.5	3.4	6.1	5.3	4.8	2.6	2.8



Vinasse	OCV, mV	715	749	798	756	726	695	679
	I, mA	2,1	2,3	2,5	2,4	2,2	2,0	1,9
	SO ₄ , g/l	0.323	0.312	0.010	0.183	0.097	0.061	0.025
	DCOD, g/l	10.6	12.1	12.3	13.5	13.9	14.5	16.1
	COD, %	35.2	40.2	40.9	44.9	46.2	48.2	53.5
	CE, %	2.6	2.9	4.8	4.1	3.6	3.1	3.1
	VE, %	65	68.1	72.5	68.7	66	63.2	61.7
	EE, %	1.7	2	3.5	2.8	2.4	2	1.9

*OCV, mV - open-circuit voltage; I, mA - average anodic current at a load resistance of 100Ω; ΔCOD, g/L - consumed COD, COD, %- COD removal efficiency; CE, %- coulombic efficiency; VE, %- voltage efficiency; EE, % - overall energy efficiency, SO₄, g/l- sulfate concentration.

Analysis of the overall energy efficiency (EE) confirmed these trends. The highest values were achieved with distillery stillage (up to 6.1%), due to the combination of high current and relatively good coulombic efficiency. Vinasse reached intermediate values (up to 3.5%), while lactate showed a sharp decline in energy efficiency to below 1% at longer contact times, despite relatively good initial performance. This behavior can be attributed to the limited capacity of the system to channel electron flow toward the anode with this substrate.

Regardless of the type of electron donor, a similar trend was observed with respect to contact time. In the initial stages (up to approximately 60–72 h), current, coulombic efficiency, and energy efficiency increased, followed by a gradual decline. This decrease is attributed to the depletion of readily biodegradable organic fractions, accumulation of hydrogen sulfide, and an increase in the system's internal resistance.

It is important to note that a high COD removal rate does not necessarily translate into high energy efficiency. In the cases of vinasse and distillery stillage, substantial COD consumption was observed, but only a fraction of the released electrons contributed to electricity generation. The main reason for this is the occurrence of microbial sulfate reduction, in which sulfate acts as a competing electron acceptor, diverting electron flow away from the anode.

In summary, the results indicate that distillery stillage is the most suitable substrate for achieving high energy efficiency in MFCs with anodic sulfate reduction, whereas vinasse and lactate exhibit more limited potential. The optimal contact time for system operation is in the range of 60–72 h, during which the best balance between organic matter degradation and electricity generation is achieved.

Conclusion

The results indicate that the performance of the bioelectrochemical system is highly dependent on the type of organic substrate. The best energy performance was achieved with distillery stillage, whereas vinasse and lactate exhibited lower efficiency due to limitations in electron transfer and competition with the microbial sulfate reduction process.

The optimal contact time was found to be in the range of 60–72 h, providing the best balance between COD removal and electricity generation. The main limiting factor remains the diversion of electrons toward sulfate reduction. Nevertheless, the system demonstrates potential for sustainable treatment of industrial wastewater with simultaneous energy recovery.

Acknowledgements

The Bulgarian National Science Fund supported this research, Grant № KP-06-N67/3 from 12.12.2022.



References

1. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, New York, 1989.
2. España-Gamboa, E.; Mijangos-Cortés, J.; Barahona-Pérez, L.; Domínguez-Maldonado, J.; Hernández-Zárate, G.; Alzate-Gaviria, L. Vinasses: Characterization and treatments. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 1235–1250. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.02.001>
3. Hao, O.J.; Chen, J.M.; Huang, L.; Buglass, R.L. Sulfate-reducing bacteria. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **1996**, *26*, 155–187. <https://doi.org/10.1080/10643389609388489>
4. Logan, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstraete, W.; Rabaey, K. Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.* **2006**, *40*, 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
5. Mohana, S.; Acharya, B.K.; Madamwar, D. Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. *J. Hazard. Mater.* **2009**, *163*, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.079>
6. Pant, D.; Van Bogaert, G.; Diels, L.; Vanbroekhoven, K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
7. Rabaey, K.; Rozendal, R.A. Microbial electrosynthesis—revisiting the electrical route for microbial production. *Nat. Rev. Microbiol.* **2010**, *8*, 706–716. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2422>
8. Santoro, C.; Arbizzani, C.; Erable, B.; Ieropoulos, I. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *J. Power Sources* **2017**, *356*, 225–244 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
9. Yuan, H.; He, Z. Graphene-modified air cathodes for microbial fuel cells. *Biosens. Bioelectron.* **2015**, *63*, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.07.060>
10. Zhang, Z., Zhang, C., Yang, Y., Zhang, Z., Tang, Y., Su, P., & Lin, Z. (2022). A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, *376*, 134109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134109>
11. Zhao, F., Harnisch, F., Schröder, U., Scholz, F., Bogdanoff, P., & Herrmann, I. (2005). Application of pyrolysed iron(II) phthalocyanine and CoTMPP based oxygen reduction catalysts as cathode materials in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, *7*(12), 1405–1410. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2005.09.032>



LED БИОСЕНЗОР ЗА МОНИТОРИНГ В РЕАЛНО ВРЕМЕ НА ВОДИ ЗАМЪРСЕНИ С ТЕЖКИ МЕТАЛИ

Росен Иванов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, r.ivanov@mgu.bg

LED BIOSENSOR FOR REAL TIME MONITORING OF HEAVY METALS CONTAMINATED WATERS

Rosen Ivanov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, r.ivanov@mgu.bg

ABSTRACT

Traditional monitoring methods require time for sampling and analysis, and those that provide real-time monitoring are expensive and have limited application. Guided by this, we constructed and tested a low-cost prototype of a LED biosensor based on a sediment microbial fuel cell. The sensor showed high efficiency and sensitivity to the most common heavy metals pollutants from industrial, agricultural and domestic wastewater. The sensor is designed for direct integration into technological schemes with user-friendly operation and clear detection of changes in pollutant concentration via LED indication.

Въведение

Замърсяването с тежки метали може да има както природен характер, например изветряне на скали, така и антропогенен характер, като миннодобивната и миннопреработвателната промишленост, металургията, преработка на отпадъци и други. Тежките метали вследствие на антропогенната дейност са по-мобилни и бионалични от тези с природен характер и представляват по-голям риск за здравето на хората и околната среда. Степента на замърсяване с тежки метали се е увеличила значително с бързата индустриализация. Тежките метали освободени от различни промишлени дейности се разпространяват в околната среда, най-вече чрез течащите повърхностни води. Промислените отпадъчни води обикновено съдържат тежки метали като хром, мед, цинк, олово и други, които в големи концентрации могат да причинят здравословни проблеми и замърсяване на природните екосистеми. [6]

Съществуват различни химични, физични и биологични технологии за третиране на такива води, които ефективно отстраняват тежките метали. Въпреки всичко, след третиране водите трябва да бъдат изследвани дали отговарят на стандартите за заустване. Ако емисиите на тежки метали надвишават допустимите концентрации, това може да доведе до сериозни екологични проблеми и увреждане на околната среда. От решаващо значение е концентрациите на тежки метали в отпадъчни води да бъдат строго контролирани в реално време преди изпускането им в околната среда. [3]

Повечето методи за контрол включват периодичен мониторинг, което предполага ограничение в проследяването, с оглед на това, че пробите отразяват моментното качество на водата. В момента на вземане на пробата може да не бъдат установени замърсявания или те да са минимални, но за дълъг период от време да окажат сериозно въздействие във водните екосистеми. Този недостатък се оказва много по-сериозен при течащите повърхностни води, където условията могат да се променят във всеки един момент. Този проблем се решава с използването на подходящи биосензори, чрез които може да се наблюдава качеството на водата и да бъдат открити замърсители на околната среда на място и в реално време. [5] Традиционните методи за анализ имат висока селективност и чувствителност, но също така са скъпи, имат сложно пробонабиране и пробоподготовка и не могат да предоставят данни в реално време и на място. През последните години са разработени редица биосензори, които представляват интегрирани устройства комбиниращи биологични материали и преобразуватели, за количествено и полуколичествено наблюдение на различни аналити, като тежки метали, БПК, летливи мастни киселини и други. В сравнение с традиционните техники, характеристиките на биосензорите



показват, че са прости, евтини и преносими за практическо приложение. Повечето от разработените до момента биосензори, обаче, използват или пречистени протеини (като ензими, метал-свързващи протеини и антитела) или цели генно модифицирани микроорганизми. Такива биосензори се изправят пред предизвикателството на токсичността за биологичния компонент, което възпрепятства използването им при проби с висока концентрация на тежките метали. Нещо повече, голяма част от тези сензори не могат да осигурят данни на място и в реално време. [3]

През последните години сензорите базирани на микробни горивни клетки се предвиждат като обещаващ, евтин и енергийно ефективен инструмент за наблюдение на замърсявания във води и почви в реално време. При повечето сензори базирани на микробни горивни клетки, електроактивните микроорганизми се инокулират и аклиматизират в анодната камера, за да се открие токсичността на замърсителите. Ако замърсителя инхибира метаболитната активност на електроактивните микроорганизми, електрическият сигнал (напрежение или ток) на тези сензори намалява. Това се счита за основен принцип на МГК базирани сензори. [4] Използването на електроактивни микроорганизми за долавяне на замърсители има сериозен недостатък, тъй като сензорите не могат да наблюдават повтарящи се замърсявания, освен ако електроактивните бактерии не бъдат възстановени или повторно инокулирани и аклиматизирани след всяко замърсяване. За съжаление възстановяването и аклиматизацията могат да отнемат до няколко седмици. [7] За да бъде преодолян недостатъкът е възможно използването на сензори базирани на седиментни микробни горивни клетки. Основните предимства на сензора включват: - вместо да използва инхибирането на електроактивни бактерии в седимента, долавя замърсявания от тежки метали във водата, като те се редуцират върху катода и се повишава напрежението. Седимента адсорбира голяма част от тежките метали, защитавайки електроактивните микроорганизми от инхибиране от йони на тежки метали, като по този начин сензора може да работи нормално след шокови замърсявания. - сензора използва естествени електроактивни бактерии живеещи в седимента, генерирайки базово напрежение, следователно процесът на инокулация може да бъде избегнат. - Компонентите на сензора са монтирани в интегрирана система, като по този начин наблюдението е удобно и стартира с поставянето на сензора във влажна зона. [9]

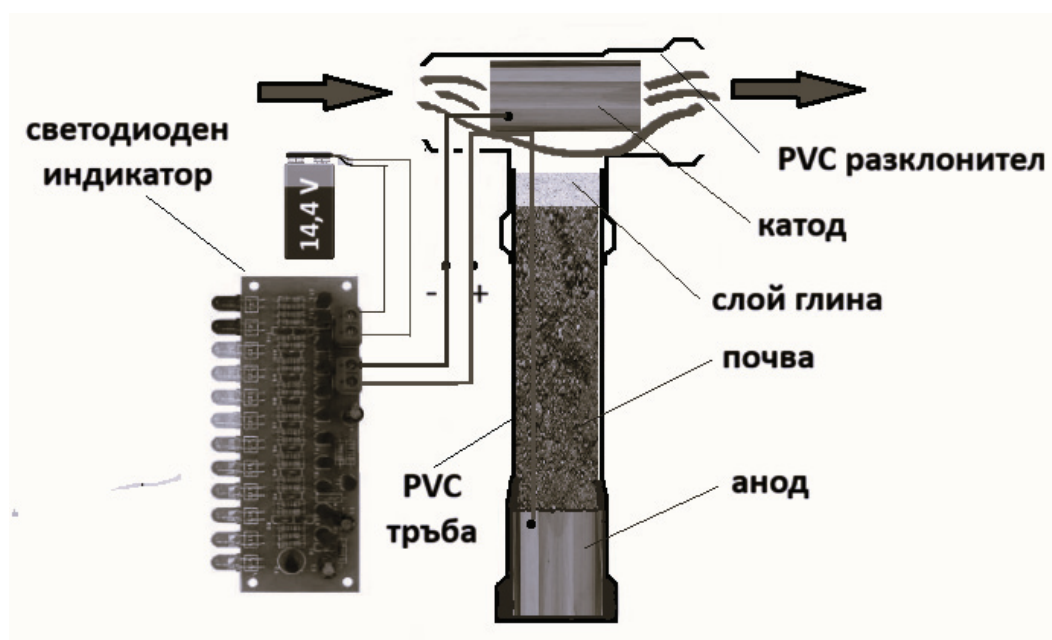
Основните предимства на седиментните микробни горивни клетки са ниска цена, проста конструкция и дългосрочно осигуряване на изходна мощност. По този начин системата е приложима като биосензор за дългосрочна *in situ* експлоатация. [2] Има редица данни за приложението на биосензори базирани на СМГК за мониторинг в реално време на параметри на околната среда, като температура и разтворен кислород. Броя на докладите за развитието на СМГК като биосензори за мониторинг на тежки метали не са много, но изследванията и резултатите са в обещаващ етап. [8] В световната литература липсват данни за практически разработки на такива сензори и за работата им в релевантна околна среда. Подтикнати от това, разработихме и изследвахме прототип на LED биосензор базиран на седиментна микробна горивна клетка.

Материали и методи

За целите на изследването е взет крайречен седимент от река Иванянска, България (42°42'27.1"N 23°11'46.4"E), от дълбочина 20–30 см. След вземането на речния седимент по-едриите частици бяха отстранени чрез пресяване през сито с размер на отворите 2 мм. За извършване на физикохимични анализи част от пресятата почва беше въздушно изсушена. Почвата е характеризирана като алувиално-ливадна с високо съдържание на хумус – 6%. Според метода на Рутковски почвата е класифицирана като глинеста. рН на почвата е измерено с рН-метър HANNA HI-9021 при съотношение 1:2,5 (почва:вода). Електропроводимостта на почвата (ЕС) е измерена с WTW LF 197-S при съотношение 1:5 (почва:вода). Основните физикохимични свойства на почвата са както следва: рН 6,42, ЕС 288,89 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Съдържанието на азот по Келдал е 0,59%, а разтворимият органичен въглерод – 74,28 mg/kg. Количеството общ азот е измерено като 986,5 mg/kg, фосфор – 20,2 mg/kg, калий – 180,0 mg/kg. В седимента най-разпространени бяха *Geobacter* и *Clostridium*. Открити са също така *Anaeromyxobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Desulfolobus*. Всички тези показатели осигуряват достатъчно хранителни вещества и субстрат за разграждане от екзоелектрически микроорганизми в

анодната зона. Това би гарантирало дългосрочна и стабилна работа на сензора. Така подготвената почва е използвана за запълване на анодната област на биосензор, базиран на седиментна микробна горивна клетка (фиг. 1).

Биосензорът се състои от седиментна микробиална горивна клетка, която включва анодна и катодна част. Анодната част представлява PVC тръба с диаметър 110 мм и дължина 250 мм. Дъното на тръбата е затворено с PVC тапа. Тръбата е запълнена с речен седимент. На дъното на тръбата е поставен електрод от неръждаема стомана AISI 304 с площ 471 cm^2 , действащ като анод. В горната част на тръбата има глинен слой, действащ като мембрана между анодната и катодната зони. Катодната част представлява PVC разклонител $\text{Ø}110/110 \times 87^\circ$, в който надлъжно е разположен дъгообразен електрод, направен от неръждаема стомана AISI 304 с площ 407 cm^2 , действащ като катод. Двете структурни елементи са свързани и формират биосензор, базиран на седиментна микробна горивна клетка.



Фиг. 1 Схема на LED биосензор базиран на седиментна микробна горивна клетка

За целите на изследването бяха приготвени синтетични разтвори, съдържащи Ni^{2+} ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Pb^{2+} (PbCl_2), Cu^{2+} ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Mn^{2+} ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и Zn^{2+} ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) с различни концентрации. Разтворите на тежки метали бяха приготвени в четири концентрации – 5 мг/л, 20 мг/л, 50 мг/л и 100 мг/л. През биосензора последователно бяха пропускани разтвори на отделни тежки метали с нарастващи концентрации. За да се определи реакцията на сигналите на напрежение спрямо шока от йони на тежки метали, напрежението на биосензорите беше измерено и записано с помощта на Vernier LabQuest Mini и софтуер Logger Lite 1.9.4. След измерване на електрическите параметри на сензора, към него е прикачен модул за светодиодна индикация на напрежението. Светодиодният индикатор се състои от 12 светодиода – един, който индикира подадено захранване, пет зелени, три жълти и два червени. Входното напрежение е от 0,5 до 1 волт, като стъпката на светване на светодиодите може да се регулира чрез вграден тример потенциометър. Индикатора работи със захранване от 12 до 15 волта.

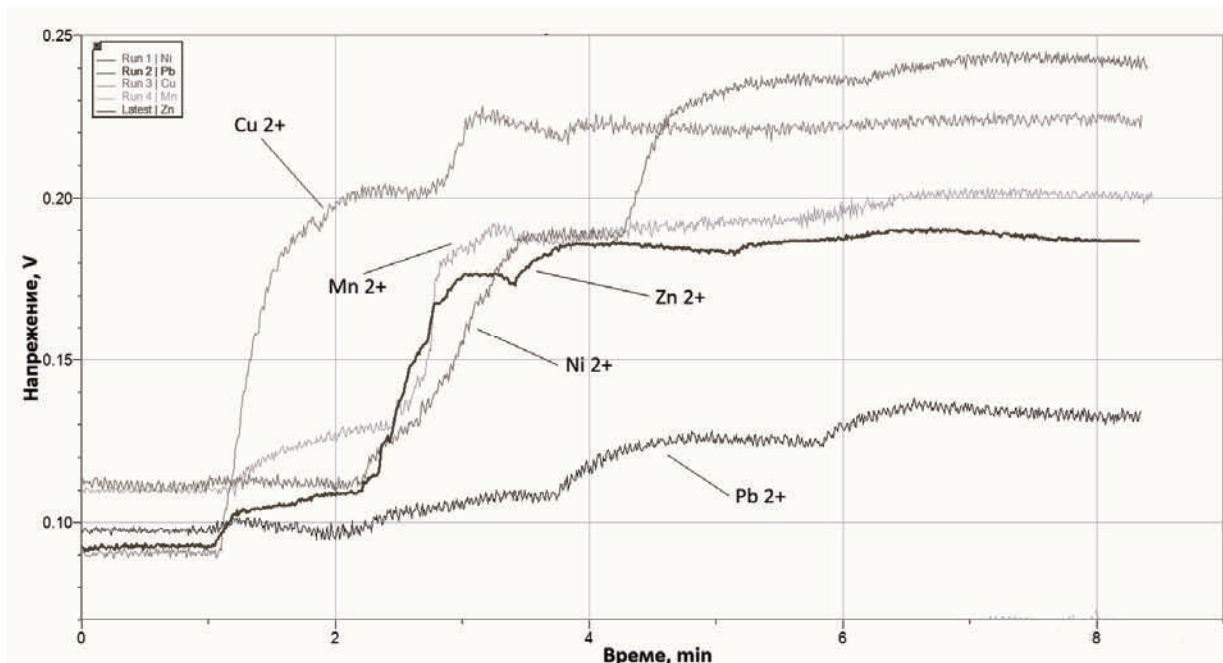
Резултати и обсъждане

За да се определи чувствителността на биосензора към замърсяване с различни тежки метали, той беше свързан към компютърен софтуер, който записваше промяната в реално време на



напрежението на сензора. Фигура 2 представя графики, показващи промяната в напрежението на биосензора в отговор на различни концентрации на тежки метали – Ni, Zn, Pb, Mn и Cu.

Данните показват, че биосензорът проявява най-висока чувствителност към медни йони. При само 5 мг/л мед, напрежението на сензора се увеличава с 120 mV в рамките на секунди, след което напрежението се стабилизира на 206 ± 2 mV. Въвеждането на разтвор с концентрация на мед от 20 mg/l води до увеличение на напрежението с 25 mV, докато въвеждането на разтвор с концентрация на мед от 50 mg/l води до увеличение на напрежението с 10 mV. Въвеждането на разтвор с концентрация на мед от 100 mg/l не предизвиква никаква промяна в напрежението, което показва, че тази концентрация надвишава чувствителния диапазон на биосензора за изследваните концентрации.



Фиг. 2 Динамика на напрежението на СМГК-базирания биосензор спрямо различни тежки метали

Биосензорът проявява най-ниска чувствителност към оловни йони. Концентрация на оловни йони от 5 mg/l води до увеличение на напрежението с 5 mV, докато концентрация от 20 mg/l води до увеличение на напрежението с 10 mV. Сензорът демонстрира по-висока чувствителност при концентрации от 50 mg/l и 100 mg/l, водейки до увеличения на напрежението от 22 mV и 14 mV съответно.

За останалите метали се наблюдават подобни графики на напрежението. За всички три метала, въвеждането на разтвор с концентрации на йони от 100 mg/l води до незначителни увеличения на напрежението, които често могат да се отдадат на различни фактори на околната среда. Въвеждането на разтвор с концентрация от 5 mg/l не води до промяна в напрежението за никел, за разлика от цинка и мангана, където се регистрират увеличения на напрежението от 12 mV и 21 mV съответно. Въвеждането на разтвори с концентрация от 20 mg/l води до най-значителните увеличения на напрежението за всички три метала: Ni – 77 mV, Zn – 66 mV и Mn – 62 mV. Въвеждането на разтвори с концентрация от 50 mg/l не води до промяна в напрежението на сензора за манган. За цинк има увеличение на напрежението от 10 mV, докато за никел то е най-съществено – 45 mV.

След измерване на електрическите параметри на сензора, към него беше прикрепен светодиодния модул и бяха повторени експериментите с тежки метали. За всеки отделен метал беше направена калибрация на уреда, за да може входния сигнал да отговаря правилно на светването на светодиоди. Модулът беше настроен така, че при чиста вода да свети последния зелен индикатор. Най-ниска стъпка на светване на светодиодите беше калибрирана при оловото, а най-висока при медта.



При всички изследвания се наблюдаваше светване на жълти и червени светодиоди при преминаване на синтетичните отпадъчни води съдържащи тежки метали през катодната зона на биосензора.

Заклучение

Ограничаването на замърсяването на околната среда с тежки метали неизбежно включва разработването и внедряването на рентабилни и устойчиви методи за мониторинг и системи за ранно предупреждение. Биосензорите, базирани на седиментни микробни горивни клетки, могат да бъдат една от най-подходящите алтернативи, но са необходими многобройни изследвания върху тяхната чувствителност, конструкция и влияещи фактори, за да се гарантира, че могат да предоставят ефективни дългосрочни решения. Конструираният и изследван LED биосензор, базиран на SMFC, демонстрира добра чувствителност към изследваните метални замърсители. Най-висока чувствителност беше установена при откриване на медни йони, със значително увеличение на напрежението на сензора от 120 mV при концентрации на мед от 5 mg/L. Най-ниската чувствителност на биосензора беше наблюдавана за оловни йони. Поставения светодиоден индикатор на напрежението прецизно отразяваше промяната на концентрацията на изследваните тежки метали чрез светване на жълти и червени светодиоди. Въз основа на получените резултати можем да заключим, че сензорът би бил най-ефективен при мониторинг на повтарящо се замърсяване с определен метален йон, при условие че електрическите параметри са оптимално настроени предварително. Това може да бъде направено бързо и лесно чрез контролния панел на устройството, Конструкцията на биосензора, състояща се от PVC тръба, позволява неговата интеграция в технологични инсталации за непрекъснат мониторинг и ранно предупреждение. За широкото приложение на сензора ще бъдат необходими допълнителни изследвания относно неговата дългосрочна работа и влиянието на факторите на околната среда върху неговата ефективност.

Литература

- [1] Abbas, S. Z., Wang, J-Y., Wang, H., Wang, J-X., Wang, Y-T., Yong, Y. 2022. Recent advances in soil microbial fuel cells based self-powered biosensor, *Chemosphere* 303, 135036
- [2] Bose, D., Bhattacharya, R., Pillai, M., Ray, A., Kaur, T., Mondal, S., Mondal, A. 2026. State-of-the-art review on sediment microbial fuel cells: evolution, innovations, challenges, scalability, and policy implications for sustainable development, *Water-Energy Nexus*, 9, 30–45
- [3] Chauhan, N., Sah, N., Saxena, K., Jain, U. 2025. A review on biosensor approaches for the detection of hazardous elements in water, *Talanta Open*, 12, 100536
- [4] Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., Varjani, S., Kumar, M. 2020. Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: A critical review, *Science of the Total Environment* 712, 135612
- [5] Ejeian, F., Etedali, P., Mansouri-Tehrani, H-A., Soozanipour, A., Low, Z-X., Asadnia, M., Tahri-Kafrani, A., Razmjou, A. 2018. Biosensors for wastewater monitoring: A review, *Biosensors and Bioelectronics* 118, 66-79
- [6] Liu, L., Lu, Y., Zhong, W., Meng, L., Deng, H. 2020. On-line monitoring of repeated copper pollutions using sediment microbial fuel cell based sensors in the field environment, *Science of the Total Environment* 748, 141544
- [7] Li, Ch., Li, X., Li, T., Su, Y., Zhong, W., Han, Ch., Jiang, Y., Deng, H. 2024. Sediment microbial fuel cell monitoring repeated Cr(VI) shocks in different wetlands for a year: Performance and mechanism, *Journal of Cleaner Production* 452, 142147
- [8] Sun, F., Chen, J., Tang, M., Yang, Y. 2024. Recent research progress, challenges and future directions of sediment microbial fuel cell: A comprehensive review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 870-886
- [9] Wang, S., Wang, J., Zhao, L., Abbas, S., Yang, Z., Yong, Y. 2023. Soil Microbial Fuel Cell Based Self-Powered Cathodic Biosensor for Sensitive Detection of Heavy Metals, *Biosensors*, 13, 145



ОРГАНИЗИРАНЕ И ИЗПЪЛНЕНИЕ НА МОНИТОРИНГА НА БИОЛОГИЧНОТО РАЗНООБРАЗИЕ В РАЙОНА НА “АСАРЕЛ-МЕДЕТ” АД – ГР. ПАНАГЮРИЩЕ

Павел Господов, pgospodov@asarel.com
Валери Шишков, vshishkov@asarel.com
Невен Настев, nnastev@asarel.com

РЕЗЮМЕ:

Мониторингът на биоразнообразието на територията на „Асарел-Медет“ АД се организира и провежда във връзка с изпълнението на нормативните изисквания, свързани с този компонент на околната среда. Организацията и изпълнението му се състои в определянето на райони, поставянето на къщички за прилепи (*Myotis bechsteinii* и *Barbastella barbastellus*) и къщички за мухоловки (*Ficedula semitorquata* и *Ficedula parva*) и техния последващ мониторинг с цел опазване на приоритетни за района животински видове.

Определяне на район за поставяне на къщички за прилепи (*Myotis bechsteinii* и *Barbastella barbastellus*) и къщички за мухоловки (*Ficedula semitorquata* и *Ficedula parva*)

1. Въведение

Видовете, предмет на мониторинг, представляват горски обитатели със следните екологични и биологични характеристики:

➤ Дългоух нощник (*Myotis bechsteinii*) и широкоух прилеп (*Barbastella barbastellus*):

Обитават широколистни и смесени гори. Най-предпочитани са влажните горски местообитания с участието на дъб (*Quercus* sp.), полски клен (*Acer campestre*), габър (*Carpinus betulus*) или източен бук (*Fagus orientalis*) в среднопланинския пояс (700 - 1400 м н.в.). Обикновено в края на май и началото на юни женските формират малки размножителни колонии (5-35 женски) в хралупи на дървета и раждат по едно малко. През този период докато женските са социални и формират колонии, мъжките живеят поединично. Летните им убежища са най-често дупки в дървета, под отлепена, мъртва кора или в цепнатини на широколистни дървета, както мъртви, така и живи. Характерна особеност и за двата пола е честата смяна/редуване на убежището преди и след размножителния сезон. Зимуват в пещери, понякога – и в летните убежища.

➤ Полубеловрата мухоловка (*Ficedula semitorquata*) и червеногуша мухоловка (*Ficedula parva*):

Обитават главно широколистни гори над 70 г. възраст, предимно в пояса между 600 - 1550 м н.в. Най-предпочитани са горските насаждения, предимно съставени от полски ясен (*Fraxinus oxycarpa*), дъб (*Quercus* spp.), бук (*Fagus sylvatica*, *Fagus orientalis*) и др. Разполагат гнездата си в хралупи / дупки в стъбло или в клон, между 3 – 6 м височина. Гнездящо-прелетни видове. Пролетната миграция е през април – май, като по това време започва и размножителния сезон, а отглеждането на малки продължава до юни. Есенната миграция е най-интензивна през август - октомври.

2. Методология и последователност на дейностите.

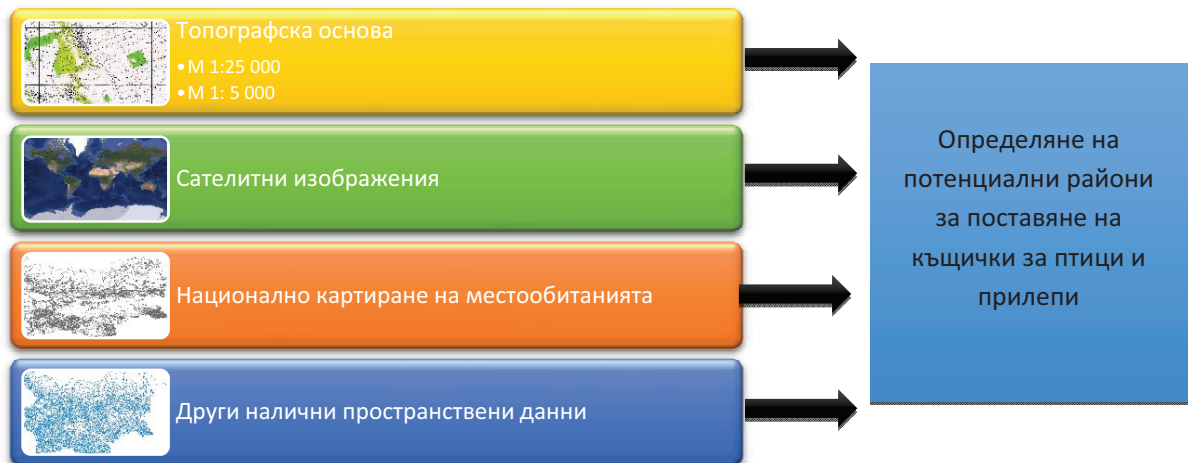
Процесът по определянето на район за поставяне на къщички включва основни дейности, а именно:

- идентифициране на подходящи за целта места чрез настолно проучване
- съгласуването им с горските подразделения,
- последващо посещение на терен (теренни обходи) за тяхното верифициране.



2.1. Настолно проучване

Настолното проучване включва дейности по предварително идентифициране на потенциални местообитания на целевите видове, типовете хабитати от националното картиране и пространственото им разпределение в района и спрямо границите на защитените зони. Също така, чрез ГИС моделиране въз основа на топографски карти, сателитни изображения и 3D модели е определен абиотичния профил на терена, вкл. релефните и ландшафтни характеристики, надморска височина, растителна покривка, както и наличието на водни течения/ тела. Схема на извършеното компютърно моделиране, базирано на гореспоменатите налични данни, е представено на Фигура 1.



Фигура 1. Схема на компютърно моделиране в ГИС среда

В процеса на работа се взеха предвид още възможностите за достъп до съответните райони и шумовото замърсяване около промишления комплекс на „Асарел-Медет“ АД.

2.2. Обход и верификация на терен

За целите на теренното проучване беше сформиран полеви екип, състоящ се от ръководител и експерти по прилепи и птици. Обходите се извършиха по трансектен метод, като за всеки трансект е записана GPS следа.

Взети са предвид особеностите на средата от значение за осигуряването на алтернативни убежища, в т.ч.:

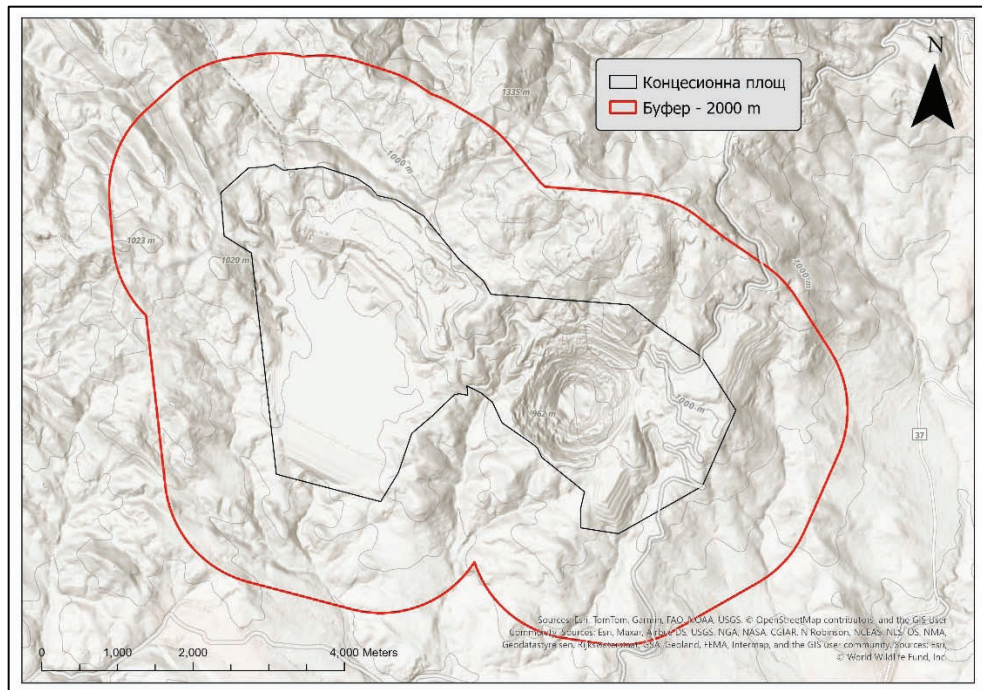
- тип на горското насаждение;
- възраст, диаметър и височина на дърветата;
- изложение на склона;
- наличие на водни течения и др.

Чрез този подход, съобразено с екологичните изисквания на целевите видове, са маркирани маршрутите, а именно широколистни и смесени гори със средна възраст от над 40 години, в близост до водни течения. За част от обходените места се извърши и облитане с дрон.

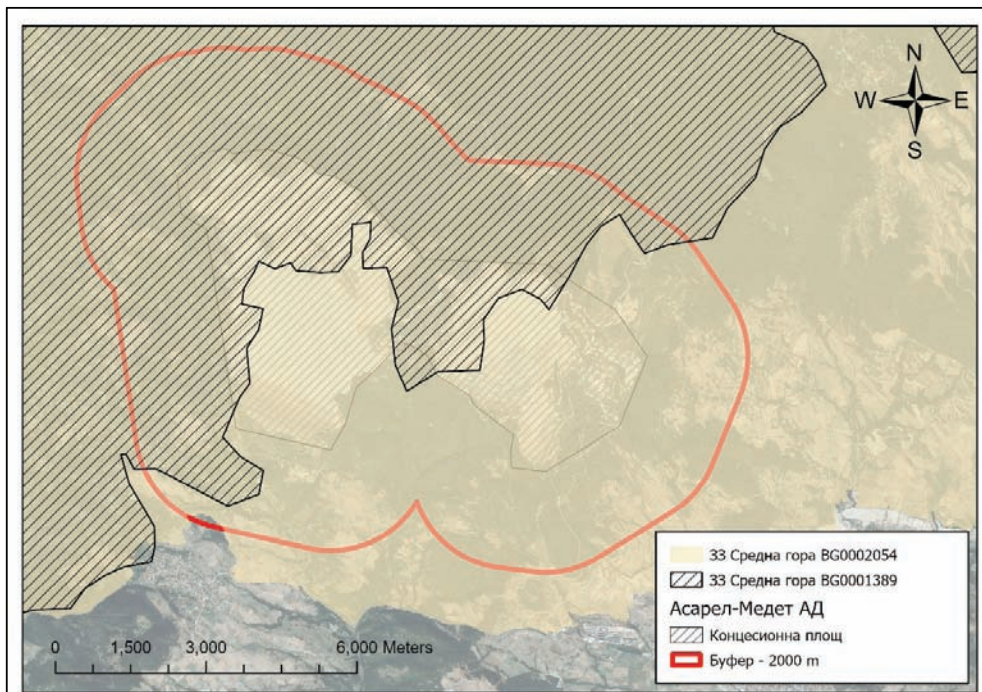
На тези места са взети координати на подходящи дървета, които са маркирани с бяла боя.

3. Обхват и местоположение на дейностите

Къщичките са разположени в граничните територии, в които е наличен горски фонд. С оглед на това и с цел съобразяване с топографските условия на терена и екологичните предпочитания на целевите видове, дейностите обхващат територия до 2000 м от границата на минната концесия, както е показано на Фигура 2.



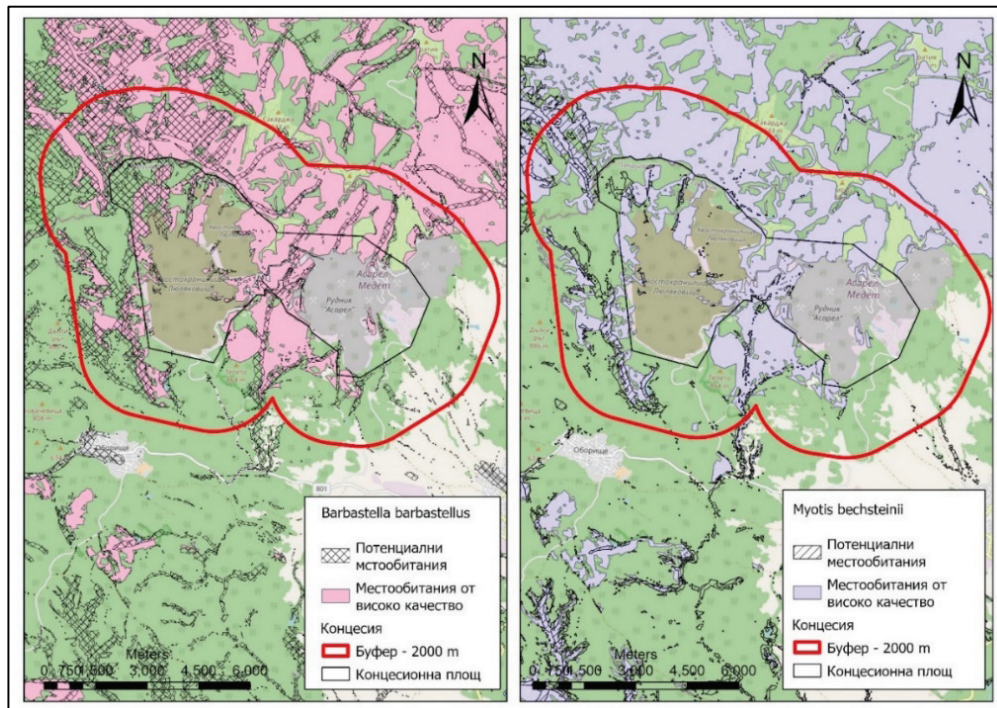
Фигура 2. Обхват на проучвателния район



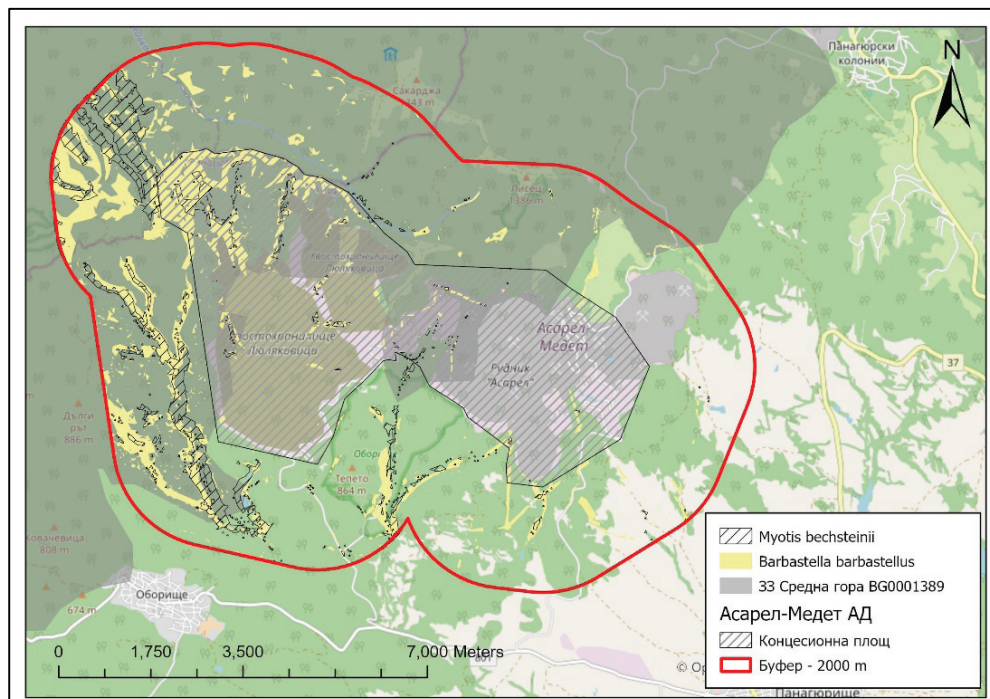
Фигура 3. Местоположение на защитените зони спрямо проучвателния район

3.1. Прилепи

Анализът на местообитанията на дългоух нощник (*Myotis bechsteinii*) и широкоух прилеп (*Barbastella barbastellus*) около концесионната площ на „Асарел-Медет“ АД (Фигура) показва, че подходящите местообитания са съсредоточени предимно в северната и западната част на обследвания район.



Фигура 4. Разпределение на потенциални местообитания и местообитания от високо качество на *Barbastella barbastellus* и *Myotis bechsteinii*.



Фигура 5. Потенциални местообитания на *Barbastella barbastellus* и *Myotis bechsteinii*, непринюкриващи се с местообитания от високо качество.

Видно от фигурата по-горе, потенциалните местообитания на двата вида са съсредоточени главно в района източно от хвостохранилище Люляковица и по-ограничено северно от рудник Асарел. Южно разположените местообитания са изключени от последващ анализ, тъй като се



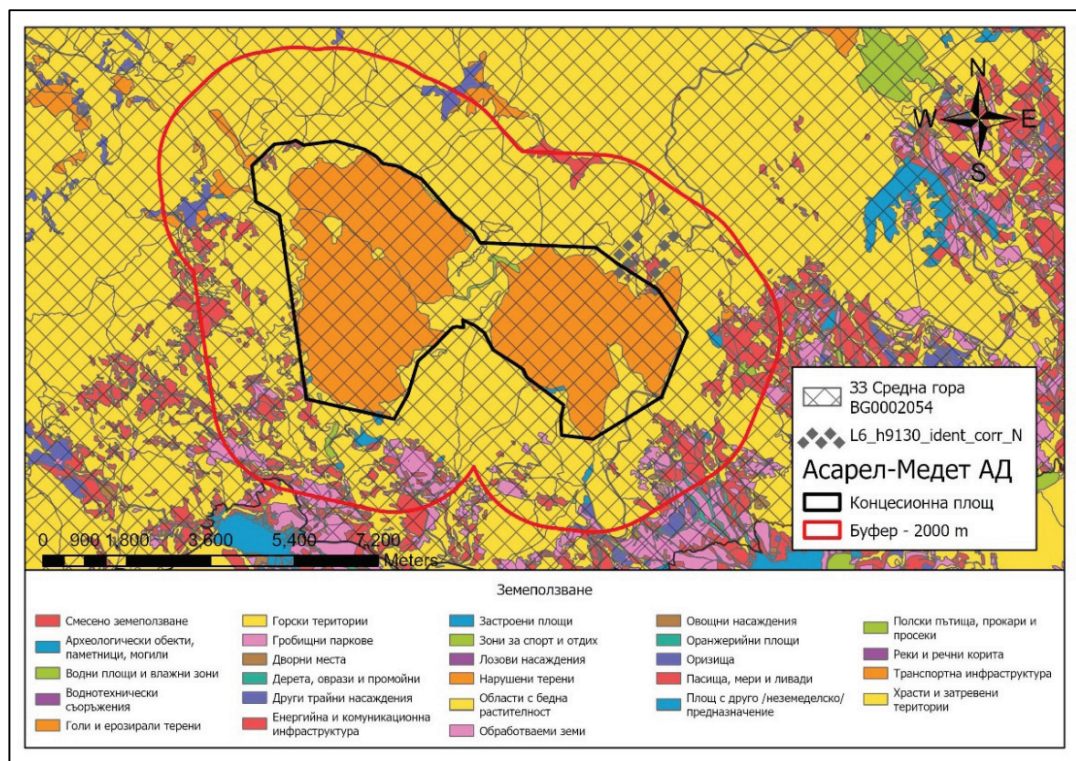
намират извън 33 Средна гора с код BG0001389. При направения абиотичен профил на изследвания район, включващ средна надморска височина, се селектираха местата с потенциални местообитания, попадащи в оптималните за видовете надморски височини в изследвания район.

3.2. Птици (мухоловки)

За определяне на подходящи места за поставяне на къщички за мухоловки е извършено GIS анализ на базата на следните критерии:

- Надморска височина между 600 и 1500 м;
- Широколистни и смесени гори (вкл. крайречни гори) на възраст над 40 г., като широколистните дървета да са минимум 80% от дървостоя;
- Разпространение на характерни за целевите видове птици типове местообитания от включените по Директива за местообитанията, напр. 9110, 9130, 9150, 91S0, 9170, 9180, 91AA, 91E0, 91F0, 91G0, 91H0, 91M0.

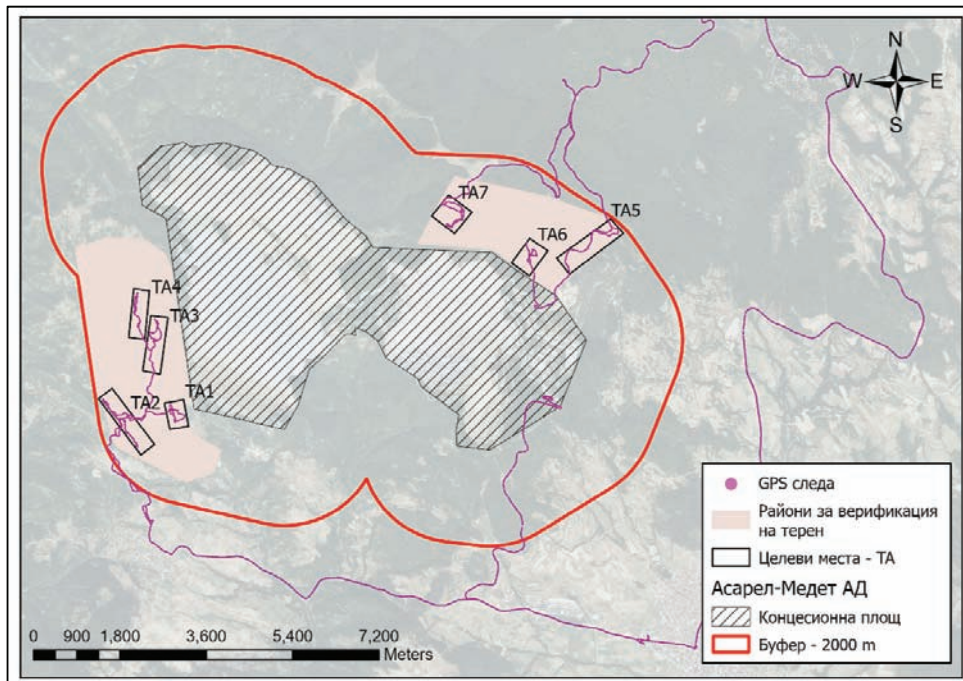
Видно от Фигура 6, горските територии в проучвания район са предимно в северната част и по-малко в южната и западната.



Фигура 6. Земеползване в изследвания район.

4. Описание и характеристика на набелязаните райони за изпълнение на задачата, в т.ч. и наличие на потенциални местообитания на целевите видове

В резултат от теренните проучвания и извършените обходи, показани на Фигура , са определени 7 целеви места / площи (ТА). Посочените места отговарят на критериите, представени по-горе в доклада, и са подходящи за поставяне на къщички за прилепи и птици, като това е обосновано както от екологичните характеристики на целевите видове, така и от условията за достъп.



Фигура 7. GPS следа от теренните обходи за верификация

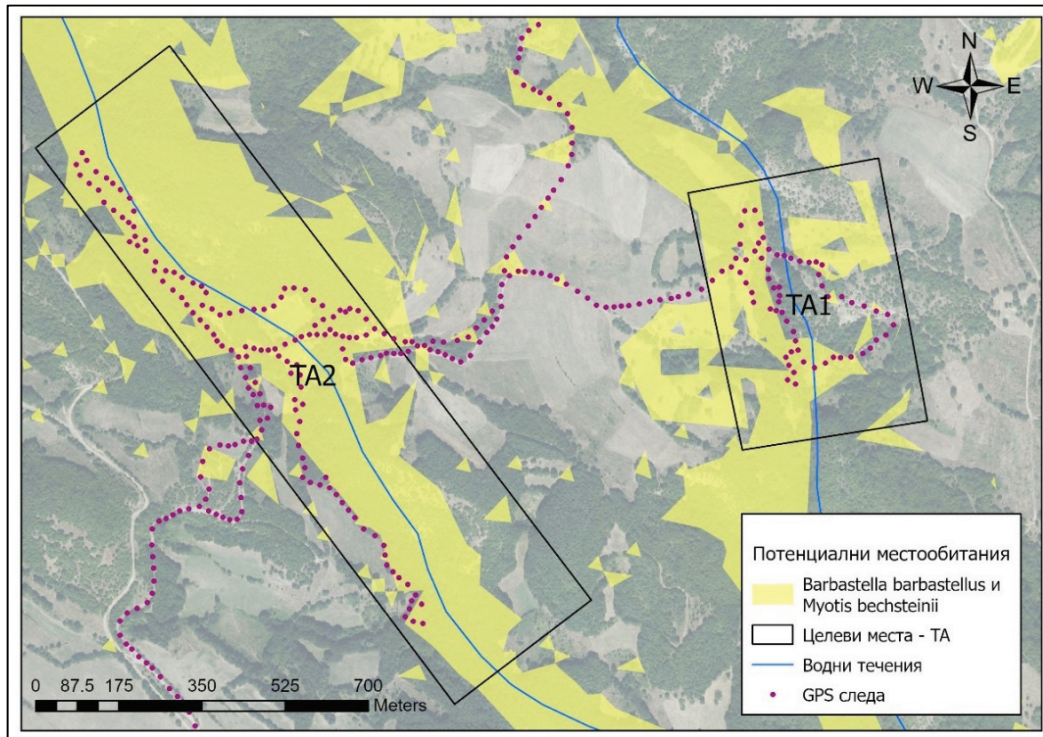
На 4 места се поставиха ултразвукови детектори. Резултатите показват присъствие на широкоух прилеп (*Barbastella barbastellus*). Установени са и звуци от типа *Myotis 45 kHz Type*, към която група принадлежи целевия вид *Myotis bechsteinii*.



Карта 1. Ултразвуков детектор за прилепи, модел – Wildlife Acoustic – Song Meter Mini Bat 2

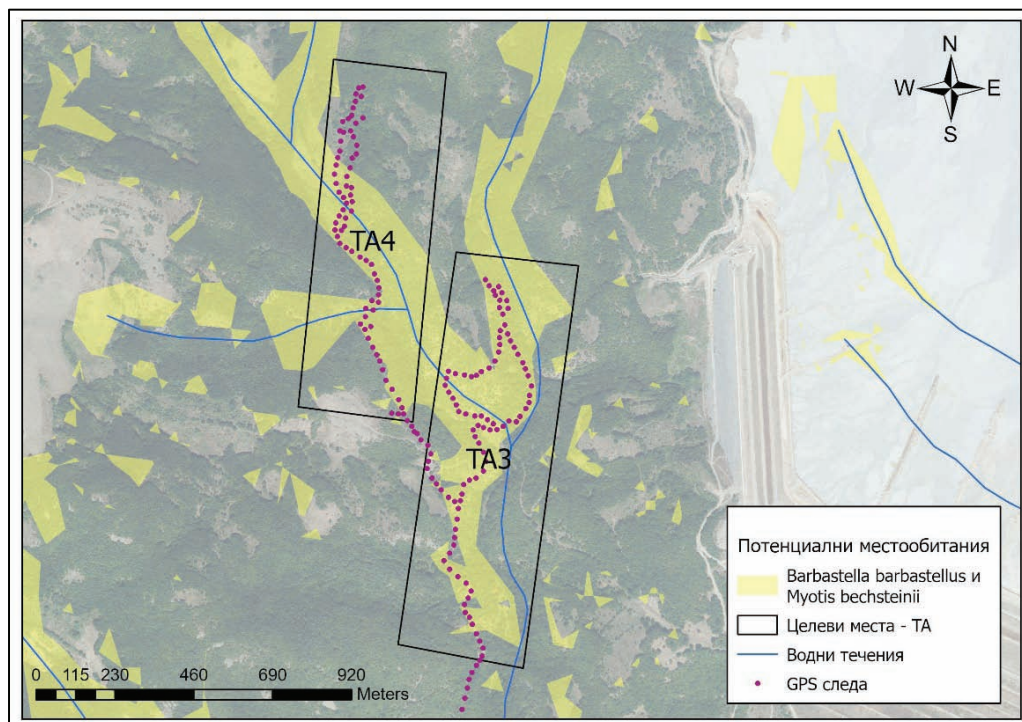
4.1. Описание на целевите места / площи – ТА

Целеви площи ТА1 и ТА2 попадат в диапазона между 600 – 800 м н.в. Горите са от естествен произход, като от дървесните видове доминира дъб (*Quercus*), а с по-малко участие са представени видовете бряст (*Ulmus*), клен (*Acer*) и габър (*Carpinus*). Средната възраст е около 60 г, а дървостоят около 12 м.



Фигура 8. Целеви площи TA1 и TA2

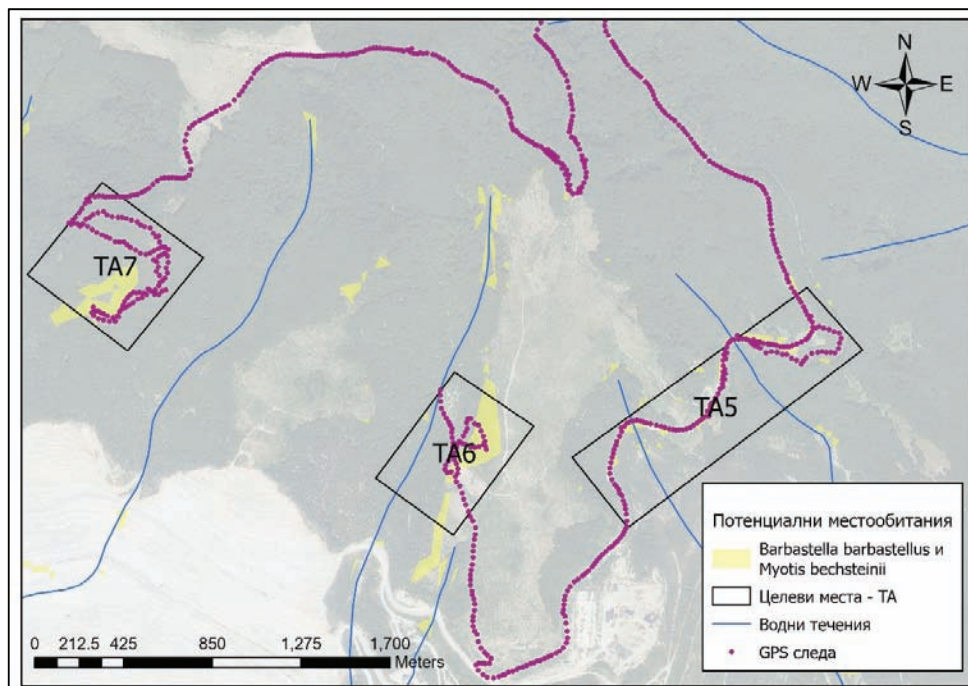
Целеви места TA3 и TA4 попадат в обсега между 700 и 900 м н.в. и представляват семенна гора от естествен произход, доминирана от габър и дъб. Средната възраст е около 50 години, а дървостоят около 6 м.



Фигура 9. Обход в целеви площи TA3 и TA4



Целеви места TA5, TA6 и TA7 се намират в пояса между 1000 – 1350 м н.в. Горите са семенни от естествен произход, съставени предимно от бук и по-малко дъб. Средната възраст варира от около 60 г при TA5 и TA6 до около 100 при TA7. Дървостоят е около 20 м.



Фигура 10. Обход в целеви площи TA5, TA6 и TA7

4.2. Заключение

В 7-те целеви места (ТА), определени в резултат на извършените теренни обходи позволяват поставянето на около 20 къщички от моделите, представени в точка 5., както и последващи анализи за съпоставка между различните райони.

5. Тип / модел на къщичките

Целта на къщичките е да предоставят алтернативно убежище за дендрофилни видове прилепи и птици (мухоловки), използващи предимно хралупи като убежища. За по-голяма ефективност изкуствените убежища трябва да предоставят подходящи условия и температурен комфорт на обитаващите ги видове, ефективна защита срещу хищници и устойчивост на външни условия. За тази цел бяха избрани къщички, изработени от специална комбинация от дървобетон, която осигурява подходящия температурен баланс, максимално близък до този в естествените убежища. Този тип къщички са с доказана ефективност и притежават следните предимства:

- устойчивост на температурни амплитуди, влага и др. атмосферни влияния, като вътрешността им остава защитена при дъжд / сняг;
- материалът за изработка позволява ефективно балансиране на температурните колебания и предотвратява образуването на конденз;
- дългогодишна издръжливост;
- патентован метод за закрепване на къщичките, който щади дървото и предотвратява израстване над тях;
- куполообразен покрив с цел отичане на водата встрани, който позволява сформирането на „кълъстери“ и колонии на прилепи;
- подходящи размери и цвят, имитиращи максимално естествените убежища на видовете;
- удобни за инсталиране, проверка и почистване.



Фигура 11. Къщичка за прилени, модел: Bat Box 2F



Фигура 3. Къщичка за прилени, модел: Bat Box 2FN



Фигура 13. Къщичка за птици, модел: Nest Box 1B

Поставяне на къщички за прилепи (*Myotis bechsteinii* и *Barbastella barbastellus*) и къщички за мухоловки (*Ficedula semitorquata* и *Ficedula parva*)

Дейностите включват:

- доставка и подготовка на къщичките преди поставянето им;
- поставяне на къщички за прилепи;
- поставяне на къщички за птици;
- изготвяне на план за последващ едногодишен мониторинг



Снимка 1. Широкоух прилеп (*Barbastella barbastellus*) и дългоух нощник (*Myotis bechsteinii*)



Снимка 2. Червеногуша мухоловка (*Ficedula parva*) и полубеловрата мухоловка (*Ficedula semitorquata*)



6. Методология

6.1. Подготвителни дейности

Доставени са общо 90 къщички за прилепи, от които 45 от тип BV2F и 45 от тип BV2FN. Освен тях са доставени общо 65 къщички за птици от тип NB1B. По 5 от всеки тип къщички са предвидени за резервни.

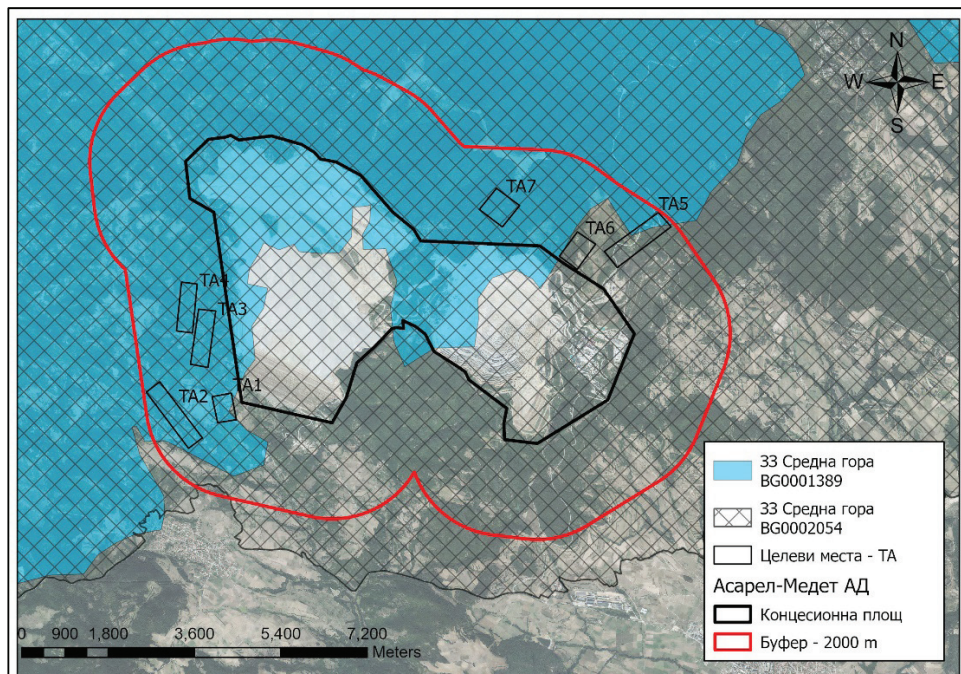
Подготовката на къщичките преди тяхното монтиране включва индивидуално номериране с боя (Снимка 2) и създаване на каталог и база данни, в която се въвежда тип и номер на всяка от тях.



Снимка 2. Номерирани къщички тип 2F

6.2. Полеви дейности

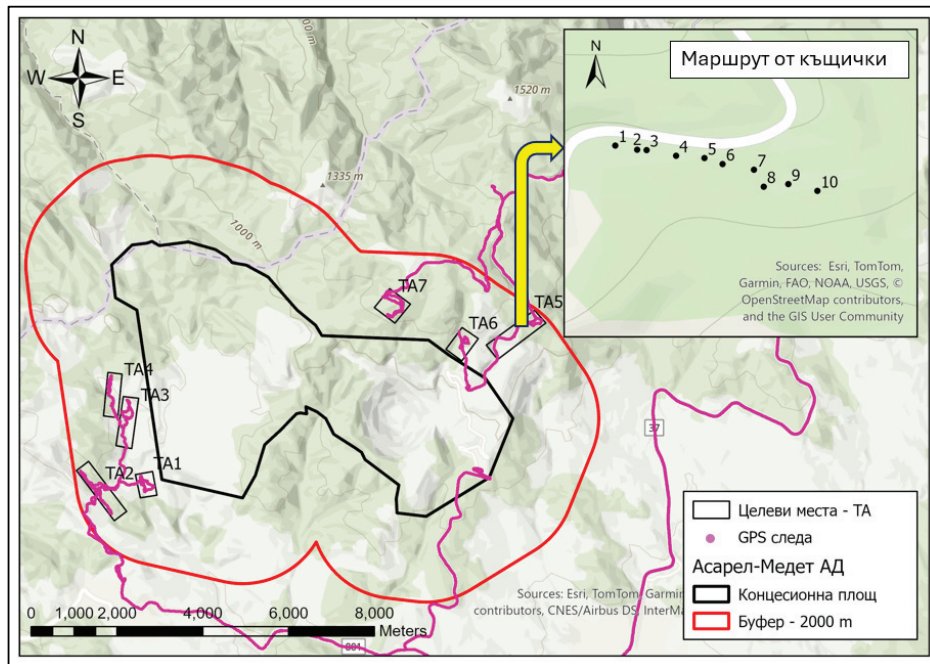
Поставянето на къщичките се осъществи в идентифицираните целеви места (ТА), показани на фигура 14. За целта са сформирани полеви екипи с опит в поставянето на къщички за прилепи и птици, състоящи се от ръководител и експерти по прилепи и птици.



Фигура 14. Целеви места за поставяне на къщички



Къщичките са монтирани на дървета с достатъчно голям за целта диаметър, обикновено на възраст над 40-50 години и без наличие на хралупи, които да представляват естествени убежища за целевите видове. С цел максимална оперативност и ефективност както при монтирането, така и в етапа на последващ мониторинг, поставянето на къщичките се извършва по трансектен метод, т.е. следва определени маршрути (фигура 15).



Фигура 15. Примерен маршрут от къщички в целева площ - ТА

В зависимост от структурата на дърветата се определя начина на поставяне на къщичката, а именно монтиране чрез заковане с пирони или захващане на клон при наличие на подходящи такива (Снимка 3).



Снимка 3. Начин на поставяне на къщичка – вляво: закачена на клон; вдясно: закована с пирони

Отстоянието между точките на позициониране на къщичките се определя в зависимост от спецификациите на терена, гъстотата на гората и поведенческата екологията на видовете, като средното отстояние е 20 -30 м. Изложението се определя от експертите на терен в зависимост от точното местоположение, склопеността на гората, структурата на субстрата и локалната осветеност. Височината на монтиране на къщичките следва да е около три метра, с лек наклон напред, което да предотврати влизането на вода в тях.



Всяко дърво, на което се поставя къщичка, се маркира със символ, отличаващ се от този за маркиране на дървета за сеч или друга съществуваща маркировка в района. Символът за наличието на къщичка за птици представлява бяла окръжност с жълт кант по края (Снимка 4), а за прилепите - оранжева окръжност с бял кант (Снимка 5).



Снимка 4. Символ, обозначаващ наличието на къщичка за птици

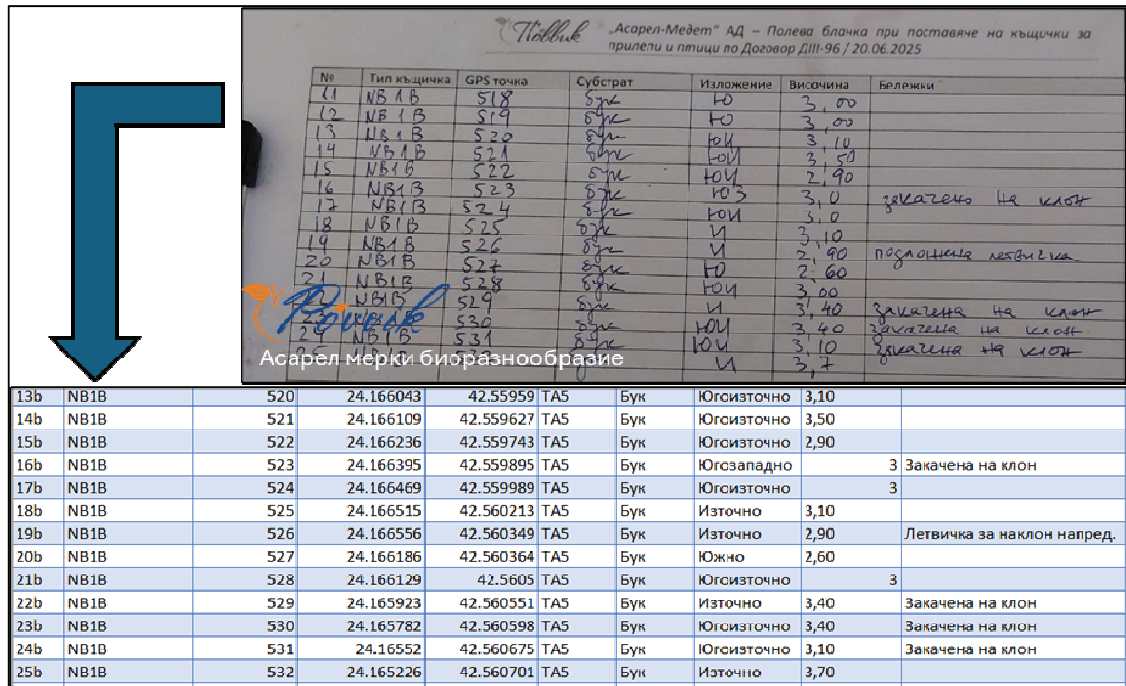


Снимка 5. Символ, обозначаващ наличието на къщичка за прилепи



Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия

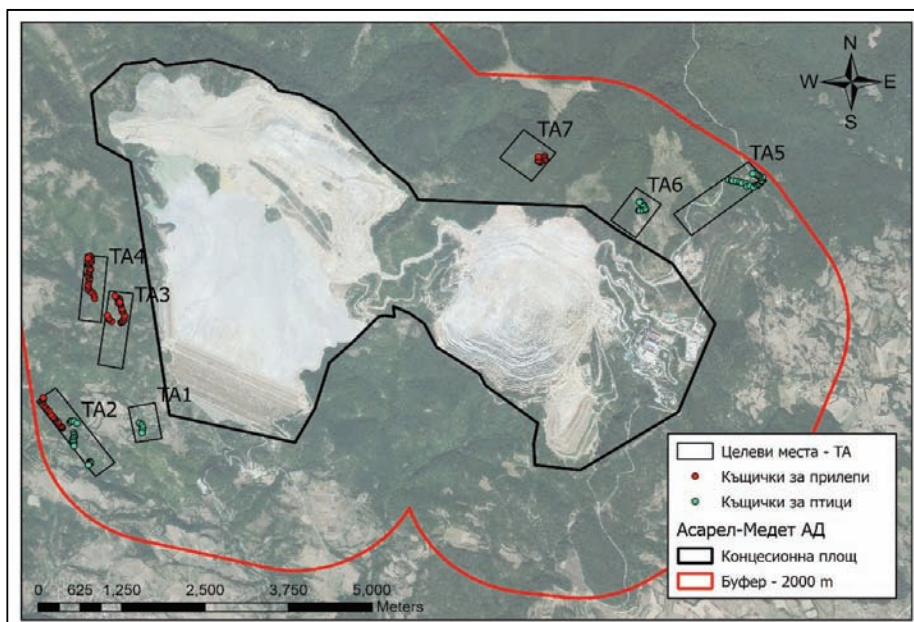
При изпълнението на дейността на терен се вземат GPS координати на всяка позиционирана къщичка, данни за дървесния вид, върху който е поставена, приблизително отстояние от земята, изложение и др. Информацията се попълва в полева бланка, изготвена за целите на проекта, вследствие на което данните се интегрират в електронна база данни и ГИС за допълнителна обработка (Фигура 16).



Фигура 16. Полева бланка и база данни с информация за местата на разположение на къщичките

7. Резултати от изпълнение на полевите дейности

Къщичките са поставени на 7 различни места (ТА), представени и описани в доклада от Етап 1. (Фигура 17). Местата на поставяне се намират в горски местообитания, които са с наличие на просвет през по-голямата част от деня, но и защитени от вятъра.



Фигура 17. GPS точки на поставените къщички за прилепи и птици



С цел направата на анализи от последващ мониторинг и сравнимост на резултатите къщичките са разпределени в различни райони по надморска височина, видов и възрастов състав на горските територии и др. При поставянето са избрани различни изложения и височини.

7.1. Прилепи

Къщичките за прилепи са поставени в 4 от целевите места, а именно ТА2, ТА3, ТА4 и ТА7. Обособените маршрути включват както къщички само от единия тип, така и смесени маршрути от двата типа къщички (Снимка 6 и Снимка 7):

- Тип BV2F – Подходящ както за сформирание на майчини колонии, така и като място за почивка и временно убежище. Този тип къщички има един входен отвор отпред, представляващ вариант за достъп за прилепите и конусовиден покрив, осигуряващ място за голям брой прилепи.
- Тип BV2FN – Аналогично на горния модел и този е подходящ както за майчини колонии, така и като място за почивка и временно убежище. За разлика обаче този тип къщичка е с два варианта за достъп: преден и долен отвор, като прилепите могат да кацнат на ствола на дървото и да се изкачат отдолу или да отлетят директно от широката входна зона отпред. Също така притежава междинен под, който осигурява допълнителна защита срещу малки хищници, течение и ярка светлина. Убежището е до голяма степен самопочистващо се, тъй като гуаното може да падне от дъното на кухнята.



Снимка 6. Къщичка за прилепи, модел: Bat Box 2F



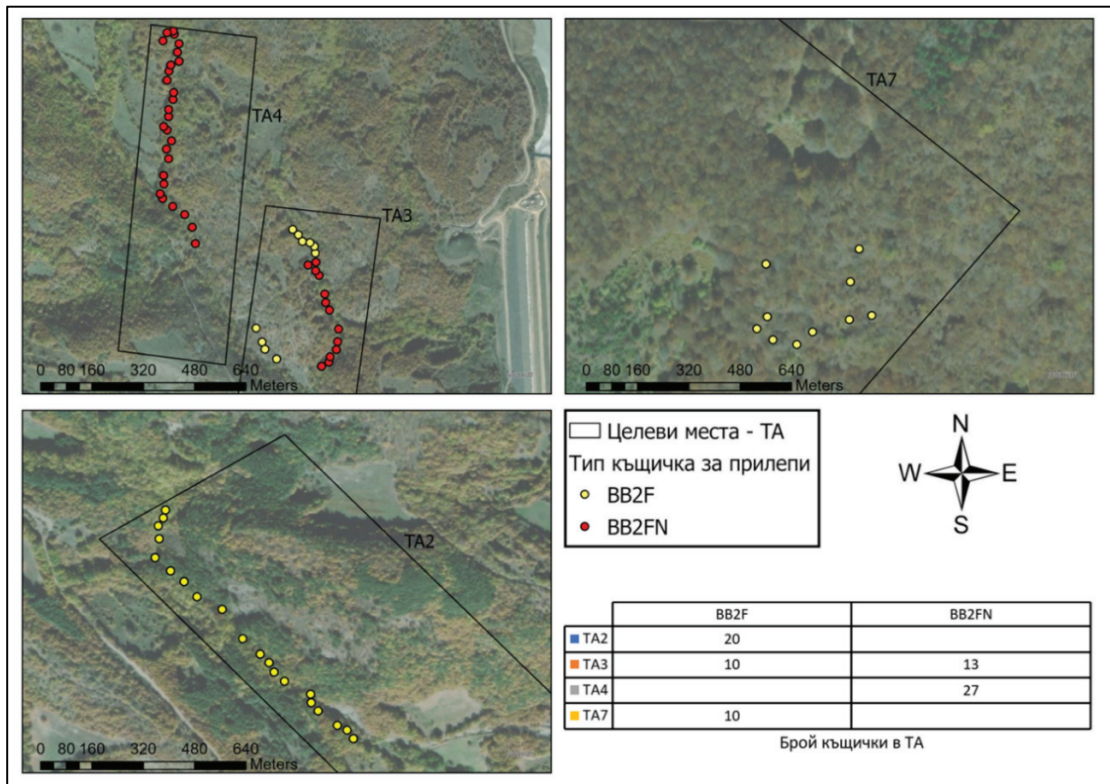
Снимка 7. Къщичка за прилепи, модел: Bat Box 2FN



В ТА2 и ТА7 са поставени къщички от тип BV2F, в ТА4 от тип BV2FN, а в ТА3 е съставен смесен маршрут от двата типа къщички (Фигура 23).

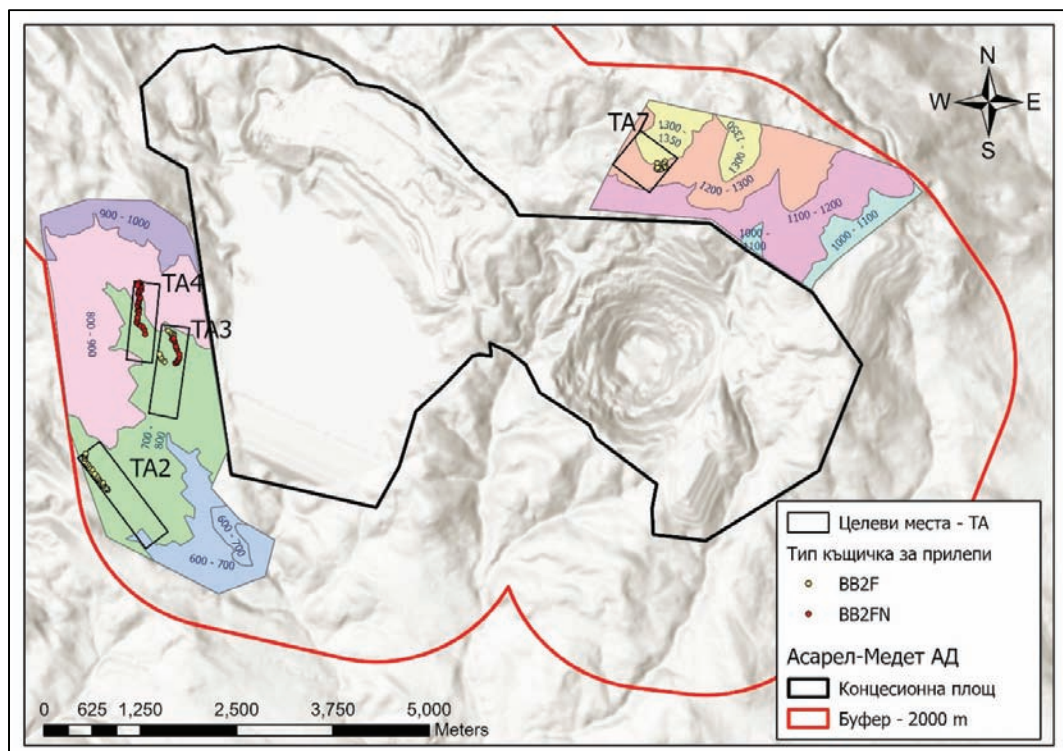


Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия



Фигура 18. GPS точки на поставени къщички за прилепи в съответните ТА

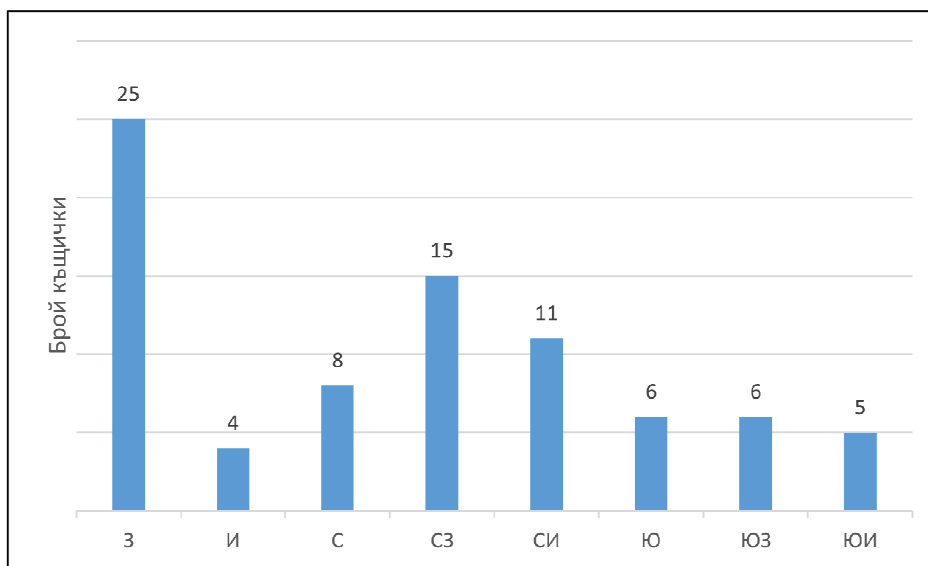
Видно от Фигура 18 къщичките за прилепи са поставени в 3 диапазона надморски височини, а именно: 700 – 800 м, 800 – 900 м и 1200 – 1300 м. Това са оптималните за целевите видове надморски височини.



Фигура 24. Разпределение на къщички за прилепи спрямо елевациите на терена

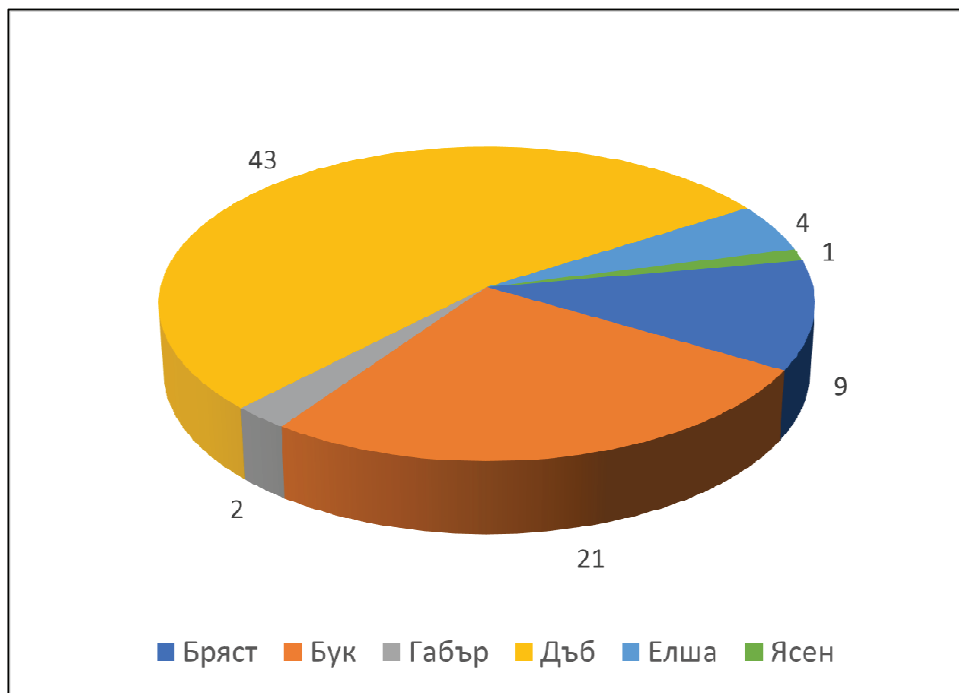


Тъй като по отношение на изложението е най-добре да се осигурят редица различни опции за прилепите, така че те да могат да избират най-подходящата температура въз основа на своите нужди, къщичките са поставени с различна ориентация - в 8 различни посоки, както е представено на Фигура 19.



Фигура 19. Изложение на къщички за прилепи спрямо посоките на света

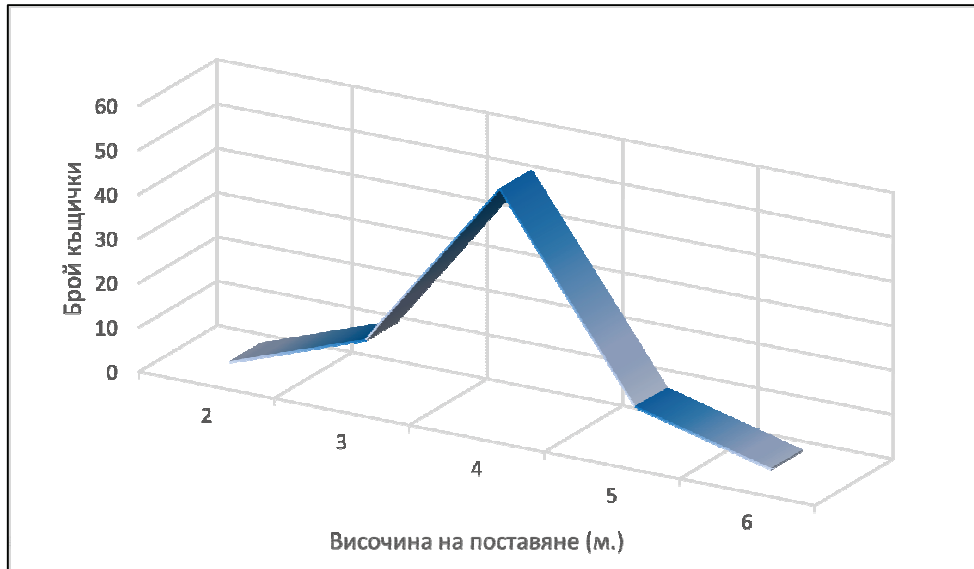
По отношение на субстрата, къщички са поставени на 6 различни дървесни вида, като най-много са монтирани на дъб и бук (Фигура 20), които са сред най-предпочитаните за убежища от целевите видове прилепи.



Фигура 20. Субстрат на поставяне на къщички за прилепи



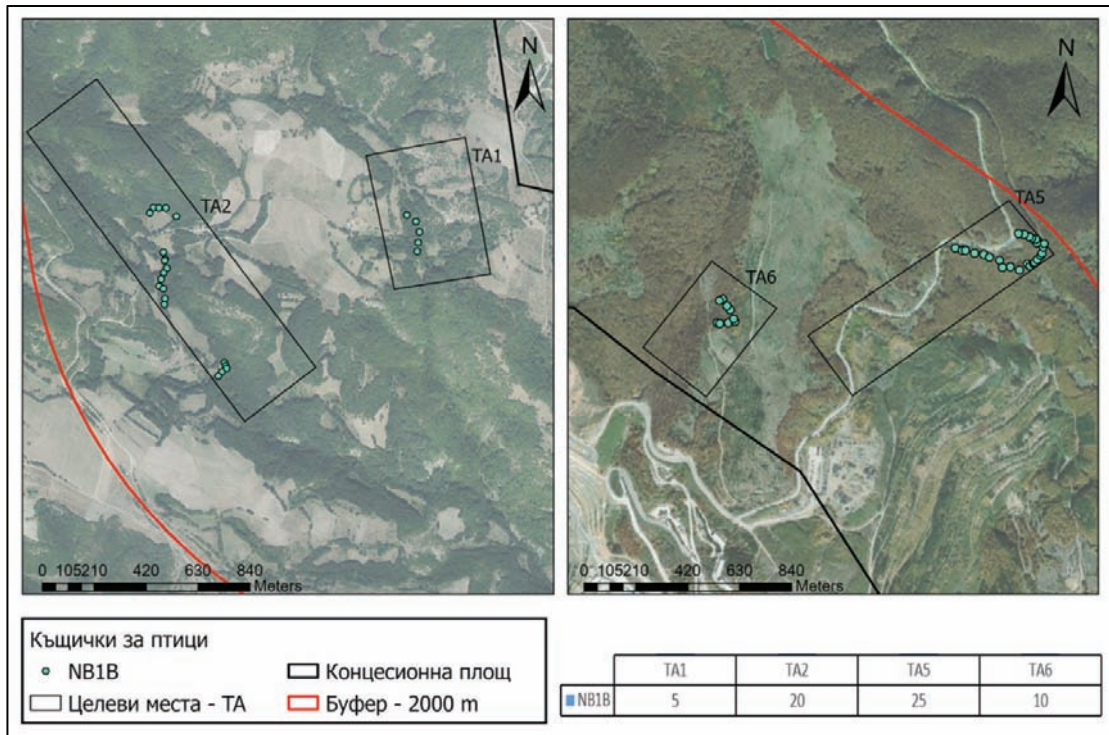
На Фигура 21 е показано височинното разпределение на къщичките спрямо земната повърхност, като болшинството къщички са поставени във височинния диапазон между 3 и 5 м. Избраните височини на поставяне са достатъчни, за да осигурят защита на къщичките от наземни хищници и недоброжелатели, като същевременно не затрудняват последващата им проверка.



Фигура 21. Височина на поставяне на къщички за прилепи

7.2. Птици (мухоловки)

Къщичките за птици са поставени в 4 от целевите места, а именно TA1, TA2, TA5 и TA6 (Фигура 22), като са съставени общо 6 маршрута в тях.



Фигура 22. GPS точки на поставени къщички за птици в съответните ТА



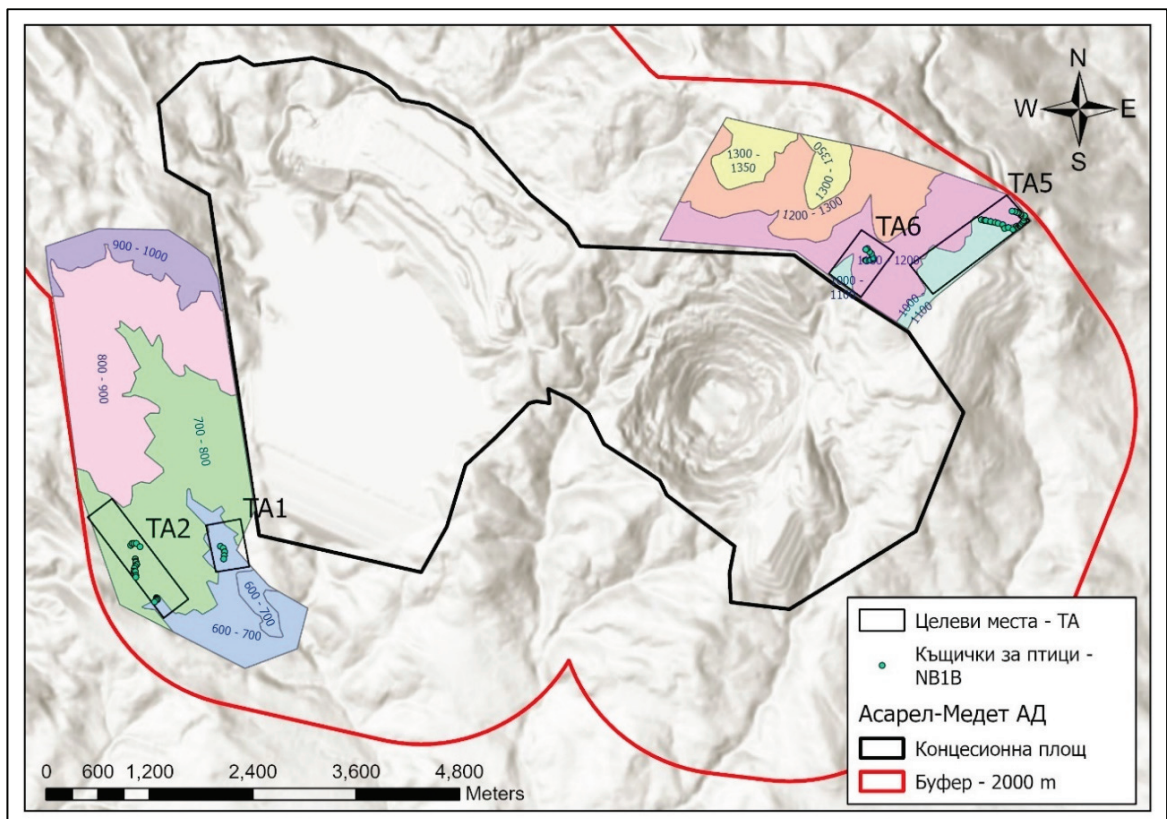
Използваният модел къщичка е от серията на Nest Box 1B (NB1B):

- NB1B – Този тип къщички осигурява оптимални условия за пойни птици, като имитира максимално условията в естествените убежища на птиците. Овалният отвор с диаметър 32 мм е идеално пригоден за мухоловки, като същевременно не позволява навлизането на прекомерно количество светлина и ограничава влизането на по-едри хищници.



Снимка 8. Къщичка за птици, модел: Nest Box 1B (NB1B)

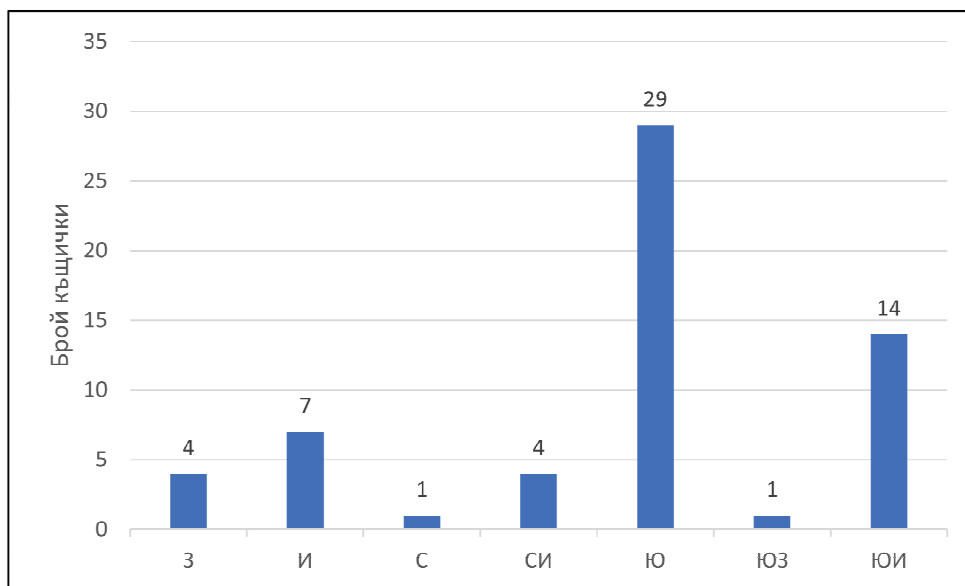
Съставените маршрути попадат в 4 диапазона надморски височини, а именно: 600 – 700 м, 700 – 800 м, 1000 – 1100 м и 1100 – 1200 м (Фигура 23). Това са надморските височини, които целевите видове мухоловки главно обитават.



Фигура 23. Разпределение на къщички за прилепи спрямо елевациите на терена

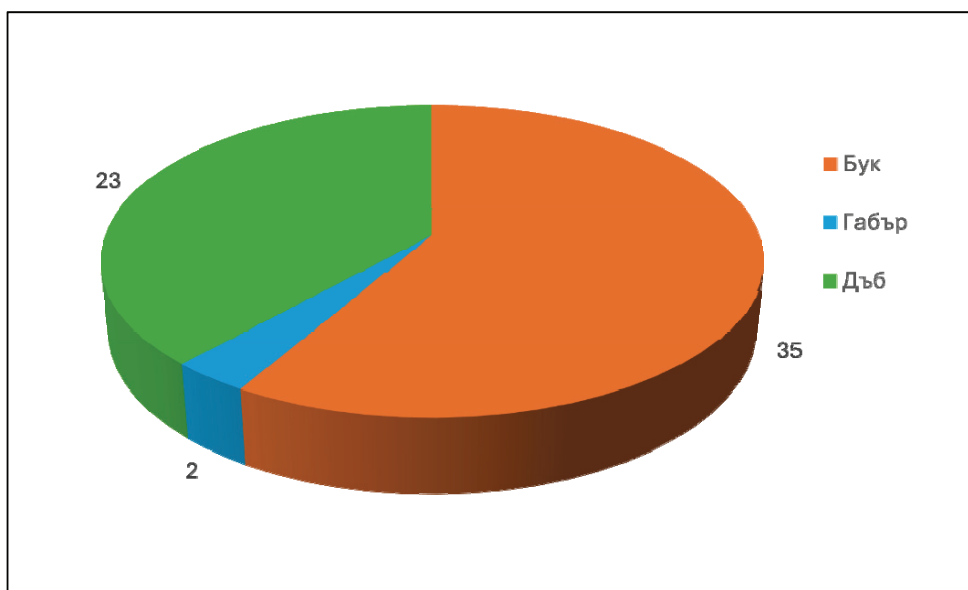


Както е представено на Фигура 24 къщичките за птици са поставени в 7 различни посоки. С оглед на това, че входовете на повечето естествени убежища (хралупи) са изложени на юг, което се счита за предпочитано изложение, болшинството от къщичките са позиционирани с южна ориентация.



Фигура 24. Изложение на къщички за птици спрямо посоките на света

По отношение на субстрата, къщички са поставени на 3 различни дървесни вида, а именно – бук, дъб и габър, където основно гнездят целевите видове мухоловки (Фигура 25).

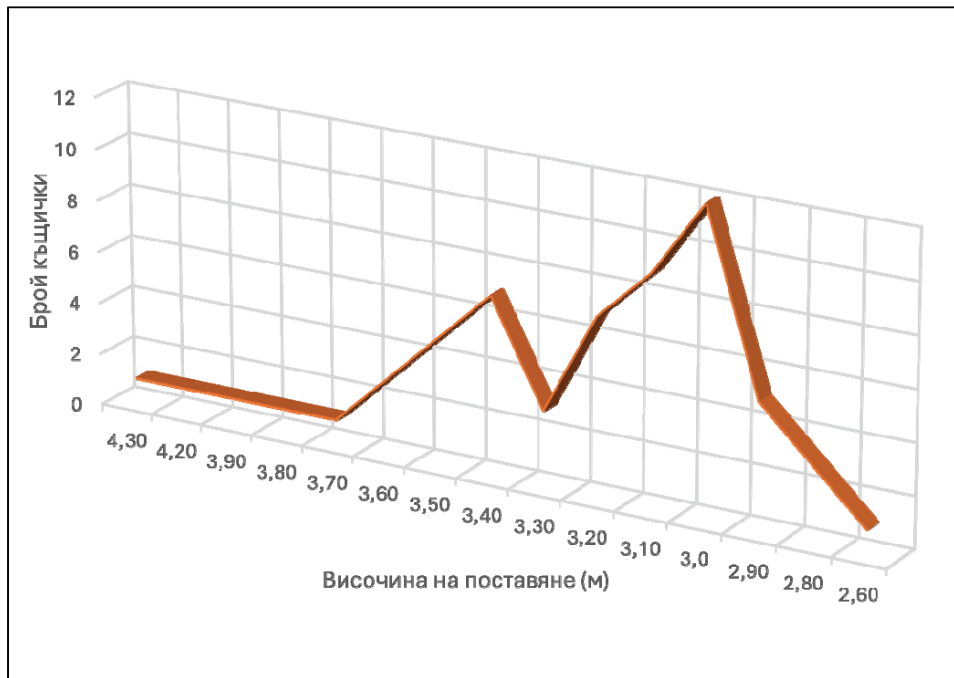


Фигура 25. Субстрат на поставяне на къщички за птици

От съществено значение за гнездовия успех на мухоловките е височината на гнездото над земята, тъй като до голяма степен от това зависи оцеляването на люпилото, поради риск от



хищничество. С цел ограничаване на хищническите набези болшинството къщички са поставени на височина над 3 м (Фигура 26).



Фигура 26. Височина на поставяне на къщички за птици

8. Заключение

В гранични райони на концесионната площ на „Асарел-Медет“ АД са поставени 80 къщички за прилепи (модел: BB2F и BB2FN) и 60 къщички за птици (модел BB1B). Къщичките са поставени в целеви площи (ТА), като тези за прилепи, както и тези за птици са разпределени съответно в 4 различни места:

- Къщички за прилепи – ТА2, ТА3, ТА4 и ТА7;
- Къщички за птици – ТА1, ТА2, ТА5 и ТА6.

По този начин са обхванати различни райони по надморска височина и характеристики на местообитанията като видов и възрастов състав на дърветата и др. Също така чрез този подход се изпълни условието за къщичките за птици да бъдат разпределени в поне три района.

9. План за последващ мониторинг

Целта на мониторинга е да даде количествена информация за изчисляване на динамиката и плътността на заемане на къщичките. Също така ще даде информация дали са необходими корекции в подхода на работа, в т.ч. и мониторинга. Той включва проверки на къщичките за прилепи и къщичките за птици три пъти в годината. Тези проверки ще бъдат съобразени със сезонната екология на целевите видове, т.е. основните периоди от жизнената им активност, показани на следващата схема.

Мониторингът ще се осъществява съгласно по-долу представения план.

При проверката ще се използва специална бланка и оборудване. Като част от дейностите по мониторинг в края на размножителния сезон ще се извършва и почистване на къщичките от гнездови материал с цел превенция от опаразитяване, както и премахване на гнезда на съсели, оси и други нецелеви видове.



Научно-технически съюз по минно дело, геология и металургия

Важни за целевите видове периоди, имащи отношение към графика за мониторинг

Вид	Период	Януари	Февруари	Март	Април	Май	Юни	Юли	Август	Септември	Октомври	Ноември	Декември
<i>Ficedula parva</i>	Гнездене и отглеждане на малките												
	Миграция												
<i>Ficedula semitorquata</i>	Гнездене и отглеждане на малките												
	Миграция												
<i>Barbastella barbastellus</i>	Отглеждане на малки												
	Миграция и зимуване												
<i>Myotis bechsteinii</i>	Отглеждане на малки												
	Миграция и зимуване												

План за мониторинг

Период	Януари	Февруари	Март	Април	Май	Юни	Юли	Август	Септември	Октомври	Ноември	Декември
Къщички за птици												
Къщички за прилепи												



РЕЗУЛТАТИ ЗА КАЧЕСТВО НА СЕДИМЕНТИ ОТ БАСЕЙНИТЕ НА Р. ЮГОВСКА И Р. ЧЕПЕЛАРСКА С ПРИЛОЖЕНИЕ НА ХАРМОНИЗИРАН ПРОТОКОЛ SIMONA СЪГЛАСНО ЕВРОПЕЙСКАТА РАМКОВА ДИРЕКТИВА ЗА ВОДИТЕ (WFD EU2000)

Златка Милаковска¹, Милена Вецева¹, Петьо Филипov¹, Ирена Пейчева¹, Атанас Хиков¹, Лора Биджова¹, Валентин Ганев¹, Даниел Ишлямски²

¹Геологически институт, Българска академия на науките, e-mail: zlatkam@geology.bas.bg;

²Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, e-mail: danielishlyamski@geophys.bas.bg

SEDIMENT QUALITY RESULTS FROM THE YUGOVSKA AND CHEPELARSKA RIVER CATCHMENTS USING THE HARMONIZED SIMONA PROTOCOL IN ACCORDANCE WITH THE EUROPEAN WATER FRAMEWORK DIRECTIVE

Zlatka Milakovska¹, Milena Vetseva¹, Petyo Filipov¹, Irena Peytcheva¹, Atanas Hikov¹, Lora Bidzhova¹,
Valentin Ganev¹, Daniel Ishlyamski²

¹Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, e-mail: zlatkam@geology.bas.bg; ²National
Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, e-mail:
danielishlyamski@geophys.bas.bg

РЕЗЮМЕ

Изследването представя минералого-геохимични и полеви магнитметрични данни за седименти (дънни±суспендирано вещество и в активни заливни) в три мониторингови пункта от басейна на р. Марица: Юговско ханче, Бачково и Устие на р. Чепеларска. В дънните седименти стойностите на Cd, Pb и Zn в пунктове Югово и Бачково са близки и варират около стойностите на БГ_{интерв} за почви, а в пункт Устие на р. Чепеларска са значително по-високи. В седиментите от активните заливни тераси концентрацията на същите елементи са с най-високи стойности (надвишаващи БГ_{интерв}) в пункт Юговско ханче и намаляват с отдалечаване от района с минно-добивна дейност. Тенденцията на разпределение на стойностите на живака е обратна – те са най-високи в седиментите от активната заливна тераса в пункт Устие на р. Чепеларска и предполагат различен източник. Измерените вариации на обемната магнитна възприемчивост в дълбочина до 50 см открояват нива със завишени съдържания на минерални фази с магнитни свойства.

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на интелигентни методи и технологии за проучване, добив и ефективна преработка на първични руди в минералните находища на България е възможно единствено при едновременна оценка на въздействието им върху екосистемите. Социално-икономическите и екологичните аспекти натежават значително при вземането на решения още в геолого-проучвателния етап на изследване на минерални находища, независимо от включването на 34 елемента/група елементи и минерали в списъка на суровините от критично значение за европейската икономика (<http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>). Мерките за предвиждане и отстраняване на потенциалния риск за екосистемите в райони с настояща или историческа минно-добивна дейност стартират с мониторинг на качеството на елементите на околната среда и са сред основните цели на проект REXPro - Устойчиво и ефективно проучване, добив и преработка на критични и стратегически суровини в медно-златни и полиметални находища в България: от рудата до хвостохранилището, финансиран от



Следващо Поколение ЕС по Плана за Възстановяване и Устойчивост, договор № ПБУ-11 BG-RRP-2.011-0040-C01/C02). Проектът е фокусиран върху най-чувствителните към въздействието от минно-добивната дейност седименти от реките (дънни ± суспендирано вещество и в активни заливни тераси), тъй като те могат да концентрират тежки метали в неразтворима форма.

Мониторингът на 45 опасни вещества (hazardous substances, HSs) в седиментите на повърхностните води е регламентиран от Рамковата директива за водите (РДВ) на ЕС (ЕС 2000) и Директива 2013/39/EU (ЕС 2013). За да се достигне до общи знания и умения за оценка на качеството на седиментите от правителствени органи, секторни агенции, публични органи и академични институции, в международен проект SIMONA (Система за информация, мониторинг и оценка на качеството на седимента), финансиран от Транснационалната програма за река Дунав (DTP) на Европейския съюз, бяха изготвени и тествани хармонизирани подходи и протоколи. Резултатите от изследванията в басейна на река Дунав показаха тяхната надеждност и ефективност (Šorša A. & the SIMONA Project Team, 2019; Vijdea et al., 2022; Hikov et al., 2023). В настоящото изследване тези протоколи за подбор на мониторингови пунктове, опробване, транспорт, пробоподготовка, геохимични анализи и оценка на качеството на седиментите са приложени в басейните на реките Юговска и Чепеларска като част от водосборния басейн на р. Марица. Така се дава възможност за верифициране на протоколите за оценка на статуса и тенденциите в замърсяването с тежки метали и живак в различен речен басейн и за ускоряване на широкото им приложение от секторни агенции и публични органи в България. Изследванията са допълнени от минералого-геохимични и неструктурни магнитометрични изследвания за оценка на съдържанието на силномагнитни железни окиси, съпътстващи емисиите на антропогенните източници на замърсяване (Petrovsky et al., 2000).

ЛИТОЛОЖКИ И ГЕОМОРФОЛОЖКИ ОСОБЕНОСТИ НА ВОДОСБОРНИЯ БАСЕЙН НА Р. ЧЕПЕЛАРСКА

Река Чепеларска, десен приток на река Марица, е с дължина 86 км и площ на водосборния басейн 1010 км² (Христова, 2012). Главната река извира от западните склонове на връх Рожен в района на „Царските ливади“ в Западните Родопи с надморска височина от 1550 м. Тя отводнява източните склонове на рида Чернатица, северозападните части на ридовете Преспа и Добростан в Западните Родопи. Релефът се характеризира с голям наклон. Той е планински в горното и средното течение на реката, с остри била с различна дължина и посока, някои от които лишени от растителност. В северните части релефът е полупланински и равнинен. Гъстата хидрографска мрежа, значителните валежи и силно пресеченият терен са предпоставка за силни ерозионни процеси. В горната си част, до Асеновград, реката тече в дълбока, тясна и красива клисура с две малки долини разширения – в района на град Чепеларе и на село Хвойна. В долния си участък тя преминава през плитка и широка долина в Горнотракийската низина. Река Чепеларска се влива в река Марица на около 10 км източно от град Пловдив. Реката е с дъждовно-снежно подхранване, с максимум през април-май и минимум през август. Средногодишният отток при с. Бачково е 12 м³/с, като оттокът през горещите летни месеци е под 1 м³/с (Христова, 2012).

Както в геоморфоложко, така и в геоложко и хидрогеоложко отношение поречието на р. Чепеларска попада в две съвсем различни по характер зони. По-голямата част (горно и средно течение) е разположена в обсега на Родопския масив, а долното течение е в обсега на Горнотракийската низина. В Родопския масив реката пресича основно метаморфни скали (различни видове гнайси, шисти и амфиболити, Кожухаров и др., 1991), в изветрителната зона на които са се формирали пукнатинни води (Антонов, Данчев, 1980). В повечето случаи р. Чепеларска дренира подземните води. В отделни участъци реката пресича тела от мрамори с пукнатинно-карстови води в тях. Втората зона е разположена в обсега на Горнотракийската низина, представляваща сложен тектонски грабен с блоково-мозаечен строеж, запълнен с дебела ценозойско-кватернерна покривка от различни по генезис (алувиални, пролувиални, делувиални и смесени между тях типове) неспоени разнозърнести седименти: валуни, чакъли, гравий, пясъци и по рядко алевролити, пясъчливи глини, глини (Кожухаров и др., 1992).



Река Юговска, десен приток на р. Чепеларска, е с дължина 45 km. Отводнява най-високите централни части на Преспанския дял на Западните Родопи. Река Юговска се образува в центъра на град Лъки от сливането на реките Джурковска и Манастирска. Влива се в р. Чепеларска на 485 m н.в., при Юговското ханче на шосето Пловдив–Смолян. Площта на водосборния ѝ басейн е 332 km², което представлява 32,9% от водосборния басейн на р. Чепеларска. Реката е с дъждовно-снежно подхранване, като максимумът е през май, а минимумът – през август. Средният годишен отток при село Югово е 6,27 m³/s.

Климатът е преходно-континентален. Влиянието на Егейско море оказва благоприятно влияние върху климатичните условия.

Според почвената карта на света (FAO SO ILS PORTAL, 2023) основните типове почви в изследвания район са кафяви горски почви и излужени канелени горски почви. Малки площи са покрити с планинско-ливадни, алувиално-ливадни, ливадно-канелени и ливадно-черноземни блатни почви. Горските площи обхващат склоновете на ридовете Чернатица, Добростан и Преспа и включват широколистни, иглолистни и смесени гори, естествени тревни съобщества, преходна дървесно-храстова растителност, голи скали и райони с рядка растителност. Земеделските земи са главно в Горнотракийската низина, а обработваемите земи са разположени предимно във високата речна заливна равнина с дълбоки и плодородни почви.

Химичното състояние на водите на р. Чепеларска е оценено от Gartsyanova et al. (2023) по данни от Изпълнителната агенция по околна среда на Министерството на околната среда и водите за повече от 10 физико-химични параметъра за периода 2015–2021 г. Авторите са приложили Канадския комплексен индекс за качество на водата (CCME-WQI) чрез комплексна и диференцирана оценка на състоянието на водата по отношение на нейното качество и са стигнали до заключението, че промишлените дейности в района, извършвани в продължение на десетилетия и днес, могат да се считат за източник на евентуален замърсител, довел до повишено съдържание на тежките метали Cu, Cd, Mn и особено Zn.

МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Мониторингови пунктове

Мониторинговите пунктове (МП) за опробване с цел изследване качеството на речните седименти са избрани по критерии, съгласувани с изисванията на протокола за пробовземане на проект СИМОНА, съобразен с препоръките на български и международни стандарти, както и с общата стратегия за прилагане на Рамковата директива за водите (2000/60/ЕО), Ръководен документ № 25.

МП Юговско ханче: Разположен е на левия бряг на р. Юговска, преди моста (Фиг. 1). Избран е като представителен за определяне на състава на дънни и седименти от заливната тераса преди вливането в р.Чепеларска, след хвостохранилище „Лъки“. В този участък реката е планинска и в нейните води няма достатъчно количество суспендирани седименти.

Екологичното състояние на повърхностните водни тела по долината на р. Юговска съгласно Плана за управление на речните басейни (ПУРБ) на Басейнова дирекция „Източнобеломорски район“ (БДИБР) (2022 – 2027 г.) се следи в МП BG3MA500R105, р. Юговска от р. Белишка до устие, хвостохранилище на Горубсо. По биологични и физико-химични показатели е оценено като умерено.

Концесионерът „Лъки Инвест“ АД, е свързан с добива в две действащи подземни мини („Джурково“ и „Говедарника“), транспорта и обогатяването на добиваната руда в Обогатителна фабрика (ОФ). Жилните находища „Джурково“ и „Говедарника“ са със сулфидна Pb-Zn минерализация, образувана в резултат от олигоценска магмена и хидротермална активност (Georgieva et al., 2024). Добиваната руда се преработва в ОФ по многостадийна схема на флотация за получаване на оловни и цинкови сулфидни концентрати, които се обработват металургично в Комбинат за цветни метали (КЦМ) АД, Пловдив. Отпадъкът от ОФ се депонира в хвостохранилище „Лъки-2 комплекс“, след 2010 г. - в неговата част „Лъки-2 временно“. Съоръжението е проектирано през 1985 г. и е въведено в експлоатация през 1987 г. Изследванията на химичния състав на хвост от хвостохранилище „Лъки-2 комплекс“ показват съдържание на SiO₂, >60%, Al₂O₃ ≤10%, CaO ≤ 7% и др., които отразяват



разпределението на минералите в хвостохранилището (Stanimirova et al., 2023). Тежките метали, които се съдържат се в праха и имат значение за химическото замърсяване на почвите, са олово (0,18%), цинк (0,30%) и манган (0,30%.) Установено е, че при скорост на вятъра над 5 м/сек. и сухо време, най-фините хвостови фракции се отвяват, и по всяка вероятност, се отлагат върху прилежащите терени. Извършена е и рекултивация на изведеното от експлоатация старо хвостохранилище „Лъки 1“ в периода 2011-2014 година. Изготвен е и Работен проект за рекултивация на депонирания отпадък в хвостохранилище „Лъки-2-комплекс“.



Фигура 1. Карта с местоположението на опробваните мониторингови пунктове (Jug-JugH - МП Юговско ханче, Cherp-Bach - МП Бачково, Cherp-Mar - МП Устие на р. Чепеларска).

МП Бачково: Намира се на левия бряг на р. Чепеларска, след с. Бачково, при втория тунел, при завоя на стария път Асеновград - Чепеларе (Фиг. 1). Местоположението му се различава от това на МП BG3MA00523MS0600 за опробване на седименти за приоритетни вещества и биота от БДИБР - р. Чепеларска, с. Бачково. В този участък реката е планинска и в нейните води няма достатъчно количество суспендирани седименти. Хидрометрична станциостанция „Бачково“ характеризира най-добре особеностите на режима на р. Чепеларска преди навлизането ѝ в Горнотракийската низина. Средномногогодишното водно количество, изчислено за периода 1961 г. - 1998 г., е около 9 м³/s, максималното е 50 м³/s, а минималното - <1 м³/s. Водите на р. Чепеларска се използват за добив на електричество. Изградени са две хидроенергийни системи, състоящи се от: 1 - бараж на реката, отвеждаща деривация и ВЕЦ, от където използваната вода се връща в реката; 2 - система „Асеница-2“, изградена през 1953 г. и разположена в северните склонове на планината.

Екологичното състояние/потенциал на повърхностните водни тела по долината на р. Чепеларска от р. Юговска до град Асеновград и река Луковица съгласно ПУРБ (2022 – 2027 г.) се следи в МП BG3MA500R104. Те са с биологични показатели в добро състояние, а физико-химични показатели и екологично състояние/потенциал – в умерено състояние.

МП Устие на р. Чепеларска: Разположен е при устието на река Чепеларска, в района на стария мост Кемера (Фиг. 1). Съвпада с МП BG3MA005213MS0570 за опробване на седименти за приоритетни вещества и биота от ПУРБ на БДИБР в периода 2022-2027 г., р. Чепеларска - преди устие и е приблизително близко до МП за оперативен мониторинг на повърхностни води - Садово. МП Устие на р. Чепеларска се намира на десния бряг на реката, между стария и новия мост на пътя Пловдив–Хасково, на 5 км западно от Садово. Избран е като представителен за определяне на състава на суспендирани, дънни и седименти от активната заливна тераса. Предполага се антропогенно замърсяване от индустриални източници (предприятие за пестициди Агрис АД, КЦМ АД), заустване на отпадъчни води от големи населени места (Асеновград, >45000 жители), интензивно земеделие, интензивен



автомобилен трафик. В този МП р. Чепеларска е с умерен до значителен воден отток, умерена до ниска скорост на течението и ниво на водата 0,3-0,5 м.

Избраните мониторингови точки са опробваани за изследване качеството на речни седименти през октомври 2024.

Пробонабиране

За да се събере достатъчно количество суспендирана утайка за анализ на качеството на суспендирания седимент (SS) е необходим голям обем проба, използвано е количество около 20 л. Вземането на проби от дънни седименти (BS) е извършено със събиране на материал от най-горния (5 cm) слой на активно отлагане на седимент с използване на лъжица от неръждаема стомана. Опитът и заключенията от Протокол СИМОНА изискват опробване на почвени профили от горен седиментен слой (5-10 cm дълбочина, FS/TS) и долен седиментен слой (45-50 cm дълбочина, FS/BS) с използване на лопати за подготвяне на профилите и неръждаем нож, шпакла или лопатка - за опробване за анализ на качеството на седименти. Всички проби са композитни – взети от 3 до 5 места по протежението на реката за дънните седименти и от 1-2 профила – за седиментите от заливните тераси. След приключване на опробването теренът е заравнен и почистен.

Приложени са мерките на протокол СИМОНА, които целят предпазване на пробите от външно замърсяване: използване на латексови ръкавици, премахване на бижута, използвани чисти съдове и прибори (лъжици и шпакли) и др.

С преносими електрически прибори (Hanna instruments) са измерени температурата, водородния показател (pH) за определяне на киселинността/алкалността и специфичната електрическа проводимост (EC) на речната вода във всеки МП. Измерена е и прозрачността/мътността на речната вода с диск на Секи. На място са направени снимки, документиращи всяка стъпка от процедурата за вземане на проби и записи на GPS координати на опробваните МП. Полевите листове на Протокол СИМОНА за пробовземане от речни седименти са попълнени за всеки тип опробван седимент.

Събраните седиментни проби са транспортирани в хладилни кутии (при около 4-5 °C) до Лабораторията за пробоподготовка към Секция Геохимия и петрология на Геологически институт (БАН).

Пробоподготовка и лабораторен анализ

Подготовката на пробите е извършена в Геологически институт, БАН. Тя включва сушене при стайна температура, последвано от хомогенизиране и сухо пресяване през сито 0,063 mm за по-едрите проби, съгласно протокола за качество на седиментите на SIMONA (Šorša et al., 2019). По-глинестите проби са мокро пресети през сито 0,063 mm. Анализирани е фракцията на седиментите <0,063 mm.

Минералният състав на седиментите е определен с апарат D8 Advance, Bruker, Co_{Kα} филтрувано лъчение в диапазона 2θ 4–80°, стъпка 0,02° и време на експозиция 1,5 s. Софтуерът Diffrac.Eva е използван за качествено и полуколичествено определяне (до 100%) на кристалните фази. Съдържанието на главните елементи е определено с приложение на рентгено-флуоресцентен анализ в Геолого-географски факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. Съдържанието на микроелементи е измерено в стопилки със система за LA-ICP-MS, състояща се от 193 nm ArF ексимерен лазер (ATLEX-LR, Германия) и Perkin-Elmer ELAN DRC-е квадруполен индуктивно свързан плазмен масспектрометър. Съдържанието на живак е определено с двуклетъчен двулъчев DMA-80 Euo директен живачен анализатор (Milestone, Inc.).

Проведени са теренни измервания на магнитната възприемчивост (K) в дълбочина по профилите на всеки 5 cm на опробваните седименти от МП. Използван е полеви капаметър КТ - 5 (AGICO, Czech Republic) с чувствителност 1×10^{-5} SI. За всеки дълбочинен интервал от отделните разкрити профили за всеки МП са направени две независими измервания. Пресметнати са средните стойности на K в дълбочина.

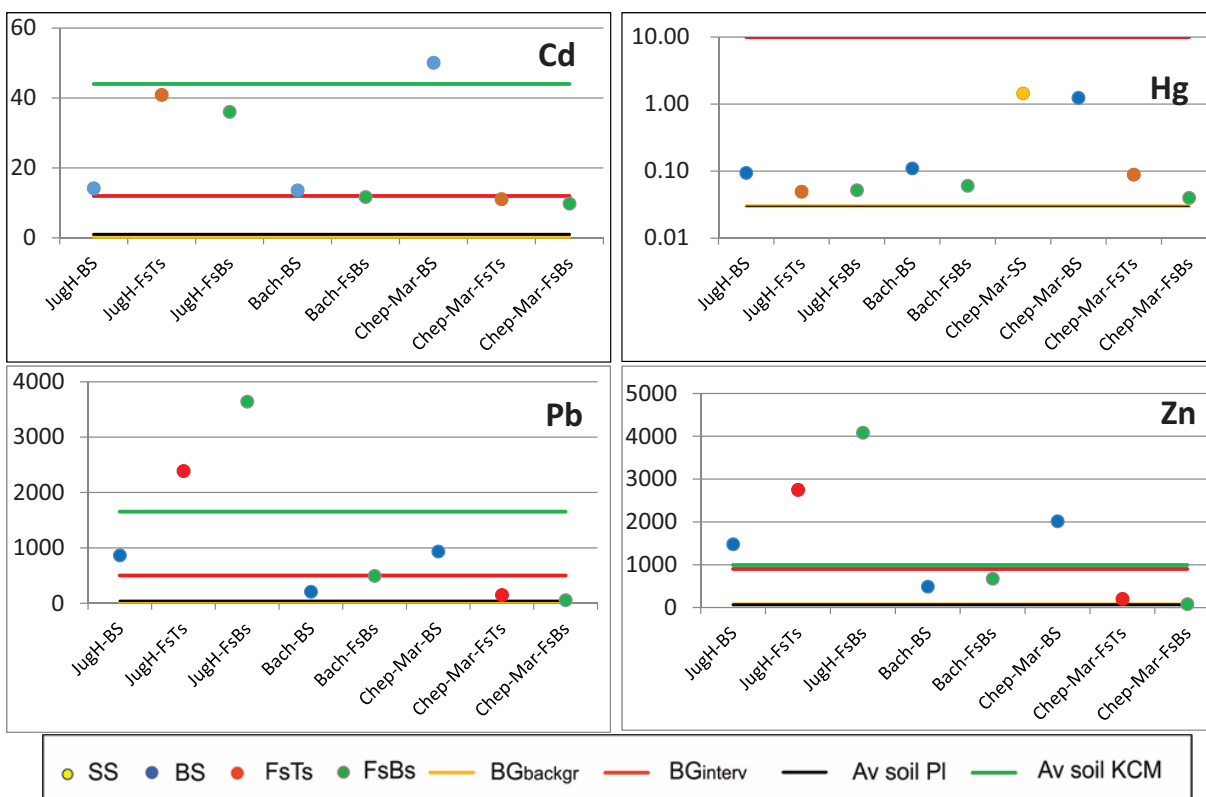


Оценка на качеството на седиментите

В България няма стандарти за оценка на качеството на речните седиментите и се прилагат методи са определяне на тенденциите в замърсяванията, статуса на седиментите и нуждата от прилагане на допълнителни мерки за неговото подобряване. Получените при изследването резултати са сравнени с фоновите концентрации за тежки метали и металоиди в почвите (БГ фон) и нормите за интервенционни концентрации за тежки метали и металоиди в почвите на обработваеми земи и постоянни тревни площи, Наредба № 3/01.08.2003, определени във фракция <2 mm. За фоновите стойности на тежките метали в района са използвани данните за средните им съдържания във фракция <0.063 mm в Пловдивското поле (Av soil PI) и в района на Комбинат за цветни метали (КЦМ, Av soil KCM) на Стоилкова и др. (2016).

РЕЗУЛТАТИ

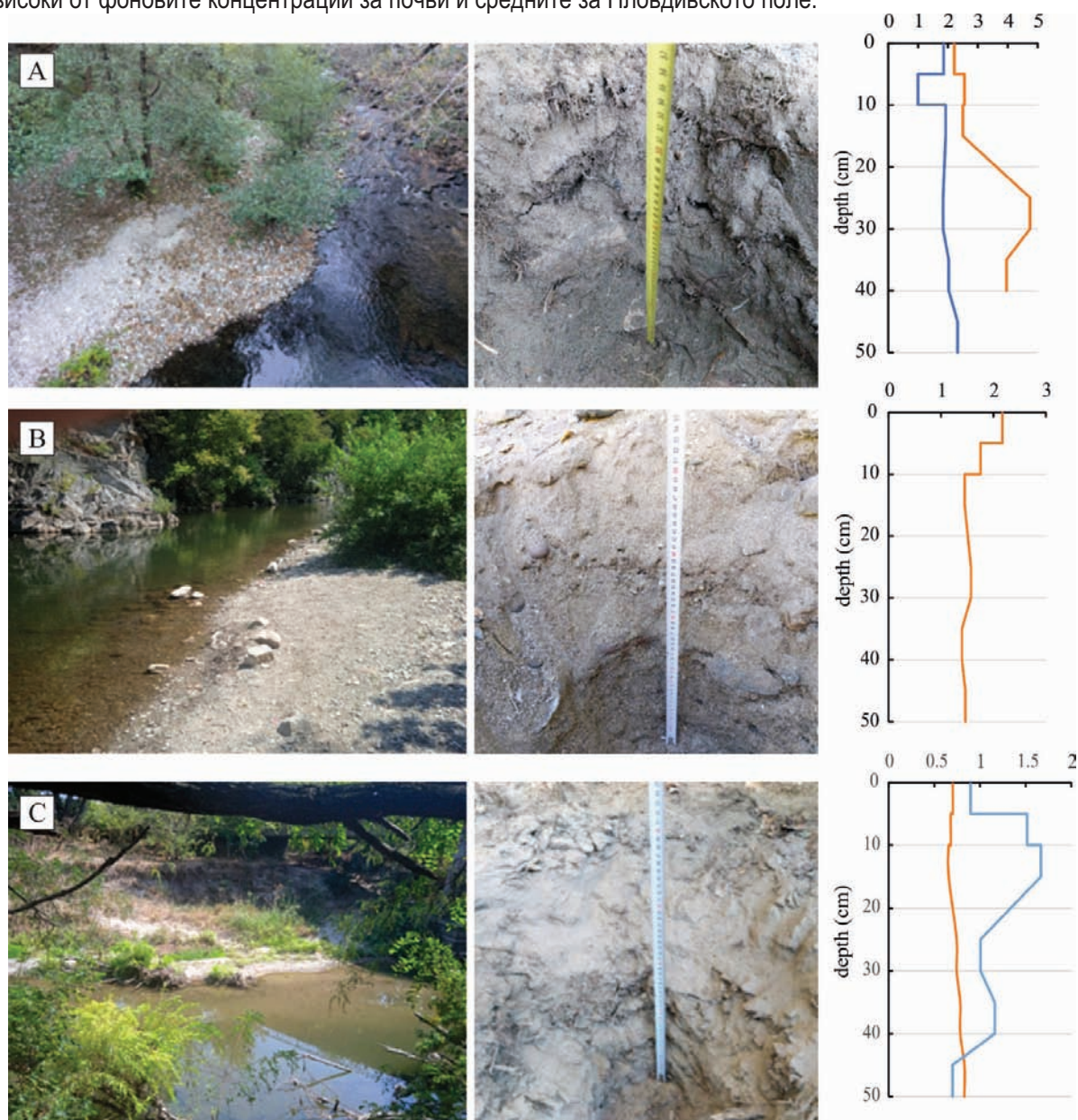
МП Юговско ханче: Минералният състав на дънния седимент е основно от кварц, калцит, албит, монтморилонит и в по-малко количество – от мусковит, клинохлор и амфибол. Речните води са с рН 9.5 и ЕС 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Дънните седименти се отличават със стойности за Cd, Pb и Zn превишаващи БГ_{интерв} норми. С тойностите за Hg са по-ниски от БГ_{интерв} норми, но са по-високи от фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле.



Фигура 2. Разпределение на концентрациите на Cd, Pb, Zn и Hg (mg/kg) в седиментите на р. Юговска и р. Чепеларска в сравнение с фоновите концентрации за тежки метали и металоиди в почвите в България (BG_{backgr}), нормите за интервенционни концентрации за тежки метали и металоиди в почвите на обработваеми земи и постоянни тревни площи (BG_{интерв}), Наредба № 3/01.08.2003, средните стойности за почви в Пловдивското поле (Av soil PI) и в района на Комбинат за цветни метали АД (Av soil KCM; Стоилкова и др., 2016).

Минералният състав на седиментите от активната заливна тераса е близък, сходен до състава на дънния седимент, представен от кварц, калцит, албит, монтморилонит и мусковит, санидин във

вариращи количества и в малко количество клинохлор, доломит и амфибол. В тези седименти и двете стойности за Pb и Zn превишават $BG_{интерв}$ и средните стойности за почви от Пловдивското поле и варират около средните стойности за почви от района на КЦМ АД. Стойностите за живак надвишават тези за $BG_{фон}$ норми за почви и средните за Пловдивското поле. За Pb и Zn стойностите за долния слой са по-високи и спадат - в горния слой. Стойностите за Hg в двете проби от седименти са близки, но по-високи от фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле.



Фигура 3. Общ изглед, разрез и стойности на магнитната възприемчивост ($\times 10^{-3}$ SI) на седиментите от активната заливна тераса на р. Юговска при МП Юговско ханче (А), р.Чепеларска при МП Бачково (В) и при МП Устие на р.Чепеларска (С).

Вариациите на магнитната възприемчивост и по-високите стойности на К за профил 2 на дълбочина 25 – 30 см в сравнение с тези за профил 1 на същата дълбочина (Фиг. 3А) показват значителни пространствени изменения в съдържанието на силно магнитни минерали в различните дълбочинни интервали. Тези особености са маскирани и усреднени в геохимичните анализи при вземането на композитни проби.



МП Бачково: Речните води при МП Бачково са с рН 10.1 и ЕС 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$. В дънния седимент съдържанието на Cd, Pb, Zn и Hg е по-високо от фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле, като това на Cd превишава стойностите за БГ_{интерв}.

Съдържанието на Cd, Pb, Zn и Hg в седиментите от активната заливна тераса е изследвано само в долния слой. Горният слой е изграден предимно от разнорънесты пясъци с незначително количество фракция < 0.063 мм и не е изследван. Съдържанието на Cd, Pb и Zn варира около БГ_{интерв} норми. Съдържанието на живак е близко, но превишава фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле.

Теренните измервания на магнитната възприемчивост (K) в дълбочина по профила при МП Бачково (Фиг. 3В) показват повишени стойности в седиментите от горния слой, докато седиментите от долния слой на заливната тераса са по-слабо магнитни. Абсолютните стойности на K в горния слой са сравними с тези за профила при МП Юговско ханче.

МП Устие на р. Чепеларска: При този МП водите на р. Чепеларска са с рН 9.3 и ЕС 1810 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Тук реката е полупланинска, тече с по-ниска скорост и е опробвана за суспендирани, дънни и седименти от заливната тераса.

Суспендираният седимент е изграден главно от кварц, калцит, албит и мусковит и в по-малко количество – от клинохлор, каолинит, доломит, халит, брошантит. Количеството на суспендирания седимент е незначително. Анализирано е само съдържанието на Hg, което надвишава стойностите на фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле, но е по-ниско от БГ_{интерв} норми.

Минералният състав на дънния седимент е представен основно от кварц, калцит, албит, мусковит, клинохлор и от по-малко количество монтморилонит, амфибол и доломит. Съдържанието на Cd и Zn превишава както БГ_{интерв} норми, така и средните стойности за почвите в района на КЦМ. Стойностите за Pb са по-високи от БГ_{интерв} норми, но са по-ниски от средните стойности за почвите в района на КЦМ. Стойностите за Hg са близки до тези, измерени в суспендирания седимент, т.е. по-високи от фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле, но по-ниски от БГ_{интерв} норми.

Минералният състав на седиментите от активната заливна тераса е близък, сходен до състава на дънния седимент, представен от кварц, калцит, албит и мусковит, санидин и клинохлор във вариращи количества и в малко количество – доломит, монтморилонит и амфибол. Съдържанието на Pb, и Zn е близко до фоновите концентрации за почви. Съдържанието на Cd е близко, вариращо около БГ_{интерв} норми. Стойностите за Hg са близки, но превишават фоновите концентрации за почви и средните за Пловдивското поле, като в горния слой съдържанието му е по-високо от това в долния. Специфична особеност е, че стойностите за Cd, Pb, Zn и Hg в седиментите от активната заливна тераса са по-ниски от тези в дънния седимент.

Измененията на стойностите на магнитната възприемчивост в дълбочина по двата индивидуални профила, от които са събрани композитните проби за геохимични анализи, показват значителни вариации. Магнитната възприемчивост на седиментите от единия профил достига минимални стойности, измерени в дълбочина по изследваните профили (Фиг. 3С). В дълбочина по другия профил по-високи стойности се наблюдават в горните нива (5 – 15см).

ДИСКУСИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влиянието на местните геоложки, хидроморфоложки, геохимични и физични фактори върху концентрацията и разпределението на Cd, Pb, Zn и Hg се обсъжда като се следва основното течение на р. Юговска и р. Чепеларска. Изследваните проби показват отчетливи модели в разпределението на избраните метали между различните видове седименти и места на опробване.

В дънните седименти Cd, Pb и Zn имат сходно поведение. Стойностите са близки и варират около БГ_{интерв} в МП Юговско ханче и МП Бачково, и са значително по-високи в МП Устие на р. Чепеларска. Живакът е с най-високи стойности в МП Устие на р. Чепеларска, но те не превишават БГ_{интерв}. За седиментите от активните заливни тераси са характерни най-високи стойности за Cd, Pb и



Zn в МП Юговско ханче – по-високи от БГ_{интерв.} Тези стойности силно се понижават в МП Бачково и МП Устие на р. Чепеларска до стойности близки до БГ_{фон}, т.е. с отдалечаване от предполагаемия източник на тези метали, хвостохранилище „Лъки“. Тенденцията на разпределение на стойностите на живака е обратна – те са най-високи в седиментите от активната заливна тераса в МП Устие на р. Чепеларска, вероятно имат различен източник.

Повишените концентрации на метали в седиментите от основното течение на р. Юговска и р. Чепеларска представляват комбиниран ефект от: (1) директна (ре)мобилизация на минни отпадъци от хвостохранилище „Лъки“ и КЦМ АД депонирани в крайречни зони; (2) включване на метали от прахови фази чрез сорбционни процеси върху глини и др. с увеличаване на разстоянието от точковите източници; (3) антропогенно замърсяване от заустване на отпадъчни води от големи населени места (Асеновград, >45000 ж.), интензивно земеделие, интензивен автомобилен трафик и др.

Замърсяването с тежки метали (Cd, Pb и Zn) в седиментите от активните заливни тераси на р. Юговска и р. Чепеларска намалява надолу по течението на реката до МП Бачково. Важен акцент са и намаляващите съдържания на елементите и в дънните седименти, отразяващи моментното качество на седиментите в изследваните пунктове. Тенденцията на увеличаване на съдържанията на елементите в дънните седименти при МП устие на р. Чепеларска трябва да бъде проследена и правилно оценена.

Установените максимални концентрации на Cd, Pb и Zn в долния слой на седиментите от заливната тераса в МП Юговско ханче (Фиг. 2) кореспондират много добре с най-високите стойности на K, измерени в дълбочинния интервал 25 – 30 см на единия от профилите (Фиг 3А). Тенденцията на намаляване съдържанието на тежки метали надолу по течението на р. Чепеларска се отразява добре и в тенденцията на изменение на максималните стойности на K за горния слой на опробваните профили – около 2×10^{-3} SI за МП Юговско ханче и МП Бачково до 1.5×10^{-3} SI за МП Устие на р. Чепеларска. Същата тенденция се наблюдава и за долните нива от седименти: 4.5×10^{-3} SI; 1.5×10^{-3} SI до 1×10^{-3} SI (Фиг. 3). Тази съпоставимост на резултатите от теренните магнитометрични измервания с резултатите от лабораторните анализи за съдържание на тежки метали показва ефективността на магнитния метод за начален скрининг и оценка на степента на антропогенно замърсяване на седиментите от изследвания район.

Благодарности: Изследването е подкрепено от проект REXPro: Устойчиво и ефективно проучване, добив и преработка на критични и стратегически суровини в медно-златни и полиметални находища в България: от рудата до хвостохранилището ([https://www.geology.bas.bg/en/projects-116/show-125\(20\)](https://www.geology.bas.bg/en/projects-116/show-125(20))), финансиран от СледващоПоколениеЕС (NextGenerationEU) по Плана за Възстановяване и Устойчивост, договор БАН BG-RRP-2.011-0040-C01/02.

ЛИТЕРАТУРА

- Антонов, Х., Данчев, Д. 1980. Подземните води в България. Техника, София, 260 стр.
- Кожухаров, Д., Кожухарова, Е., Маринова, Р., Кацков, Н., Янев, Й. 1991. Геоложка карта на България, М 1:100000, Картен лист Чепеларе, Комитет по геология, София.
- Кожухаров, Д., Кожухарова, Е., Маринова, Р. 1992. Геоложка карта на България, М 1:100000, Картен лист Пловдив, Комитет по геология, София.
- Стоилкова, Т., Пенин, Р., Тамбураджиев, И. 2016. Екогеохимични проучвания в Пловдивското поле. Сборник доклади. Научна конференция Географски аспекти на планирането и използването на територията в условията на глобални промени, гр. Вършец, България, 23. 09 – 25. 09. 2016 г. ISBN: 978-619-90446-1-2
- Стоянова, В., Методиева, Г., Черкезова, Е., Генчев, С. 2025. Оценка на земното покритие във водосбора на река Чепеларска (Западни Родопи, България) за периода 1990–2018 г. – *Проблеми на географията*, 1–2, 131-164. DOI: 10.7546/PG.1-2.2025.08
- Христова, Н. (2012). Хидрология на България. София: Тип-топ прес, стр. 830.



- FAO SO ILS PORTAL. 2023. Harmonized World Soil Database v2.0., https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/?utm_source=chatgpt.com
- Gartsiyanova, K., Genchev, S., Varbanov, M. 2023. Assessment of physico-chemical status of waters in selected sampling sites of Chepelarska River, Bulgaria. -*Forestry ideas*, 29, 216–225
- Georgieva, S., Vassileva, R., Milenkov, G., Stefanova, E. 2024. LA-ICP-MS trace element study of sulphides from the Djurkovo Pb-Zn deposit, Central Rhodopes: Preliminary data. -*Review of the Bulgarian Geological Society*, 85, 92–95. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2024.85.2.92>
- Hikov, A., Vijdea, A-M., Peytcheva, I., Jordan, G., Marjanovic, P., Milakovska, Z., Filipov, P., Vetseva, M., Balters, A., Alexe, V.E., Balan L.L., Marjanivic, M., Cvetkovic, V., Saric, K., & The SIMONA Project Team. 2023. Assessment of river sediment quality according to the EU Water Framework Directive in large rivers fluvial conditions. A case study in the Lower Danube River Basin. -*Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 18, 195 – 211; DOI:10.26471/cjees/2023/018/251
- Petrovský, E., Kapička, A., Jordanova, N., Knab, M., Hoffmann, V. 2000. Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. -*Environmental Geology*, 39, 312–318; DOI: 10.1007/s002540050010
- Šorša, A., Čeru, T., Kovács, Z., Jordán, G., Dudás, K., Szabó P. 2022. Assessment of river sediment quality according to the EU water framework directive in lowland fluvial conditions. A case study in the Drava River area, Danube River basin. - *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 17, 459–468. DOI:10.26471/cjees/2022/017/235
- Stanimirova, T., Vangelova, V., Stoilkova, T., Vangelov, D. 2023. Mineral composition of Laky tailings dam, Central Rhodopes, Bulgaria. -*Review of the Bulgarian Geological Society*, 84, 1, 3–9. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2023.84.1.3>
- Vijdea, A., M., Alexe, V., E., Bălan, L.L., Bogdevich, O., Čeru, T., Dević, N., Dobnikar, M., Dudás, K. M., Hajdarević, I., Halířová, J., Hikov, A., Humer, F., Ivanišević, D., Jankulár, M., Jordan, G., Koret, K., Marjanović, M., Marjanović, P., Mikl, L., Nicoară, I., Nikolić, T., Peytcheva, I., Pfeleiderer, S., Reitner, H., Šorša, A., Vićanović, J., Vulić, D. 2022. Assessment of the quality of river sediments in baseline national monitoring stations of 12 countries in the Danube River basin. -*Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 17, 425–439. DOI:10.26471/cjees/2022/017/233



ПРИЛОЖЕНИЯ НА КОНДИЦИОНИРАНИ ЗЕМНИ МАСИ ОТ ТУНЕЛНО-ПРОБИВНИ МАШИНИ: ИНЖЕНЕРНА, ЕКОЛОГИЧНА И ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА

Борислав Борисов, Павел Павлов
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ

Докладът разглежда геотехническата и екологичната характеристика на пено-кондиционирани земни маси, изкопани с тунелно-пробивни машини с уравнивяване на земното налягане (EPB), и оценява пригодността им за повторна употреба. Физико-механичните и химичните свойства на материала са анализирани с акцент върху остатъчното съдържание на повърхностноактивни вещества и значението му за класификация на отпадъците по Рамковата директива на ЕС. Вариантите за повторно използване са класирани чрез сравнение по двойки по метода АНР с деветобалната скала на Saaty по четири критерия: геотехническа пригодност, екологично съответствие, дълготрайност и логистична приложимост. Данните за водопропускливост от лабораторни изпитвания са анализирани в зависимост от степента на инжектиране на пена (FIR, 30 %–80 %) и ефективния размер на зърната d_{10} . Разгледано е и влиянието на хидравличния градиент и водното налягане въз основа на публикувани експериментални резултати. Установено е, че системната характеристика на материала при подходящ контрол на качеството може да обоснове инженерно издържани решения за повторна употреба на EPB-кондиционирани маси.

Ключови думи: EPB TBM, кондиционирани маси, повторна употреба, водопропускливост

APPLICATIONS OF CONDITIONED EXCAVATION MATERIAL FROM TUNNEL BORING MACHINES: ENGINEERING, ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASSESSMENT

Borislav Borisov, Pavel Pavlov
University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: b.borisov@mgu.bg
Corresponding author: b.borisov@mgu.bg

ABSTRACT

This paper deals with the geotechnical and environmental characterization of foam-conditioned soils excavated by Earth Pressure Balance (EPB) tunnel boring machines and evaluates their suitability for reuse. The physical-mechanical and chemical properties of the material are assessed, focusing on residual surfactant content and its relevance to waste classification under the EU Waste Framework Directive. Reuse alternatives options are ranked by AHP pairwise comparison on Saaty's nine-point scale against four criteria: geotechnical suitability, environmental compliance, durability, and logistical feasibility. Permeability data from laboratory tests are analyzed as a function of foam injection ratio (FIR, 30 %–80 %) and effective grain size d_{10} ; the influence of hydraulic gradient and water pressure on conditioned soil behaviour is also discussed based on published experimental work. The results show that systematic material characterization, if backed by appropriate QA/QC protocols, can support sound reuse decisions for EPB-conditioned ground.

Key words: EPB TBM, conditioned muck, reuse, pairwise matrix, permeability

Въведение

Технологията на механизано изграждане на тунели, посредством тунелно пробивни машини (ТПМ) с уравнивяване на земното налягане (Earth Pressure Balance-EPB) представлява един от най-разпространените методи за строителство на тунели в условията на слаби и разнородни строителни



почви в градска среда. При този метод стабилността на челото на забоя се осигурява чрез поддържане на контролирано противоналягане в предната камера на тунелно пробиваната машина. За постигане на необходимите реологични свойства на земните маси се използват т. нар. кондициониращи агенти – пяна, полимери, бентонитни суспензии и др. (EFNARC, 2005).

Чрез кондиционирането свойствата на изкопаните маси се модифицират в сравнение с естественото състояние на почвите. Променя се водното им съдържание, постига се тиксотропно поведение, намалява се лепкавостта, оптимизират се зърнометричните характеристики, променя се и химичният състав на материала (ITA-AITES, 2000). Това поражда, както възможности за повторна употреба на изкопаните маси, така и необходимост от прецизна класификация и екологична оценка преди определяне на крайното приложение на материала (ITAttech, 2015).

Кондиционирането е сложен физико-химичен процес. Той променя фундаментално, както структурата, така и химичния профил на изкопания материал. Това поражда необходимостта от екологична оценка преди последващата му повторна употреба. Широкото използване на анионни повърхностно-активни вещества, сред които най-разпространен е натриевият лаурилетерсулфат (SLES) е утвърден стандарт в тунелната индустрия. Тези химични съединения притежават свойството ефективно да намаляват повърхностното напрежение на водата и да стабилизират въздушно-водния филм на генерираните микромехурчета. Този механизъм позволява създаването на дисперсна система, която се внедрява в порите на почвата, измествайки свободната вода и формирайки временна хидравлична бариера. При подходящи условия тази бариера може значително да намали водопропускливостта и да ограничи нахлуването на подземни води в изкопаната камера. Вторичните ефекти от този процес включват намаляване на вътрешното триене между почвените частици, редуциране на абразивното износване на режещите инструменти на режещата глава на ТПМ и понижаване на необходимия въртящ момент. Тези технически ползи по време на строителството създават значителни логистични и геотехнически предизвикателства след изнасянето на масата на повърхността. Материалът се характеризира с повишено водно съдържание, практически пренебрежима начална носеща способност и наличие на химически агенти, които предстои да претърпят процес на деградация.

Целта е да се предложи системна методология за оценка на потенциала при повторна употреба на кондиционираните изкопни маси. Стъпките са следните: (1) физико-механична и химична класификация; (2) екологична оценка; (3) възможности за приложение; (4) метод и критерии за избор на оптимално приложение; (5) контрол на качеството и мониторинг (фиг. 1).



Фиг. 1. Работен поток за оценка на кондиционирани изкопни маси

Актуалността на разглеждания проблем се определя от няколко фактора. Първо, обемите на изкопни маси са значителни. Тунел с диаметър 6 m и дължина 1 km генерира приблизително $28\,300\text{ m}^3$ in-situ изкопни маси ($\pi \cdot r^2 \cdot L \approx 28\,300\text{ m}^3$), а при коефициент на разбухване 1,2–1,3 обемът на разроханата маса достига $34\,000\text{--}37\,000\text{ m}^3$. При отсъствие на план за повторна употреба е необходимо земните маси да се депонират. За сравнение, при типичен проект за разширение на градски метрополитен с обща дължина на тунелите от порядъка на 4–6 km общият обем на генерираните кондиционирани земни маси може да надхвърли $300\,000\text{ m}^3$. Второ, европейската рамкова директива за отпадъците (2008/98/EO) установява йерархия на отпадъците, в рамките на която подготовката за повторна употреба, рециклирането и другите форми на оползотворяване имат приоритет пред обезвреждането, включително депонирането. В контекста на тунелното строителство това създава нормативна и управленска предпоставка за търсене на технически и екологично допустими решения за оползотворяване на изкопаните маси. Трето, нарастващите такси за депониране



и ограниченият капацитет на депата създават икономически стимули за алтернативно управление на отработения изкопен материал.

В България проблемът придобива особена актуалност във връзка с разширяването на Софийския метрополитен, където в гъсто застроените градски зони се прилагат ЕРВ тунелно-пробивни машини в сложни хетерогенни почвени условия, включително алувиални отложения и квартернерни седименти. Рационалното управление на изкопните маси в тези проекти би допринесло за намаляване на разходите, екологичния отпечатък и за подобряване на устойчивостта на строителния процес.

Свойства на ЕРВ-кондиционираните маси

Физико-механични параметри

Зърнометричният състав на изкопните маси, е основен параметър за оценка на уплътняемостта и водопропускливостта на материала. Водното съдържание и степента на уплътнение (изпитване по Proctor) определят носещата способност и склонността за сегрегиране и слягане. Калифорнийският показател за носеща способност (California Bearing Ratio - CBR) е основен критерий за приложимост в конструктивни слоеве за насипи, докато коефициентът на водопропускливост (k) е критичен параметър за рекултивационни екраниращи слоеве и зони с изискване за ограничена и контролирана филтрация (Vinai et al., 2008).

Реологичните параметри за обработка на почвите (кондициониране), като: степен на разширение на пяната (Foam Expansion Ratio - FER), степен на инжектиране на пяната (Foam Injection Ratio - FIR) и концентрация на пенообразуващия агент (C_f), определят поведението на материала по време на строителния процес и остатъчният ефект след изнасяне му от подземните изработки (EFNARC, 2005). Изследванията на Peila et al. (2019) и Kim et al. (2021) показват, че оптималният подбор на тези параметри зависи в голяма степен от зърнометрията и влажността на почвата.

Съществено е да се отбележи, че свойствата на кондиционираните маси не са постоянни. Проучванията на Peila et al. (2020) показват, че при контролирани лабораторни условия кондиционираните почви могат да възстановят в различна степен част от първоначалните си геомеханични свойства. Възстановяването протича с различна скорост за различните показатели. След 7 дни сухата плътност вече е съпоставима с тази на естествената почва, а след 28 дни по-голямата част от изследваните показатели са близки до първоначалните. Ъгълът на вътрешно триене е почти напълно възстановен след 28 дни. Кохезията остава частично понижена и след този срок. Допълнителните изпитвания на 45 и 60 дни показват, че стойностите, достигнати на 28-ия ден, остават стабилни до края на наблюдавания период. Степента и скоростта на възстановяване зависят от типа почва, използвания кондициониращ агент, влагата и условията на съхранение, поради което резултатите следва да се интерпретират като проектно-специфични, а не като универсално приложимо правило. По-специално, посочените срокове са получени при контролирани лабораторни условия (херметични контейнери, постоянна температура); при складиране на открито (атмосферни условия, валежи, вариращи температури) темповете и степента на възстановяване могат да се различават съществено. Препоръчва се дефиниране на протокол за „отлежаване“ на масите, включващ изисквания за височина на купчините, честота на преобръщане и защита от валежи. При пяно-кондиционирани пясъци тестовете за обработваемост показват стойности в диапазона 10–20 cm (Budach & Thewes, 2015).

Химични и екологични показатели

Химичната оценка включва определяне на киселинен показател рН, електропроводимост, органично съдържание, тестове за излужване и екотоксикологични изпитвания. Тези показатели са основа за класификация на материала и за определяне на екологичната му съвместимост (ITAtch, 2015). Zumsteg et al. (2018) установяват, че излужването на остатъчни повърхностно-активни вещества зависи от типа на кондициониращия агент, времето след изкопаване и съдържанието на фини фракции.



Остатъчната биоразградимост на органичните полимери и степента на адсорбция на фините фракции следва да бъдат оценени в рамките на всеки конкретен проект (Zumsteg et al., 2018; Finizio et al., 2020).

Широко използвана група пяно-образуващи агенти в тунелната индустрия са формули на основата на анионни повърхностно-активни вещества, включително натриев лаурилетерсулфат (SLES). В практиката обаче се използват различни търговски решения и добавки, поради което химичният състав и екологичното поведение на остатъчните вещества следва да се оценяват внимателно за конкретния продукт, използван в проекта. SLES - $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_2\text{OSO}_3\text{Na}$ - е сред най-често използваните анионни повърхностноактивни вещества във фоамиращите (разпенващите) агенти за механизирано тунелиране, поради което неговото съдържание и остатъчно поведение в кондиционираните маси имат съществено значение при оценката на възможностите за повторно използване (EFNARC, 2005; Finizio et al., 2020). Следва да се отбележи, че търговските формулировки на SLES могат да съдържат следи от 1,4-диоксан – вещество, класифицирано като потенциален канцероген (група 2B по IARC, 1999), което е силно разтворимо във вода и слабо се адсорбира от почвата (Patrolecco et al., 2020). При повторна употреба в близост до водоизточници мониторингът на 1,4-диоксан е силно препоръчителен. Критичната концентрация определя минималното количество агент, необходимо за ефективно пенообразуване. Това влияе пряко на остатъчното съдържание на химически вещества в изкопните маси и съответно на екологичната им приемливост.

Нормативна рамка и критерии за годност

Нормативният статут на кондиционираните изкопни маси следва да се определя за всеки конкретен проект съгласно приложимата национална и европейска правна рамка. В рамките на ЕС Директива 2008/98/ЕО въвежда йерархия на отпадъците и условия за разграничаване между отпадък, страничен продукт и материал, престанал да бъде отпадък. Прилагането на тези режими не е автоматично и изисква оценка за конкретния случай. В България, съгласно чл. 2, ал. 2, т. 4 от Закона за управление на отпадъците (ЗУО), от обхвата на законодателството за отпадъците са изключени само незамърсени почви и други естествено срещащи се материали, изкопани при строителни дейности, когато е сигурно, че ще бъдат използвани в естественото си състояние на площадката, от която са изкопани. Тъй като ЕРВ-кондиционираните маси не са в естественото си състояние (обработени са с химически агенти), те по подразбиране попадат в режима на отпадъците. За повторната им употреба на други площадки е необходимо мотивирано решение за класифицирането им като страничен продукт по реда на чл. 4 от ЗУО, базирано на техническите и екологичните доказателства и одобрено от компетентните органи (РиОСВ). Поради това ЕРВ-кондиционираните маси не следва по подразбиране да се третират като материал извън режима на отпадъците. За повторната им употреба е необходимо проектно-специфично правно и техническо обосноваване, включително оценка на състава, излужването, предназначението, проследимостта и приложимите разрешителни и одобрения.

Потенциални приложения

Въз основа на експертна оценка могат да се обособят шест основни възможности за техническо приложение.

Обратното засипване на изкопи и шахти, както и рекултивацията на нарушени терени, представляват приложения с висок потенциал, тъй като в редица случаи изискванията към механичните свойства са по-умерени в сравнение с конструктивни пътни слоеве. Пригодността на материала следва да се доказва чрез контрол на влажността, уплътняемостта, носещата способност и екологичните показатели.

Използването на кондиционирани маси като конструктивни слоеве за изграждане на пътища, технологични площадки и други строителни предназначения изисква СBR-базирани критерии, като при необходимост се прилага предварително изсушаване или стабилизация. Запълването на каверни, кухни и изоставени кариери се благоприятства от тиксотропните свойства и удобната полагаемост на материала. Стабилизацията с вар, цимент или алтернативни хидравлични свързващи вещества



повишава модула на деформация и редуцира чувствителността към влага. Промиването, фракционирането и почистването на остатъчни агенти представляват възможен вариант, приложим при условие на икономическа обоснованост. Депонирането като неопасен отпадък остава възможност, когато техническите или екологичните критерии не са изпълнени.

При всеки от разгледаните сценарии целевите стойности на водопропускливостта следва да се диференцират според приложението: за хидроизолационни екрани $k < 10^{-7}$ m/s; за обратни засипвания и рекултивация стойности от порядъка на 10^{-5} m/s са приемливи; за конструктивни насипи изискванията зависят от проектните натоварвания. Освен това се изисква подробен план за контрол на качеството, който да обхваща пробонабиране, лабораторни изпитвания, приемателни критерии и мониторинг на екологичния отпечатък (EFNARC, 2005; ITAtech, 2015).

Критерии за оценка на приложенията

За избора на приложение се предлага матрица с пет критерия: А) геотехническа годност (0,30); Б) реология и влажност (0,15); В) екология (0,25); Г) дълготрайност (0,15); Д) логистика и разходи (0,15). Теглата са предложени на базата на експертна преценка. За тяхното математически обосновано извеждане се прилага аналитичният йерархичен процес (АНР), който структурира субективните оценки и осигурява проверка на логическата им съгласуваност (Saaty, 1980).

Методология на Аналитичния йерархичен процес (АНР)

АНР (Saaty, 1980) декомпозира проблема в три нива: (1) обща цел (избор на приложение); (2) критерии (геотехника, реология, екология, дълготрайност, логистика); (3) алтернативи (обратно засипване, подложни слоеве, каверни, стабилизирани грунт, суровина след обработка, депониране).

Централен елемент е матрицата за сравнение по двойки ($n \times n$), в която a_{ij} изразява относителната важност на критерий i спрямо j по скалата на Саати (Таблица 1). Матрицата е реципрочна: $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Таблица 1. Фундаментална скала на Саати за сравнение по двойки

Стойност	Оценка	Обяснение
1	Равна важност	Двата критерия допринасят еднакво
3	Умерена важност	Опитът и преценката слабо предпочитат единия критерий
5	Силна важност	Опитът и преценката силно предпочитат единия критерий
7	Много силна важност	Единият критерий е доминиращ и важността му е доказана практика
9	Изключително силна важност	Превъзходството на единия критерий е безспорно доказано

Забележка: Междинните стойности 2, 4, 6, 8 се използват за по-фина диференциация. Стойностите 1/3, 1/5, 1/7, 1/9 изразяват обратното предпочитание.

За илюстрация на метода е конструирана примерна матрица за сравнение по двойки на петте критерия, базирана на експертна преценка за типичен проект за разширение на градски метрополитен в алувиални седименти (Таблица 2).

Таблица 2. Примерна матрица за сравнение по двойки (5 критерия)

Критерий	А (Геот.)	В (Реол.)	С (Екол.)	Д (Дълг.)	Е (Лог.)	w_i
А (Геотехника)	1	3	2	3	3	0,39
В (Реология)	1/3	1	1/2	1	1	0,12
С (Екология)	1/2	2	1	2	2	0,24
Д (Дълготрайност)	1/3	1	1/2	1	1	0,12
Е (Логистика)	1/3	1	1/2	1	1	0,12
			$\Sigma \approx 1,00$		CR = 0,002	



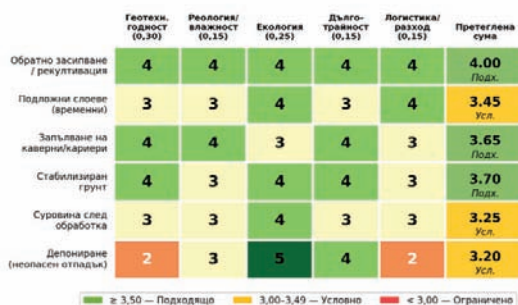
Приоритетният вектор w се извлича чрез решаване на $A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w$. Съгласуваността се контролира чрез $CR = CI/RI$, където $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, а $RI = 1,12$ за $n = 5$. При $CR \leq 0,10$ преценките са съгласувани. В примерната матрица (Таблица 2) $\lambda_{\max} = 5,010$, $CI = 0,0025$ и $CR = 0,002 \ll 0,10$. При практическо приложение АНР-теглата заместват фиксираните коефициенти. Препоръчва се анализ на чувствителността ($\pm 20\%$ вариране на теглата). При увеличаване на екологичния критерий (С) с 20 %, алтернативите за обратно засипване и стабилизирани грунт запазват водещите си позиции. Ако тунелът се изгражда в чувствителна екосистема или в близост до водоизточници, екологичният критерий може да се превърне в бинарен изключващ фактор (go/no-go). Оценяването е по петстепенна скала (1–5); праговата интерпретация е: $\geq 3,5$ – „Подходящо“; 3,0–3,49 – „Условно“; $< 3,0$ – „Ограничено“.

Забележка: За пълно описание на метода виж Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.

Таблица 3. Решаваща матрица за избор на приложение

Приложение	A(0,30)	B(0,15)	C(0,25)	D(0,15)	E(0,15)	Сума	Клас
Обратно засипване	4	4	4	4	4	4,00	Подходящо
Подложни слоеве	3	3	4	3	4	3,45	Условно
Каверни/кариери	4	4	3	4	3	3,65	Подходящо
Стабилизирани грунт	4	3	4	4	3	3,70	Подходящо
Суровина след обр.	3	3	4	3	3	3,25	Условно
Депониране	2	3	2	4	2	2,45	Ограничено

Съгласно илюстративната матрица (Таблица 3) най-висока пригодност се очаква за обратно засипване/рекултивация и за стабилизирани грунт. Депонирането е оценено като най-неблагоприятната алтернатива съгласно йерархията на Директива 2008/98/ЕО. Резултатите имат илюстративен характер и следва да се използват като инструмент за предварителен избор, а не като заместител на проектно-специфичните оценки. Словесите за насипна конструкция и „суровина след обработка“ са условно приложими при контрол на влажността.



Фиг. 2. Номограма за определяне на приложенията на EPB изкопни маси

Лабораторни резултати

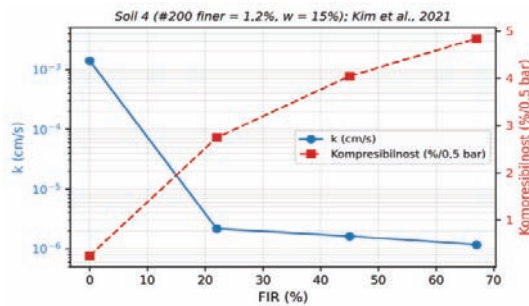
Представените данни са адаптирани от публикувани експериментални изследвания (compiled/adapted from published data). Акцентът е върху три групи фактори: степента на инжектиране на пяната (FIR), ефективния размер на частиците d_{10} и хидравличните условия. Данните следва да се разглеждат като лабораторна основа за инженерна интерпретация, а не като универсални критерии.



Таблица 4. Влияние на FIR върху водопронируемостта (изветрял гранит, Soil 4, #200 finer = 1,2%, по Kim et al., 2021, Table 3)

FIR (%)	Обработваемост (cm)	k (cm/s)	Компрес. (%/0,5 bar)
0 (без пяна)	—	$1,40 \times 10^{-3}$	0,24
22	12	$2,16 \times 10^{-6}$	2,74
45	16	$1,62 \times 10^{-6}$	4,04
67	19	$1,17 \times 10^{-6}$	4,84

Данните от Таблица 4 са базирани на Kim et al. (2021). Означението Soil 4 („#200 finer = 1,2 %“) се отнася до класификацията по USCS: при пресяване през сито №200 (отвор 0,075 mm) само 1,2 % от масата преминава, което определя материала като едрозърнест изветрял гранит с практически пренебрежимо съдържание на фини частици. При водно съдържание 15 % увеличаването на FIR от 22 % до 67 % води до спад на водопронируемостта от $1,40 \times 10^{-3}$ cm/s (некондиционирана почва) до $2,16 \times 10^{-6}$, $1,62 \times 10^{-6}$ и $1,17 \times 10^{-6}$ cm/s. Едновременно компресибилността нараства от 0,24 до 4,84 %/0,5 bar. При едрозърнести почви без достатъчно фини частици може да се наложи добавяне на полимерни суспензии.

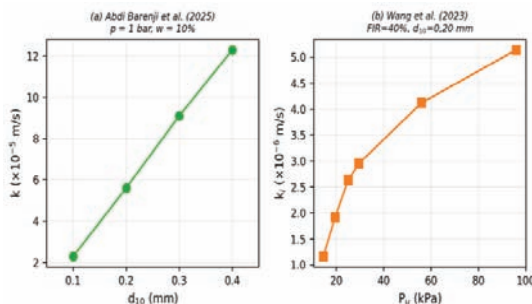


Фиг. 3. Влияние на FIR върху водопронируемостта

Таблица 5. Водопронируемост като функция на d_{10} (по Abdi Varenji et al., 2025; $p = 1$ bar, $w = 10\%$)

d_{10} (mm)	k (m/s)
0.1	$2,28 \times 10^{-5}$
0.2	$5,6 \times 10^{-5}$
0.3	$9,1 \times 10^{-5}$
0.4	$12,3 \times 10^{-5}$

Данните на Abdi Varenji et al. (2025) показват нарастване на водопронируемостта при повишаване на d_{10} от 0,1 до 0,4 mm (при $p = 1$ bar, $w = 10\%$) – от $2,28 \times 10^{-5}$ до $12,3 \times 10^{-5}$ m/s. По-едрите частици формират по-големи междузърнести празнини, които пенната структура запълва по-трудно. Числените данни за зависимостта $k-d_{10}$ в Таблица 5 са от Abdi Varenji et al. (2025), докато Borio & Peila (2010) остават важен първоизточник за лабораторната методология.



Фиг. 4. Зависимост между d_{10} , водно налягане и водопронируемост



Таблица 6. Влияние на водния напор върху началния коефициент на водопроникливост на пеннокондициониран пясък (адаптирано по Wang et al., 2023; FIR = 40%, $d_{10}=0,20$ mm, $w = 12,5\%$, $P_d=0$ kPa)

Горен воден натиск (P_u) (kPa)	Прибл. налягане (bar)	Начален хидравличен градиент (i)	Начален коефициент на водопроникливост (k_i) (m/s)
14,5	0,145	3,4	$1,16 \times 10^{-6}$
19,5	0,195	4,3	$1,92 \times 10^{-6}$
25,0	0,250	5,2	$2,63 \times 10^{-6}$
29,5	0,295	5,9	$2,95 \times 10^{-6}$
56,0	0,560	10,3	$4,12 \times 10^{-6}$
96,0	0,960	17,0	$5,14 \times 10^{-6}$

Забележка: Стойностите са адаптирани от Wang et al. (2023), Table 2, за пяно-модифицирани пясъци. Представен е началният коефициент на водопроникливост k_i , а не стабилизиращият коефициент k_s

Данните в Таблица 6 (Wang et al., 2023) показват, че при нарастване на горното водно налягане P_u от 14,5 до 96,0 kPa началният коефициент k_i нараства от $1,16 \times 10^{-6}$ до $5,14 \times 10^{-6}$ m/s. Същевременно началният стабилен период се съкращава, а стабилизиращият коефициент k_s намалява. Hu et al. (2020) допълват, че при нарастване на хидравличния градиент диапазонът на параметрите за ниска водопроникливост се стеснява. Съгласно закона на Бойл–Мариот, повишаването на налягането компресира мехурчетата и увеличава филтрационните канали. Zhou & Yang (2020) потвърждават практическата значимост: при воден пробив от шнековия транспортър изходното налягане обикновено надвишава 0,5 bar. Следователно влиянието на водния напор следва да се описва като времезависима характеристика на водоплътността.

В обобщение, водопроникливостта на ЕРВ-кондиционираните маси се контролира от FIR, d_{10} и хидравличните условия. Увеличаването на FIR намалява началната пропускливост; увеличаването на d_{10} я повишава; по-високият воден стълб влошава началната водонепропускливост и съкращава стабилния период. Поради това изборът на параметри за кондициониране следва да бъде проектно-специфичен и да се основава на комбинация от реологични, хидравлични и времезависими изпитвания.

Сравнение с алтернативни подходи

За повторната употреба на ЕРВ-кондиционираните маси е необходимо съпоставяне с алтернативните варианти: класическо депониране, използване на маси от открит изкоп, маси от ТВМ тип Slurry (с укрепваща суспензия) и внос на инертни материали. В общия случай сценариите, основани на локална обработка и повторна употреба, могат да бъдат икономически по-благоприятни от депонирането. Конкретната икономическа ефективност е силно зависима от местоположението, транспортната схема, необходимата степен на обработка, цените на депониране и наличието на приемни площадки. От екологична гледна точка, локалната повторна употреба обикновено води до по-нисък въглероден отпечатък в сравнение с депониране и последваща доставка на заместващи материали. Количествената оценка на този ефект следва да се базира на проектно-специфичен анализ на жизнения цикъл или поне на прозрачна калкулация с ясно зададени допускания.

Съществена разлика между земните маси от тунелно пробивна машина с укрепваща суспензия (slurry) и такава с баланс на земния натиск е съдържанието на вода и остатъчни кондициониращи агенти. При slurry машините изкопният материал се изнася във форма на суспензия, която изисква отделна сложна инсталация за сепарация (сепарационно стопанство). Това повишава разходите и сложността на обработката. От друга страна, ЕРВ-кондиционираните маси имат по-ниско водно съдържание и по-добра механична консистенция. Те са по-подходящи за пряка повторна употреба без необходимост от сложна предварителна обработка, след период на изсушаване и дегазиране.



Контрол на качеството и мониторинг

Контролът на качеството е неразделна част от всяко приложение за повторна употреба. Той включва пробонабиране по партии с протокол за изпитване (зърнометрия, w , γ_{dmax} , CBR, k , pH/EC, eluate), приемателни критерии по приложение.

Препоръчително е критериите за приемане да бъдат разработени преди строителния етап, като се предвидят пилотни изпитвания за валидиране и оценка. Изследванията на Oggeri et al. (2004) подчертават, че системният подход към контрола на качеството в тунелното строителство намалява рисковете и осигурява съответствие с нормативните изисквания.

Оценка

Икономическата оценка на повторната употреба се определя от баланса между разходите за обработка (промиване, фракциониране, стабилизация) и икономии от избягване на депониране, транспорт и закупуване на нови инертни материали. Логистичните фактори включват разстояния до площадките за полагане, наличност на техника, сезонност (възможност за изсушаване) и времеви прозорци за прием/полагане.

В екологичен план, повторната употреба на място намалява въглеродния отпечатък на проекта, тъй като отпадат транспортните емисии за извозване към депо и доставка на нови инертни. Ориентировъчният сравнителен анализ показва, че при локална повторна употреба емисиите на парникови газове могат да бъдат чувствително по-ниски спрямо сценарий на депониране и доставка на нови материали. За научна надеждност подобни сравнения е препоръчително да се представят с ясно разписани допускания относно транспортни разстояния, енергийни източници, вид обработка и масов баланс. Това съответства на принципите на кръговата икономика и е в съгласие с европейската рамкова директива за отпадъците (2008/98/EO).

За условията на България трябва да се отчете спецификата на нормативната база. Законът за управление на отпадъците и свързаните подзаконовни актове определят рамката, в която статутът на изкопните маси следва да бъде преценяван в зависимост от техния състав, предназначение и начин на използване. Класифицирането им като страничен продукт вместо отпадък не е автоматично и изисква конкретна правна и техническа обосновка. Поради това административното опростяване е възможно само когато са изпълнени съответните условия и е налице приемане от компетентните органи.

Заклучение

На основата на извършения литературен обзор, анализ на лабораторни данни и оценката по набор от критерии могат да се формулират следните изводи:

Повторната употреба на ЕРВ-кондиционираните маси е технически възможна в значителен брой случаи. Необходимо условие за това е извършването на ясна класификация на материала, подходяща екологична оценка и проверка на съответствието с изискванията за конкретното приложение.

Когато не са изпълнени техническите, екологичните или регулаторните критерии за оползотворяване, материалът следва да се управлява съобразно резултатите от неговата характеристика, класификацията му по приложимото законодателство и условията за приемане в съответното съоръжение. За постигане на проектна сигурност се препоръчват предварителни пилотни изпитвания, които да осигурят надеждна база за вземане на решения относно управлението и потенциалната повторна употреба на изкопните маси. Бъдещите изследвания следва да се фокусират върху разработването на биоразградими кондициониращи агенти с по-висока стабилност, които да облекчат екологичната оценка и да разширят възможностите за повторна употреба.

Поради значителните обеми на генерираните изкопни маси, транспортирането им до външни площадки или депа е свързано с допълнителни емисии на парникови газове, натоварване на транспортната мрежа и ускорено износване на пътната инфраструктура. Следователно повторното използване на ЕРВ-кондиционирани маси следва да се разглежда не като универсално приложимо



решение, а като инженерно, екологично и регулаторно обоснована опция, която може да допринесе за ограничаване на депонирането и за по-ефективно управление на материалните потоци при изпълнение на подземни инфраструктурни проекти.

Независимо от нарастващия интерес към повторната употреба на кондиционирани изкопни маси, инженерната и екологичната приложимост на материала остава силно зависима от локалните геоложки условия, използваните добавки, сроковете на съхранение и предвиденото крайно приложение. Поради това бъдещите изследвания следва да комбинират лабораторни тестове, пилотни полеви приложения и количествени оценки на жизнения цикъл, за да се създаде по-надеждна база за проектно-специфични решения.

Литература

- [1] Abdi Barenji, A., Chakeri, H., Manafi, M. & Davarpanah, M. (2025). Effect of Gradation on the Permeability of Foam-conditioned Soils in Mechanized Excavation. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 69(2), 397–405.
- [2] Borio, L. & Peila, D. (2010). Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(4), 365–370. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2010.365.370>
- [3] Budach, C. & Thewes, M. (2015). Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.08.006>
- [4] EFNARC (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. EFNARC, Surrey, UK.
- [5] Finizio, A., Patrolecco, L., Grenni, P., Galli, E., Lacchetti, I. & Rauseo, J. (2020). Environmental risk assessment of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulphate in site-specific conditions arising from mechanized tunnelling. *Journal of Hazardous Materials*, 383, 121116. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121116>
- [6] Hu, Q., Wang, S., Qu, T., Xu, T., Huang, S. & Wang, H. (2020). Effect of hydraulic gradient on the permeability characteristics of foam-conditioned sand for mechanized tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103377>
- [7] ITA-AITES (2000). Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs). International Tunnelling Association.
- [8] ITAtech (2015). ITAtech Guidelines for Excavation (AG Excavation). ITAtech Activity Group Excavation.
- [9] Kim, T. H., Lee, I. M., Chung, H. Y., Park, J. J. & Ryu, Y. M. (2021). Application Ranges of EPB Shield TBM in Weathered Granite Soil: A Laboratory Scale Study. *Applied Sciences*, 11(7), 2995. <https://doi.org/10.3390/app11072995>
- [10] Oggeri, C., Peila, D. & Oreste, P. (2004). Quality in tunnelling: ITA-AITES Working Group 16 Final Report. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(3), 239–272.
- [11] Peila, D. (2014). Soil conditioning for EPB shield tunnelling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(3), 831–836. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0023-3>
- [12] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
- [13] Peila, D., Martinelli, D., Todaro, C. & Luciani, A. (2019). Soil conditioning in EPB shield tunnelling – An overview of laboratory tests. *Geomechanics and Tunnelling*, 12(5), 491–498.
- [14] Peila, D., Todaro, C., Martinelli, D., Carigi, A. & Barbero, M. (2020). Evaluation of the geo-mechanical properties recovery in time of conditioned soil for EPB-TBM tunneling. *Geosciences*, 10(11), 438. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110438>
- [15] Patrolecco, L., Rauseo, J., Grenni, P., Galli, E., Langford, K. H., Berber, N., Caracciolo, A. B. & Finizio, A. (2020). Environmental fate and effects of foaming agents containing sodium lauryl ether sulphate in soil debris from mechanized tunnelling. *Chemosphere*, 250, 126175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126175>



- [16] Vinai, R., Oggeri, C. & Peila, D. (2008). Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.010>
- [17] Zhou, X. & Yang, Y. (2020). Effect of foam parameters on cohesionless soil permeability and its application to prevent the water spewing. *Applied Sciences*, 10(5), 1787. <https://doi.org/10.3390/app10051787>
- [18] Wang, S., Feng, Z., Qu, T., Huang, S. & Zheng, X. (2023). Effect of water head on the permeability of foam-conditioned sands: Experimental and analytical investigation. *Soils and Foundations*, 63(6), 101404. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101404>
- [19] Zumsteg, R., Plötze, M. & Puzrin, A. (2018). Leaching characteristics of chemicals from conditioned tunnel muck. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001790](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001790)



МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФСКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА АМФИБОЛИТИТЕ ОТ НАХОДИЩЕ „МАРТИН“, ЗАПАДНИ РОДОПИ, БЪЛГАРИЯ

Милослав Кацаров¹, Росица Василева¹, Силвина Георгиева¹, Борислав Сотиров²

¹ Геологически институт, Българска академия на науките, София 1113; имейл:
rosivas@geology.bas.bg; sylvina@geology.bas.bg; mkatsarov@geology.bas.bg;

² Геологопроучвателно предприятие София ЕООД., 6, ул. Триадица., София 1000; имейл:
weinlock@gmail.com;

Miloslav Katsarov, Rossitsa D. Vassileva, Sylvina Georgieva, Borislav Sotirov. 2025.

РЕЗЮМЕ

В статията се представя минералого-петрографска характеристика на амфиболитите от находище „Мартин“ (Западни Родопи), установени като перспективна суровина за декоративни облицовки и настилки. Амфиболитите са част от Слащенската литотектонска единица и се отличават със зелен до черен цвят, масивна или слоеста текстура и добре изразена цепливост. Подробно са разгледани минералният състав, структурно-текстурните особености, влиянието на тектонските процеси и петрографските разновидности. Резултатите потвърждават високото качество на амфиболитите и тяхната приложимост като облицовъчен камък.

Ключови думи: амфиболит, петрография, декоративен камък, Западни Родопи

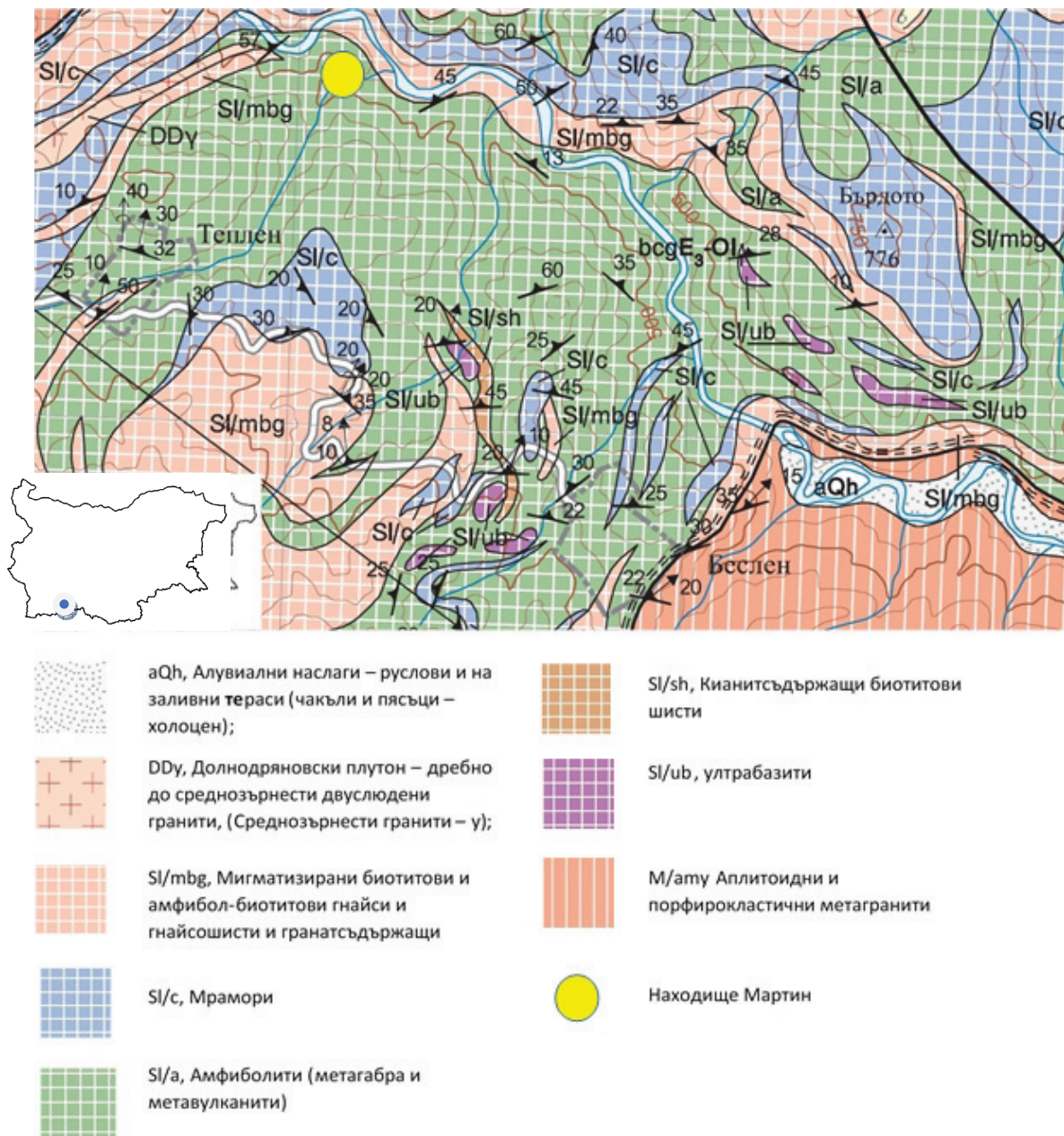
Въведение

Амфиболитите представляват широко разпространен метаморфен тип скали, които имат важно значение както в геоложките изследвания, така и в практическите приложения. Поради своята висока якост, устойчивост на износване и добри декоративни качества, те са предпочитан материал за строителството и архитектурата. През последните десетилетия Родопският регион се утвърди като основна база за добив на облицовъчни и строителни материали, включително амфиболити. Находище „Мартин“ е едно от новопроучените и показва значителен потенциал за бъдеща експлоатация.

Настоящата работа има за цел да представи петрографската характеристика на амфиболитите от това находище. Анализирани са макроскопските и микроскопските особености, минералният състав и текстурните характеристики. Разгледано е въздействието на тектонските процеси върху качеството и декоративните свойства на суровината.

Геоложка обстановка

Находище „Мартин“ се намира в югозападната част на Западните Родопи, в непосредствена близост до село Теплен. Районът е разположен в орографски сложно изграден терен, където преобладават стръмни хребети и дълбоко врязани речни долини. Силно разчлененият релеф е резултат от продължително взаимодействие между тектонските движения и активната ерозионна дейност на реките и техните притоци. Хидрографската мрежа е добре развита и включва малки водни потоци, които дренират района и играят съществена роля за ерозията, изветрянето и преноса на наносен материал. Това създава предпоставки за динамични инженерно-геоложки условия, които оказват влияние върху добивната дейност и планирането на минните изработки.



Фиг. 1. Геоложка карта на България, М 1:50 000, лист „К-34-96-Б (Хаджидимово) и К-34-96-Г (Илинден)“ с разположение на находище Мартин.

Стратиграфски, находището е част от Родопската надгрупа и по-конкретно от Чепеларската пъстра свита според картата в М 1:100000 (Кожухаров и Маринова, 1994) и от Слащенската литотектонска единица (Саров и колектив, 2010)), характеризираща се с разнообразие от метаморфни скали. Амфиболитите представляват основния продуктивен литоложки тип. Те са включени в сложна литоложка алтернация, в която се наблюдават редуващи се пачки от гнайси, мрамори и метабазити. Контактите между отделните литоложки тела са често тектонски, представени от милонити и катаклазити. В геоложкия разрез ясно се разграничават продуктивни пачки амфиболити с добре изразена слоистост и относително хомогенен състав. Между тях се редуват непродуктивни зони, представени от милонитизирани разновидности, силно напукани и с понижени декоративни качества.

Тектонските процеси играят ключова роля в морфологията на амфиболитовите тела. Районът е преминал през сложна геодинамична еволюция, включваща многократни фази на компресия,



разломяване и метаморфни преобразувания. Разломните системи и милонитните зони са широко разпространени и се проявяват както като тесни ивици със силно натрошени скали, така и като обширни зони с будинажна структура. Тези особености имат двоен ефект върху експлоатацията: от една страна, наличието на пукнатинни системи и разломи улеснява процеса на добив чрез образуване на естествени цепителни повърхности; от друга страна, прекомерната тектонска нарушеност води до фрагментация на скалната маса, намаляване на размерите на блоковете и загуба на хомогенност.

В резултат на тази комбинация от геоложки фактори находище „Мартин“ демонстрира ясно разграничени зони с висока технологична стойност и зони с ограничен потенциал. Именно геоложката рамка определя качеството на суровината и нейната икономическа приложимост, като поставя акцент върху необходимостта от прецизна петрографска и структурна характеристика преди започване на промишлен добив.

Материали и методика

За целите на настоящото изследване бяха използвани проби, събрани от различни обекти в рамките на находище „Мартин“. Вземането на материал включва канавни изкопи, сондажни ядки и проби от опитната кариера. Този подход гарантира представителност както на повърхностните разновидности на амфиболитите, така и на по-дълбоките им части, което позволява да се направи обективна оценка на техния петрографски характер. Пробите обхващат както продуктивните гладкослоести амфиболити, така и по-слабо продуктивните масивни и милонитизирани разновидности.

Макроскопските описания включваха оценка на цвят, структура, текстура, степен на напуканост, наличие на минерални включения и видими тектонски нарушения. Всеки образец беше описан по стандартна схема, като бяха определени диагностични белези, важни за декоративната стойност на камъка – равномерност на цвета, степен на изветряне, наличие на жилки и дефекти.

Петрографското наблюдение беше извършено върху дюншлифи, подготвени от представителни проби. Приложена е оптична микроскопия в проходяща и отразена светлина (поляризационен микроскоп Leica DM750P в Геологически институт, БАН) с цел установяване на минералния състав, структурните особености и взаимоотношенията между минералните зърна. Определяни бяха също така структурата (гранобластова, порфиروبластова, нематобластова), както и наличието на вторични промени като серицитизация, епидотизация и хлоритизация.

За допълнително уточняване на минералния състав и предварителна идентификация на фазите бяха приложени рентгено-дифракционни анализи (дифрактометрична система с Huber G670 Imaging Plate Guinier Camera, ГИ-БАН). Те позволиха по-точно идентифициране на минералните фази и количествено определяне на съотношенията между основните компоненти. Това беше особено важно при скали с висока степен на милонитизация или при образци, съдържащи вторични минерали.

Взаимоотношенията между минералите и техните химични характеристики са изследвани чрез сканиращ електронен микроскоп (SEM-EDS) JEOL JSM-6010PLUS/LA в Минно-геоложкия университет. Основният елементен състав на минералите е анализиран с електронно-микросондов анализ чрез Cameca SX100 (EMP) в Лабораторията по електронна микроскопия и микроанализ към Катедрата по геоложки науки на Университета Масарик, Бърно.

Съдържанието на микроелементи е определено чрез лазерна аблация с индуктивно-свързана плазмена маспектрометрия (LA-ICP-MS), включваща лазерна система New Wave Research (NWR) 193 nm Excimer laser UP-193FX, свързана с квадруполен маспектрометър Perkin-Elmer ELAN DRC-e (8 Hz, 50 μm), в Геологическия институт при БАН.

Използван беше и сравнителен анализ със съществуващи литературни данни и с подробната информация от геоложкия доклад за находище „Мартин“. По този начин резултатите от макро- и микроскопските изследвания бяха съпоставени с вече наличната информация за района, което позволи по-детайлна интерпретация и потвърждение на петрографските разновидности.

Особено внимание беше отделено на количественото съотношение между минералните компоненти и тяхната морфология, тъй като именно тези показатели са пряко свързани с физико-механичните свойства на амфиболитите. Освен това, при анализа бяха включени и критерии за оценка на



декоративния потенциал на скалите – еднородност на структурата, цветови вариации, способност за полиране и устойчивост на външни въздействия.

Резултатите от прилагането на тези методи създадоха основата за цялостната петрографска характеристика на амфиболитите от находище „Мартин“, като обхващат както чисто геоложките, така и практическите аспекти на тяхната приложимост.

Резултати

Амфиболитите от находище „Мартин“ се характеризират с изключително разнообразен макроскопски облик, който в значителна степен е обусловен от тяхната минерален състав, степента на метаморфизъм и влиянието на тектонските процеси. Общият цветови диапазон варира от зелен и тъмнозелен до почти черен. В редица участъци се наблюдават по-светлозелени оттенъци, свързани с по-високо съдържание на епидот или хлорит, докато тъмните тонове се дължат на доминирането на амфибол и биотит. При повърхностно изветряне скалите придобиват характерни ръждивокафяви оттенъци, породени от окислението на рудните минерали (напр. магнетит, илменит и сулфиди), което им придава специфичен декоративен ефект.

Текстурата на амфиболитите е масивна до ясно изразено слоеста. Масивните разновидности се отличават с еднородна структура и висока здравина, но поради липсата на добре оформени цепителни повърхности са неподходящи за получаване на тънки облицовъчни плочи. Обратно, слоестите амфиболити показват ясно подчертана фолиация и редуване на светли и тъмни ивици, което улеснява тяхното естествено разцепване. Именно тези разновидности се считат за най-продуктивни в технологично отношение и са особено търсени за облицовъчни приложения.

Амфиболитите се характеризират с гранобластова и порфиробластова структура. В гранобластовите разновидности минералните зърна са приблизително равномерни по размер, което придава на скалата хомогенен външен вид. Порфиробластовите разновидности съдържат по-едри кристали от амфибол или плагиоклаз сред по-дребнозърнеста основна маса, което води до по-неравномерна текстура, но същевременно добавя декоративна стойност.

Често се наблюдават и тънки кварцови жилки или епидотови агрегати в скалата, които допълнително обогатяват нейния външен облик. Наличието на тези жилки обаче в някои случаи може да намали технологичната стойност на суровината, тъй като води до повишена напуканост и по-малък размер на годните за добив блокове.

В обобщение, макроскопските характеристики на амфиболитите от находище „Мартин“ демонстрират ясно изразено разнообразие, което определя различната им приложимост. Слоестите разновидности с добре оформена цепливост са най-перспективни за декоративен камък, докато масивните разновидности имат ограничена приложимост и изискват допълнителна преценка в зависимост от технологичните нужди.

Минерален състав

Минералният състав на амфиболитите от находище „Мартин“ е доминиран от типичната асоциация за метаморфни мафични скали, при която преобладават амфиболът и плагиоклазът. Амфиболът формира масивната тъмнозелена до черна окраска на скалата и участва в количества между 40–60 %. Кристалите са призматични, често с ясно изразено удължение и ориентация по фолиацията. В някои разновидности амфиболът е нематобластов, формирайки снопове, които определят слоестия облик на скалата.

Плагиоклазът е вторият основен минерал и варира от 25 до 40 % в различните образци. Среща се под формата на дребни до среднозърнести агрегати. В някои случаи плагиоклазът е серицитизиран и частично променен при вторичната промяна.

Кварцът участва в по-малки количества (5–10 %), но има важно значение за структурната организация на скалата. Той се разполага между кристалите на амфибола и плагиоклаза като



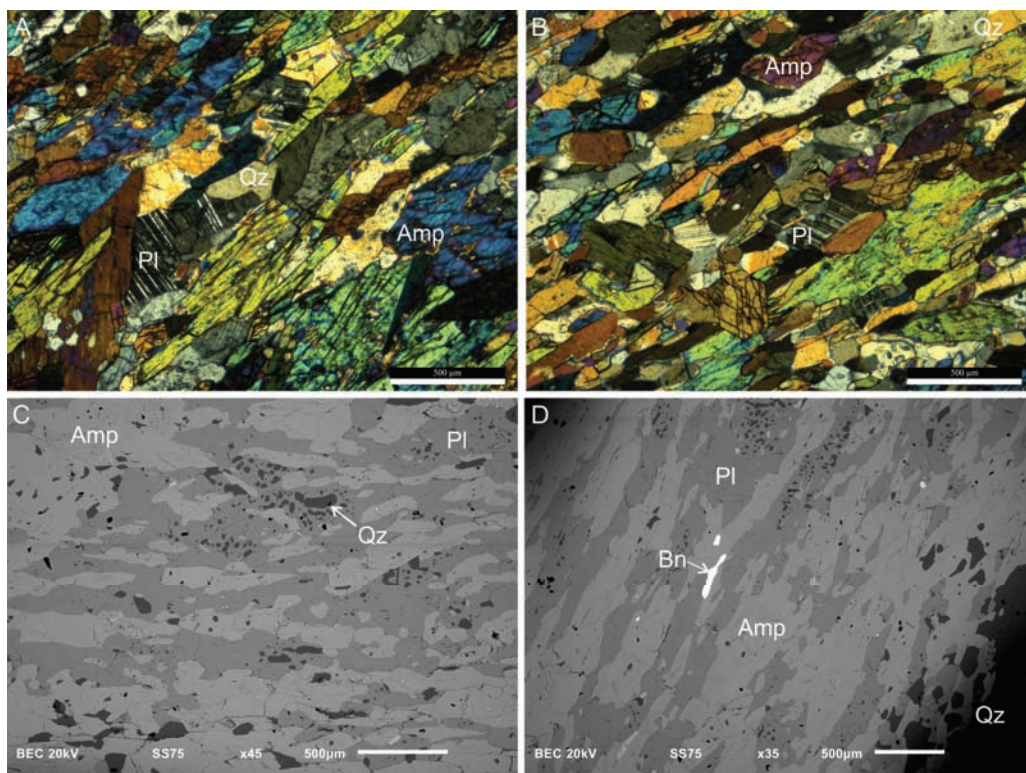
ксеноморфни зърна, които запълват междузърновите пространства. Често формира тънки жилки или агрегати, които допринасят за неравномерността на текстурата.

Бiotитът е характерен второстепенен минерал, който се среща под формата на кафяви до тъмнокафяви люспи. В някои проби количеството му достига до 5 %, като участието му е по-значимо в милонитизираните разновидности, където той често образува тънки прослойки.

Епидотът и гранатът са основни акцесорни минерали. Епидотът често образува зеленикави агрегати, които придават на скалата петнист вид. Гранатът се среща като единични кристали, включени в основната маса, и в редки случаи формира по-значителни порфиروبласти. В малки количества и като единични зърна са установени апатит и рутил.

Рудните минерали в изследваните образци са представени основно от сулфиди (напр. халкопирит, борнит, Фиг. 2). Те формират дребни неправилни зърна в общия обем на скалата. При повърхностно изветряне именно тези минерали са причина за образуването на ръждивокафяви оттенъци.

В обобщение, минералният състав на амфиболитите от находище „Мартин“ е типичен за този вид метаморфни скали. Основната двойка амфибол–плаггиоклаз осигурява устойчиви физико-механични свойства, докато наличието на второстепенните и акцесорните минерали придават специфични декоративни ефекти. Вариациите в количествените съотношения и степента на вторични промени определят петрографските разновидности и са пряко свързани с тяхната технологична пригодност.



Фиг. 2. Минерален състав на амфиболитите. А), В) Микроскопски снимки изобразяващи преобладаващите амфиболони и плаггиоклаз - кварцови ивици. Наблюдава се идиоморфната до хипидиоморфна кристална форма на амфибола и ксеноморфните очертания на плаггиоклаза и кварца; С), D) SEM изображения подчертаващи ивичестата минерална текстура на скалата. Съкращения: Amp-амфибол, Bn-борнит, Qz-кварц, Pl-плаггиоклаз

Химичен състав

Според химичният състав и рентгеноструктурните данни, амфиболът в скалата е определен като магнезиален амфибол. Въз основа на проведеното наблюдение в режим на обратно-отразени електрони, амфиболовите кристали не показват химична нехомогенност и/или зоналност. Поради тази



причина съдържанията в тегл. % на основните елементи варират в сравнително тесни граници: CaO (11.71-11.85), MgO (15.49-17.11), Al₂O₃ (9.30-11.17), SiO₂ (48.98-51.63), като са характерни и значителни количества от FeO (9.22-10.98). Повечето анализирани състави са допълнени и от Na₂O в интервала 1.02-1.54 тегл. %. Подобни са съдържанията на Na₂O (1.37-1.77 тегл. %) и в плагиоклазите, които са представени от почти чист анортит.

Количествата на измерените микроелементи в амфибола са представени в табл. 1. Стойностите на отделните елементи са относително сходни, с вариации в изключително тесни интервали, поради хомогенността на състава на изследваните минерали. Измерени са високи съдържания (в стотици ppm) на Cr, V, Ni, и в десетки ppm на Co, Sc, Zn. Останалите елементи са в минимални количества.

Съставът на плагиоклаза се отличава със съдържания (ppm) на Sr (249-263), Ba (17-20), Ga (13-18).

Таблица 1. Съдържание в ppm на микроелементи в магнезиален амфибол от амфиболит

елемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Li	11.2	9.7	10.6	13.7	11.7	13.8	7.6	9.0
Sc	58.4	49.3	49.0	49.8	52.2	46.7	49.4	49.8
V	221.6	218.1	216.5	216.7	218.3	206.6	228.7	222.3
Cr	282.2	371.1	509.3	627.6	459.6	280.1	552.9	838.6
Co	61.0	57.0	56.0	61.6	59.7	57.2	62.0	59.7
Ni	161.3	187.8	144.6	162.2	166.2	149.2	155.5	182.1
Zn	48.1	44.6	43.9	61.4	46.1	48.0	51.5	50.0
Ga	8.11	9.97	9.86	8.26	9.46	9.86	9.51	10.85
Rb	3.05	1.45	1.68	1.88	1.94	1.74	1.95	1.62
Sr	3.85	4.34	3.95	3.69	4.14	3.57	4.32	5.13
Y	5.75	5.88	6.09	5.67	5.46	5.43	6.95	6.47
Zr	4.25	4.58	4.01	4.34	5.07	4.29	5.41	4.34
Ba	5.10	6.28	5.15	5.38	4.85	5.95	3.45	4.11

Текстурни и структурни характеристики

Амфиболитите от находище „Мартин“ демонстрират широк спектър от структурни и текстурни особености, които са пряко свързани с техния генезис, степента на метаморфизъм и последващите тектонски процеси. Основните текстури, наблюдавани при макро- и микроскопско изследване, са гранобластова, порфиробластова и нематобластова.

Гранобластовата структура е типична за значителна част от пробите и се характеризира с приблизително равномерни по размер минерални зърна, плътно подредени едно към друго. Тази структура придава на скалата хомогенен външен вид и осигурява стабилност на физико-механичните показатели. Гранобластовите разновидности са особено подходящи за добив на плочи и декоративни елементи, тъй като позволяват оформяне на изделия с добри физико-механични качества.

Порфиробластовата структура е установена в участъци, където амфиболът или плагиоклазът формират по-едри кристали, включени в по-дребнозърнест фон. Тези по-едри кристали (порфиробласти) придават петнист облик на скалата и повишават декоративната ѝ стойност, макар и да могат да създадат трудности при рязане и обработка, особено ако ориентацията им е хаотична.

Нематобластовата структура е характерна за разновидностите с добре изразена фолиация. Тя се дължи на ориентираните призматични кристали на амфибола, които образуват снопове, подредени в определена посока. Именно тези снопове придават на амфиболитите ясно изразената им слоистост и



улесняват процеса на цепене при добив на плочи. Нематобластовите разновидности се считат за най-продуктивни от гледна точка на промишлена експлоатация.

В някои проби се наблюдават кварцови и епидотови жилки, които пресичат скалната маса. Макар да придават декоративни елементи под формата на светли линии и петна, те често водят до повишена напуканост и намаляват годността на материала за големи блокове.

Милонитизираните и катаклазирани зони са резултат от интензивни тектонски процеси. В тях минералите са силно натрошени и преориентирани, като често се наблюдават финозърнести агрегати с хаотична подредба. Будинажни структури свидетелстват за интензивни деформации, които значително нарушават първоначалната организация на скалата. Тези зони нямат технологична стойност и следва да се избягват при бъдещ добив.

В обобщение, текстурните и структурните особености на амфиболитите от находище „Мартин“ са решаващи за тяхната технологична пригодност. Гладкослоестите нематобластови разновидности са най-подходящи за добив на декоративни плочи, гранобластовите – за трошен камък за пътното строителство, докато милонитизираните разновидности следва да бъдат изключвани от промишлена експлоатация.

Гладкослоести амфиболити - Това са най-продуктивните и икономически ценни разновидности. Те се характеризират с добре изразена фолиация и висока степен на цепливост, обусловена от ориентираните амфиболони индивиди. Цветът им варира от тъмнозелен до черен, като в някои случаи се наблюдават слабо преходяне и редуване на по-светли и по-тъмни ивици. Макроскопски скалата изглежда хомогенна, а микроскопски се установява нематобластова структура с паралелно подредени амфиболони призматични кристали. Гладкослоестите амфиболити са най-търсени за производство на облицовъчни плочи, настилки и декоративни елементи, тъй като позволяват оформянето на плочи с големи размери и равни повърхности.

Масивни амфиболити - Масивните разновидности се отличават с по-слабо изразена или почти липсваща фолиация. Текстурата е еднородна, а структурата – предимно гранобластова. Цветът е тъмнозелен до почти черен, без отчетливи ивици или редувания. Тези скали притежават висока механична здравина и устойчивост, но поради липсата на естествени цепителни повърхности са по-трудни за обработка. Въпреки това те могат да намерят приложение в случаите, когато се търси като блокчета за градеж или като суровина за пътното строителство.

Милонитизирани амфиболити - Тази разновидност е резултат от силно тектонско въздействие, при което първоначалната структура на скалата е разрушена и заменена от финозърнеата, често неподредена текстура. Цветът е петнист, с редуване на по-светли и по-тъмни ивици, а в някои случаи се наблюдават зони с изцяло натрошени минерални агрегати. Микроскопски се вижда преориентиране на минералите, наличието на микропукнатини и вторични минерали като серицит и епидот. Милонитизираните амфиболити имат ниска технологична стойност, тъй като не позволяват оформянето на качествени изделия и присъствието им води до висок процент на производствени загуби.

Смесени и преходни разновидности - В редица участъци се наблюдават преходи между гладкослоести и масивни амфиболити, както и зони, в които милонитизацията засяга само частично скалната маса. Тези разновидности имат междинна стойност и тяхната пригодност за декоративни цели трябва да се оценява индивидуално за всяка експлоатационна зона.

В обобщение, петрографската характеристика на находище „Мартин“ ясно показва, че минералния състав и скалната структура имат решаващо значение за качествата и технологичните свойства на този вид скалнооблицовъчни материали.

Дискусия

Петрографските особености на амфиболитите от находище „Мартин“ оказват пряко и определящо влияние върху тяхната приложимост като суровина за декоративни и строителни цели. Детайлното разграничаване на разновидностите – гладкослоести, масивни и милонитизирани – позволява по-точна оценка на технологичната стойност и перспективите за промишлен добив.



Влияние на петрографските особености върху добива - Гладкослоестите амфиболити са най-продуктивните разновидности. Тяхната нематобластова структура, обусловена от ориентираните дългопризматични кристали на амфибола, създава естествени цепителни плоскости, които улесняват оформянето на блокове и плочи. Този тип скала позволява добив с висок рандеман и минимални загуби, което я прави икономически изгодна. Масивните амфиболити, въпреки че имат висока якост и устойчивост, са по-малко предпочитани, тъй като липсата на ясно изразена фолиация затруднява технологичната обработка. Милонитизираните разновидности, от друга страна, са без стойност за добив – те често са силно напукани, дребнозърнести и с нарушена хомогенност, което води до висок процент отпадък.

Тектонски влияния и ограничения - Тектонските процеси в района на находище „Мартин“ играят двойна роля. От една страна, скалната структура и обусловените от нея пукнатини създават благоприятни условия за добив чрез образуване на естествени цепителни повърхности. От друга страна, прекомерната милонитизация и катаклазиране водят до влошаване на качеството на суровината и намаляване на нейната използваемост. Будинажните структури и зони с вторична минерализация (епидот, серицит, хлорит) също могат да се разглеждат като неблагоприятни фактори, тъй като намаляват технологичните качества и до определена степен декоративните качества на скалата.

Заклучения

Проведените петрографски изследвания върху амфиболитите от находище „Мартин“ (Западни Родопи) дават ясна и детайлна представа за значението, което оказват литоложкия състав, структурните и текстурните особености на скалите за тяхната промишлена приложимост. Анализът показва, че суровината е висококачествена и атрактивна за използване като декоративен и строителен камък.

Гладкослоестите амфиболити имат най-значим дял в находището и представляват най-продуктивната разновидност. Те се характеризират с добре изразена фолиация, висока степен на цепливост и хомогенност на структурата. Именно тези качества ги правят изключително подходящи за добив на облицовъчни плочи и декоративни настилки с висока пазарна стойност.

Широко разпространение имат масивните амфиболити. Те притежават значителна якост и устойчивост, което ги прави подходящи за определени специализирани приложения, като изграждане на пътни настилки, производство на павеа, както и за строителни блокове. Ограничение при тяхното използване е липсата на добре развити цепителни повърхности, което намалява ефективността на промишления добив за облицовъчни плочи.

Милонитизираните разновидности заемат по-малка част от разреза и се отличават с ниска технологична стойност. Те са силно напукани, дребнозърнести и често с нарушена хомогенност, което ги прави неподходящи за декоративни цели. Въпреки това, тези зони могат да намерят ограничено приложение за производство на трошен камък и инертни материали.

Влиянието на тектонските условия е двустранно. От една страна, те формират полезното изкопаемо чрез образуване на вътрешни структурни нееднородности – естествени плоскости на цепене, което обуславя пригодността за технологичната обработка на скалата чрез цепене. От друга страна, прекомерната тектонизация, милонитизация и вторичните минерализации в определени зони ограничават качеството на добиваната суровина.

В заключение, петрографската характеристика на амфиболитите от находище „Мартин“ има геолого-генетично значение за определянето им като полезно. Тези резултати определят петрографската характеристика като важен индикатор при търсенето и проучването на облицовъчни материали.

Благодарности: Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г и финансирана от МОН.



Acknowledgements: This work has been carried out in the framework of the National Science Program "Critical and strategic raw materials for a green transition and sustainable development", approved by the Resolution of the Council of Ministers № 508/18.07.2024 and funded by the Ministry of Education and Science (MES) of Bulgaria

References

Сотиров, Б. и колектив, 2022. Геоложки доклад за находище „Мартин“.
Кожухаров, Д., Маринова, Р., 1994. Геоложка карта на България, М 1:100 000, лист „Гоце Делчев“. Българска академия на науките, София. Геологически институт при БАН и „Геология и геофизика“ АД.
Саров, С. и колектив, 2010. Геоложка карта на България, М 1:50 000, листове „К-34-96-Б (Хаджидимово)“ и „К-34-96-Г (Илинден)“. НИИ „Геология и геофизика“ АД и Софийски университет „Св. Климент Охридски“.



ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ЕКОЛОГИЧНО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЛИГНИТНИ ВЪГЛИЩА ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ХУМИНОВИ ПОДОБРИТЕЛИ НА ПОЧВАТА

инж. Ирена Михайлова i_mihailova@mail.bg
проф. д-р Георги Стоянчев g.stoyanchev@mail.bg

Въглищата са изобилен ресурс, който за съжаление е допринесъл за изменението на климата чрез използването им като изкопаемо гориво.

През 2021 г. ЕС прие своя Европейски закон за климата, с който се установява обвързваща цел на ЕС за нулеви нетни емисии на парникови газове до 2050 г. Постепенното прекратяване на употребата на въглища за производство на електроенергия е от съществено значение за постигането на целите на ЕС в областта на климата и с тази цел през 2020 г. ЕС създава Фонда за справедлив преход на стойност 19,3 млрд. евро, който да помогне за прехода към неутралност по отношение на климата.

Тъй като човечеството се стреми да премине към други средства за производство на енергия, ще бъде важно да се разгледа и преоцени икономическата роля на въглищата. Освен за производство на енергия въглищата имат ограничено използване и в други отрасли на промишлеността. Например въглища се използват в химическата промишленост и чрез преработката им се добиват химически продукти, лекарства, въглеродни влакна и пяна, синтетични горива и катран на петролна основа. Използват се също за производството на цимент, хартия, тухли и други индустриални материали. Уникалната форма и плътност на антрацита го правят идеален за системи за филтриране на вода. Това е един от най-ефективните начини за пречистване на промишлени и общински води за пиене и ежедневна употреба.

Целта на извършените от нас изследвания на българските лигнитни въглища е доказването на наличието на хуминови киселини в техния състав, както и използването им като суровина за добив на хуминови киселини използвани в земеделието.

Почвата е невъзстановим природен ресурс и по тази причина е необходима постоянна превенция, за да бъде съхранена. При съвременното интензивно използване на почвите у нас, количеството на хумуса значително намалява, а в някои случаи се влошава и неговото качество. Положително влияние върху по-нататъшното почвообразуване и развитието на почвеното плодородие оказва само качественият хумус. Това е зрелият хумус, който има неутрална реакция. Той е съставен главно от хуминови киселини и обуславя водоустойчива троховидно-зърнеста структура на почвата. Освен азот, съдържа и много други хранителни елементи, които се освобождават при неговото разлагане. Тук особено голяма е ролята на т.н. активен хумус. Това е главно частта от свежо отложени хуминови киселини, които при коагулацията си, главно с калция, образуват именно устойчивата троховидно-зърнеста структура. Ежегодното отлагане на такъв хумус осигурява поддържането на почвата в добро структурно състояние.

Самото присъствие на химичните елементи в почвата не е достатъчно. Трябва да се поддържат оптимални условия, необходими за растежа на растенията. Органичните вещества са най-добрият резервоар и най-важната съставка на хумуса. Най-активните биохимични компоненти на хумуса са хуминовите киселини.

От химична гледна точка хумусът има киселинна природа - състои се от органични киселини, отнасящи се към групите на карбоновите и оксикарбоновите киселини, които се наричат хумусни киселини. Хумусните вещества могат да бъдат класифицирани в хуминови киселини, флувокиселина и хумин в зависимост от тяхната разтворимост. Хуминовите киселини са изградени от: С - 46-62%, О - 32-38%, Н - 3-5%, N - 3-6% и малко пепелни елементи. Те са високомолекулни съединения - с голяма молекулна маса.



Характерна особеност на хуминовите киселини е тяхната полидисперсност (наличие на частици с различна големина) и хетерогенност (нееднороден строеж).

Хумусните вещества, получени от въглища имат по-висш стадий на зрелост, поради това хуминови субстанции от най-високо качество се получават от добре окислени въглеродни вещества. В кафявите въглища и лигнитите съдържанието на хумусоподобни субстанции е от 17 до 80%.

В световен мащаб, подобрители на почвата и органични торове на базата лигнитни въглища, като „Дударит“, „Биотрон“, „Хумак Агро“ и др., се прилагат дългогодишно в много страни /Унгария, Италия, Словакия, Чехия, Полша, Испания, Румъния, Украйна, Турция, Гърция, САЩ, Канада, и др./ с развито високоефективно земеделие, даващо екологично чиста продукция с високи вкусови и хранителни качества.

В нашата страна още през 60-те години на ХХ век са започнали изследвания на кафяви и лигнитни въглища с цел извличане на хуминови киселини от въглища за промишленото им производството и прилагане в земеделието. [2]

Екипът ни проведе изследвания на въглища добивани от различни рудници на територията на нашата страна. Проби от въглища от Пернишки въглищен басейн, въглища от р-к Ораново, р-к „Станянци“, р-к „Канина“, р-к „Бели брег“, р-к „Чукурово“ и Мини Марица изток са изследвани в Института по почвознание, агротехнологии и защита на растенията „Николай Пушкарров“ за определяне на съдържанието на органичен въглерод и наличие на хуминови киселини. Резултатите са показани в Таблица №1.

От таблицата се вижда, че от пробите на въглищата от Пернишки въглищен басейн, р-к „Канина“, р-к „Бели брег“ и р-к „Чукурово“ не могат да се отделят хуминова киселина, защото са неразтворими. Най-висок процент органичен въглерод, както и хуминови и фулво киселини има пробата от въглища от Мини Марица изток.

Базирайки се на получените резултати можем да обобщим, че не от всички български лигнитни въглищни могат да се извлекат хуминови киселини. Оказва се, че в седиментационната органична материя - леонардит, която не е достигнала състоянието на въглища при процеса на въглефикация и се различава от меко кафявите въглища по високата си степен на окисляване, е с най-висока концентрация на хуминови киселини и в нашия случай това са въглищата от Мини Марица изток.

Таблица №1

№ по ред	Въглища от:	Общ С%	Органичен въглерод, (%)			C _x /C _ф
			Екстрахиран с 0.1MNa ₄ P ₂ O ₇ +0.1MNaOH			
			Общ	Хум. к-на	Фулво к-на	
1	Пернишки въглищен басейн	39,71	Не разтворим			
2	р-к Ораново	20,40	<u>4,63a</u> 22,706	<u>3,27</u> 16,03	<u>1,36</u> 6,67	2,40
3	р-к „Станянци“	30,76	<u>14,31a</u> 46,526	<u>7,27</u> 23,63	<u>7,04</u> 22,89	1,03
4	р-к „Канина“	38,26	Не разтворим			
5	р-к „Бели брег“	18,57	Не разтворим			
6	р-к „Чукурово“	23,06	Не разтворим			
7	Мини Марица изток	27,40	<u>10,78a</u> 39,346	<u>8,46</u> 30,88	<u>2,32</u> 8,46	3.65

Означения: а-% от въглищната проба; б - % от общия въглерод.



В почвообразуването особено значение имат някои химични елементи, които представляват основен материал за изграждане на минералната съставка на почвите. Те се явяват и като необходими хранителни елементи за растенията и без тях е невъзможно изграждането на органичното вещество.

Едни от тези елементи се използват в голямо (макро) количество, тъй като участват активно в изграждането на органичното вещество като градивен материал - O, C, Si, N, Ca, Mg, K, Na, P, S и др. Тези елементи растенията приемат като хранителни в по-голямо количество, са макроелементи. Други хранителни елементи растенията използват в минимални (микро) количества, тъй като те не участват в изграждането на органичните вещества, а участват главно в изграждането на някои специфични органични вещества, образуващи се в минимални количества, но играещи роля на катализатори и регулатори на жизнените процеси - ензими, хормони, витамини и др. Тези хранителни елементи, които растенията използват в минимални количества, са микроелементи. Тези елементи се съдържат в почвата също в микроколичества. Особено голямо значение при формиране на почвите и развитие на тяхното плодородие от макроелементите имат Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, N, P и S, а от микроелементите - Mn, Cu, Zn, Co, B, Mo и J.[3]

Затова ние решихме да проверим какво е наличието на макро и микро елементи във въглищата на Мини Марица изток . Получените резултати са поместени в Таблица №2.

Направихме проверка и за наличие на тежки метали във въглищна проба от Мини Марица изток, Таблица № 3.

Таблица №2

№ по ред	Наименование на характеристиката	Единица на величината	Резултат
1	Общ азот	mg/kg	6278.99
2	Общ фосфор	mg/kg	37.09
3	Общ калий	mg/kg	917.00
4	Калций	mg/kg	7676.00
5	Магнезий	mg/kg	3359.00
6	Сулфатна сяра	mg/kg	2126.00
7	Мед	mg/kg	17.07
8	Желязо	mg/kg	15381.00
9	Цинк	mg/kg	23.14
10	Манган	mg/kg	220.16

Таблица № 3

№ по ред	Наименование на характеристиката	Единица на величината	Резултат
1	Олово	mg/kg	13.17
2	Кадмий	mg/kg	<1.00
3	Хром	mg/kg	17.41
4	Арсен	mg/kg	6.87
5	Живак	mg/kg	<0.1
6	Никел	mg/kg	21.74



Доброто съдържание на микро и макро елементи, както и ниските съдържания на тежки елементи ни накара да помислим върху идеята да разработим подобрител на почва на основата на лигнитни въглища.

През 2016г. започнаха първите опити за лабораторно производство на подобрител на почви от окислени лигнитни въглища - леонардит под търговското име „ХУМЕКО“. Това е чист природен продукт с рН 6.9, типичен представител на агропродуктите. Съдържа мин. 50% въглерод; мин. 50% хуминови киселини; калций (Ca) – 0,8 %; магнезий (Mg) - 0,3%; желязо (Fe) -1,5%; сяра (S) – 3,6 %. Не съдържа вредни вещества и тежки метали над нормите.

За оценка на влиянието на „ХУМЕКО“, бе заложен експеримент на два типа почви - пясъкливо-глинести и тежки глинести. При обработката на пясъкливо-глинещата почва с 10 kg/дка „ХУМЕКО“ се наблюдава намаляване на загубата на почвата при ерозия с 29% и със същата приблизително величина се намалявана загубата при ерозия на другата почва, обработена с 20 kg/дка.

Следствие на внасянето на „ХУМЕКО“ се наблюдава повишената инфилтрация и просмукване на водата, намаленият отток, устойчивостта на ерозия и повишената аерация са други полезни ефекти, които косвено се поддържат от хумусни вещества.

Наторените почви едновременно задържат необходимата влага - намалява нуждата от напояване до 30 % или се дренира излишната влага и растенията не загиват.

Влиянието на „ХУМЕКО“ може да се обобщи така:

- Намалява ерозията на почвата;
- Регулира рН на почвата;
- Подобрява способността за задържане на водата в почвата;
- Има благоприятно въздействие върху структурата на почвата;
- Подходящ за елиминиране на замърсители, причинени от тежки метали и остатъци от химически препарати (пестициди, хербициди);
- Подобрява капацитета на почвения буфер;
- Стимулира функционирането на микроорганизмите в почвата;
- Действа като органичен катализатор.

След отчитане на резултатите от преведените опити и експерименти регистрирахме в БАБХ гранулиран подобрител на почви „ХУМЕКО“ на основата на леонардит, продукт на лигнитни въглища с рег. №394/05.08.2019г

Заклучение:

Въглищата са голям земен ресурс, който в по-голямата си част все още се използва за производство на енергия, но използването им като гориво все по-вече се поставя под въпрос. За това трябва да се търсят и други начини за бъдещето им ефективното използване, които са високо ефективни, полезни за човечеството, с грижа за почвата и природата.

Произвежданите хуминови продукти от лигнитни въглища са много подходящи при възстановяване и рекултивация на терени ползвани за минни дейности.

В земеделието хуминовите продукти могат да се комбинират с използваните минерални торове и да се композират специфични продукти за определени почви.

Литература:

1. Янева, В., Н. Ников, и др. Органичното вещество на почвата и неговото значение за растенията, Почвознание, агрохимия и екология, Годишник XLII №4, стр. 69-71
2. Шарков, Ив., Ст. Кларова, Хуминови киселини в българските лигнитни въглища, Годишник НИ за горива и топлотехника, том VIII, 1962, стр. 73-86
3. Гюров, Г., Н. Артинова, Почвознание, Пловдив, 2015
4. Филчева, Е., Р. Илиева, К. Чакалов, Т. Попова, В. Савов, и др. Характеристика на хумусни системи на естествени и изкуствени подобрители на почвата, Agricultural University – Plovdiv, 2015
5. Karr, M., Oxidized Lignites and Extracts from Oxidized Lignites in Agriculture. ARCPACS Cert. Prof. Soil. Sci.. May, 2001



ВЛИЯНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ИЗТОЧНОМАРИШКИТЕ ЛИГНИТИ ВЪРХУ ПОТЕНЦИАЛА ИМ ЗА ГАЗИФИКАЦИЯ И ВТЕЧНЯВАНЕ

Деница Апостолова¹, Ирена Костова¹, Данаил Йовчев²

¹Софийски университет „Св. Кл. Охридски“, Катедра Геология, палеонтология и изкопаеми горива; ²Минно-геоложки университет „Св. Ив. Рилски“, Катедра Геология и проучване на полезни изкопаеми

ВЪВЕДЕНИЕ

Въпреки стремежа за ограничаване на въглеродните емисии в атмосферата, използването на въглища продължава да заема съществен дял в световния енергиен баланс, факт, който стимулира разработването на по-ефективни технологии за тяхното използване. Такива алтернативни методи са газификацията и втечняването на въглищата, които водят до преобразуването им в продукти с по-висока добавена стойност. Газификацията представлява процес на трансформиране на твърдите горива в синтетичен газ, съставен основно от CO и H₂, който може да се използва за производство на електроенергия, водород и различни химични продукти. В сравнение с директното изгаряне, процесът позволява предварително пречистване на газа от SO_x, NO_x и тежки метали и по-лесно интегриране на технологии за улавяне на CO₂ [1].

Ефективността на газификацията е зависима от характеристиките на използваното гориво, като съдържанието на влага, пепел, летливи вещества и сяра, които оказват влияние върху реактивността на въглищата и протичането на химичните реакции [1,2]. Въглищата с нисък ранг (напр. лигнити) обикновено проявяват по-висока реактивност поради по-високото съдържание на летливи вещества и кислородсъдържащи функционални групи [3].

Втечняването на въглищата представлява термохимичен процес, при който органичните компоненти се преобразуват в течни въглеводородни продукти и химични суровини. Основните подходи включват директно втечняване (Direct Coal Liquefaction, DCL), при което макромолекулната структура на въглищата се деполимеризира и хидрогенизира в присъствие на разтворител, H₂ и катализатор, както и директно втечняване със синтетичен газ (Direct Coal Liquefaction with Syngas, DCLS), при което CO и H₂O участват в реакцията на водно-газово изместване, генерираща водород *in situ*, необходим за последващите реакции на хидрогенизиране [5]. Ефективността на процесите на втечняване зависи в голяма степен от ранга, съдържанието на влага, пепел, летливи вещества и S, както и от вида на използвания разтворител и катализатори [4, 5].

Лигнитите от Източномаришкия въглищен басейн в България имат ключово значение за енергетиката на страната. Въпреки това потенциалът на лигнитите за използване в алтернативни термохимични технологии остава слабо проучен. В рамките на Националната научна програма си поставяме за цел да изследваме и анализираме основните физични, химични и други параметри на въглищата, които да отговорят на въпроса подходящи ли са те за процеси на газификация и/или втечняване с цел задоволяване на огромните нужди от енергия за проучване и добив на критични и стратегически суровини.

МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

Изследвани са 13 проби от II и III пласт на рудник „Трояново-3“ от Източномаришкия въглищен басейн. Определени са основните им характеристики, които включват определяне на влага, пепел, добив на летливи вещества и съдържание на общата сяра. Анализите са извършени в Лабораторията по органична петрология и геохимия на Софийски университет. Определянето на техническите показатели е извършено в съответствие с международно приетите стандарти, както следва: съдържание на аналитична влага (W^a, %) – по ISO 1015:1975 [6]; съдържание на пепел (A^d, %) – по ISO



1171:2010 [7]; добив на летливи вещества на суха безпепелна основа (V^{daf} , %) – по ISO 20360:2020 [8]; съдържание на обща сяра (S_{total} , %) – по метода на Ешка (ISO 334:2013) [9].

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

I. ВЛИЯНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЪГЛИЩАТА ВЪРХУ ПРОЦЕСА НА ГАЗИФИКАЦИЯ

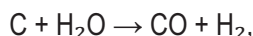
Резултатите от техническия анализ са представени в Таблица 1 и показват, че лигнитите от Източномаришкия басейн се характеризират със сравнително високо съдържание на влага (15,17–17,75%), променливо пепелно съдържание (12,04–24,74%), високи стойности на летливи вещества (59,44–63,16% daf) и повишено съдържание на обща сяра (2,68–4,79%).

Таблица 1. Основни характеристики на изследваните лигнити от Източномаришкия басейн.

Проба №	W^a	A^d	V^{daf}	S_{total}
1	16,33	22,38	61,27	4,79
2	15,92	15,64	60,09	3,32
3	15,63	20,37	62,41	2,98
4	16,34	18,45	63,16	4,61
5	17,28	16,66	61,47	2,68
6	17,75	15,99	61,34	3,32
7	16,11	20,66	62,41	4,04
8	15,72	17,22	59,44	4,33
9	15,59	13,80	62,60	3,62
10	15,65	12,04	61,89	3,46
11	17,06	13,27	61,67	4,31
12	16,12	17,51	62,06	3,28
13	15,17	24,74	62,84	4,02
Средна стойност	16,21	17,67	61,74	3,76

(W^a , %) – аналитична влага; (A^d , %) – съдържание на пепел; (V^{daf} , %) – добив на летливи вещества на суха безпепелна маса; (S_{total} , %) – съдържание на обща сяра.

Сравнително високото съдържание на влага оказва неблагоприятно влияние върху процеса, тъй като налага предварително изсушаване на въглищата и допълнителни енергийни разходи. Това може да доведе до понижаване на температурата в реакционната зона и до намаляване на ефективността на газификацията [1]. В същото време водната пара участва във водногазовата реакция:



което може частично да компенсира неблагоприятния ефект на влагата чрез повишаване на съдържанието на H_2 в получения синтетичен газ.

Пепелното съдържание в изследваните проби варира в широки граници. Наличието на минерални примеси във въглищата може да окаже различно влияние върху газификацията в зависимост от количеството и състава си. При високи температури част от минералните примеси може да премине в стопилката, което създава предпоставки за шлакообразуване, агломерация и технологични затруднения в работата на газификатора [1, 2].



Високото съдържание на летливи вещества е важна характеристика, определяща повишената реактивност на въглищата. При газификация летливите компоненти се отделят в началния етап на пиролиза, като образуват газови продукти (CO , H_2 , CH_4) и оставят реактивен въглероден остатък (char). Въглищата с нисък ранг, в това число и Източноаришките лигнити проявяват по-висока реактивност в сравнение с въглищата с висок ранг поради по-развита пореста структура и по-голямо съдържание на кислородсъдържащи функционални групи [2, 3]. Подобни резултати са установени и при газификация на гръцки лигнити, при които е отчетена зависимост между характеристиките на въглищата, реактивността на образувания въглероден остатък (char) и състава на получения синтетичен газ [10].

Повишеното съдържание на сяра, достигащо до около 5%, представлява съществен технологичен и екологичен фактор. По време на газификацията сярата преминава основно в газова фаза под формата на H_2S и COS , което налага последващо почистване на синтетичния газ преди неговото използване [1]. В сравнение с директното изгаряне, това може да се разглежда като технологично предимство, тъй като позволява по-ефективен контрол върху серните съединения преди крайното използване на синтетичния газ.

На фигура 1 са представени данните от изследването на основните характеристики на пробите и на базата на тях са посочени предимства и ограниченията на Източноаришките лигнити при евентуалната им газификация.



Фигура 1. Отражение на основните характеристики на източноаришките лигнити върху способността им да се газифицират.

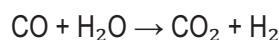
Анализираните характеристики показват, че високото съдържание на летливи вещества и ниският ранг на изследваните лигнити предполагат добра реактивност и благоприятни условия за използването им в процеси на газификация. Основните технологични ограничения са свързани с относително високото съдържание на влага, променливото пепелно съдържание и риска от шлакообразуване при част от



пробите, както и с необходимостта от последващо пречистване на синтетичния газ от серни съединения.

II. ВЛИЯНИЕ НА ОСНОВНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЪГЛИЩАТА ВЪРХУ ПРОЦЕСА НА ВТЕЧНЯВАНЕ

В таблица 1 са представени основните параметри на изследваните проби, които оказват съществено влияние върху тяхното поведение при процесите на директно втечняване (DCL) и директно втечняване със синтетичен газ (DCLS). Съдържанието на влага традиционно се разглежда като неблагоприятен фактор при конвенционалните DCL процеси, тъй като изисква предварително изсушаване на суровината. При DCLS процесите, използващи CO и H₂O, влиянието на влагата може да бъде по-слабо изразено, тъй като водата участва в реакцията на водно-газово изместване:

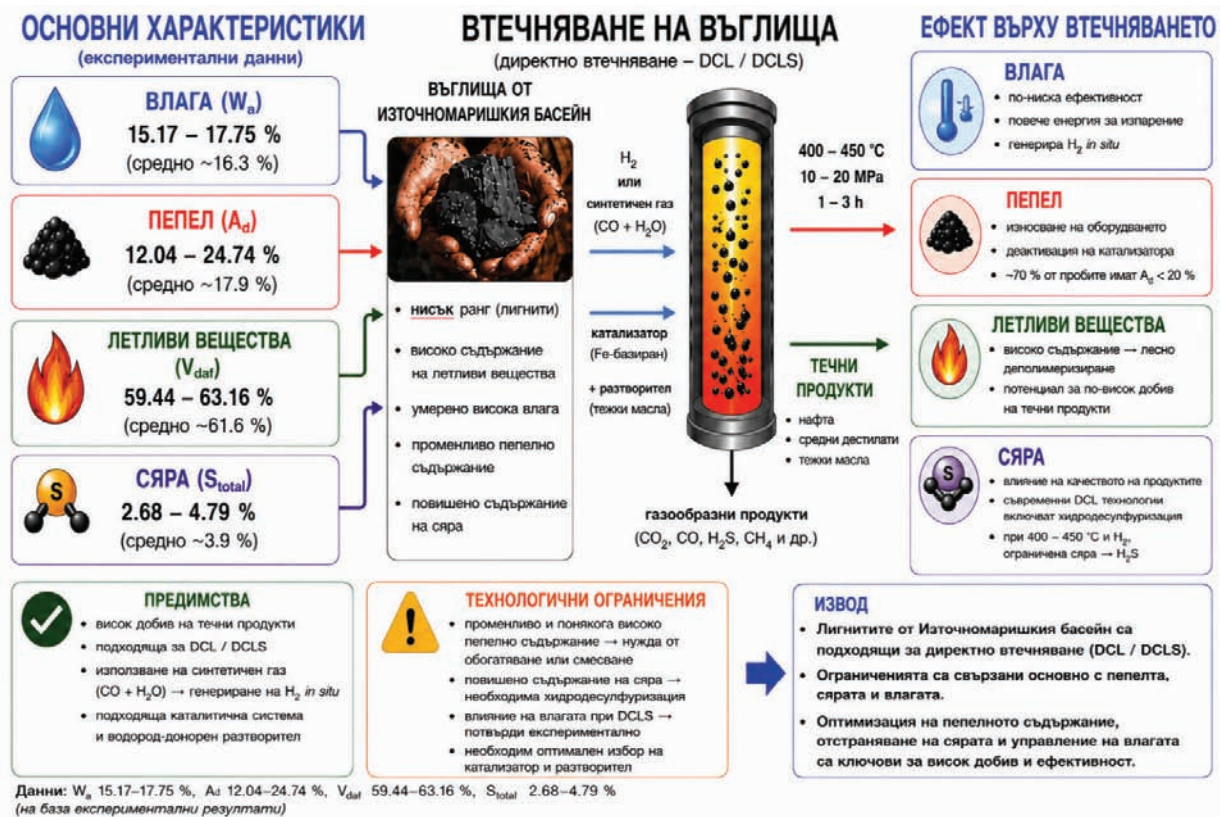


при която се генерира водород *in situ*, необходим за последващите реакции на хидрогенизация [4]. Следователно, установените стойности на влага в изследваните проби не могат да бъдат разглеждани като еднозначно ограничаващ фактор, но влиянието им следва да бъде потвърдено експериментално. Пепелното съдържание е важен технологичен параметър, тъй като повишеното присъствие на минерално вещество може да доведе до намалена ефективност на процеса, износване на оборудването и деактивация на катализаторите. Около 70% от анализиранияте проби съдържат под 20% пепел, което съответства на диапазони, докладвани за някои индустриални и експериментални DCL процеси [5]. Пробите с по-високо пепелно съдържание вероятно биха изисквали предварително обогатяване или смесване с по-нископепелни въглища. Освен количеството на пепелта, съществено значение за поведението на въглищата при втечняване има и минералният състав на неорганичното вещество, който не е разгледан в настоящото изследване и следва да бъде обект на бъдещи анализи. Високото съдържание на летливи вещества е благоприятна характеристика при директното втечняване, тъй като въглищата с нисък ранг съдържат по-голямо количество слабо свързани алифатни и кислородсъдържащи структурни фрагменти, които се разкъсват по-лесно при термична деполимеризация. Това обикновено води до по-висока реактивност и по-висока степен на конверсия в сравнение с високоранговите въглища [4, 5]. Ефективността на процеса зависи и от използвания разтворител и вида на катализаторите. Водород-донорните разтворители подпомагат стабилизирането на продуктите от термичното разграждане и ограничават вторичните реакции, които намаляват добива на течни продукти [5].

Повишеното съдържание на сяра (2,68–4,79%) представлява технологично предизвикателство, тъй като може да влоши качеството на течните продукти и налага последващи процеси на хидродесулфуризация. Въпреки това високото съдържание на сяра не представлява абсолютен ограничаващ фактор, тъй като съвременните технологии за втечняване включват ефективни процеси за отстраняване на серни съединения [4].

На фигура 2 са представени данните от изследването на основните характеристики на пробите и на базата на тях са посочени предимства и ограниченията на Източномаришките лигнити при евентуалното им втечняване.

Получените резултати показват, че високото съдържание на летливи вещества и ниският ранг на изследваните лигнити предполагат добра реактивност и потенциал за приложение в процеси на директно втечняване. Основните ограничения са свързани с променливото пепелно съдържание и необходимостта от последващо отстраняване на серни съединения. Влиянието на влагата при DCLS процесите следва да бъде оценено чрез допълнителни експериментални изследвания.



Фигура 2. Отражение на основните характеристики на източномаришките лигнити върху способността им да се втечняват.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследванията на основните характеристики на лигнитите от Източномаришкия басейн предполагат добър потенциал за газификация и директно втечняване. Получените резултати показват, че източномаришките лигнити са по-подходящи за процеси на газификация, въпреки ограниченията, свързани с високото съдържание на влага, променливото пепелно съдържание и необходимостта от последващо отстраняване на серни съединения. При директното втечняване същите характеристики предполагат добра реактивност, но влиянието на пепелта, сярата и специфичните технологични изисквания на процеса налагат провеждането на допълнителни експериментални изследвания. За прецизна оценка на приложимостта на тези въглища е необходимо изследване на допълнителни петрографски, минераложки и технологични параметри.

Благодарности. Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Критични и стратегически суровини за зелен преход и устойчиво развитие“, одобрена с Решение на МС № 508/18.07.2024 г. и финансирана от МОН.

Литература

- [1]. Shahabuddin, M., & Alam, M. T. (2022). A review: Gasification of Solid Fuels (Coal, Biomass and MSW): Overview, Challenges and Mitigation Strategies. *Energies*, 15(12), 4444. <https://doi.org/10.3390/en15124444>
- [2]. Keboletse, M., Ntuli, F., & Oladijo, O. P. (2021). Influence of coal properties on coal conversion processes—coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: A review. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8(5), 817–843. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00401-5>



- [3]. Molina, A., & Mondragón, F. (1998). Reactivity of coal gasification with steam and CO₂. *Fuel*, 77(15), 1831–1839. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00123-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00123-9)
- [4]. Li, H., Peng, W., Zhu, D., Gu, J., Wu, Y., Huang, S., Gao, J., Zhao, B., Guan, H., Li, C., Xu, J., Bai, J., Lv, Y., Yang, J., Chen, D., & Wu, S. (2023). A review of low-rank coals liquefaction processes containing water and syngas (or CO). *Fuel*, 332, 126260. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126260>
- [5]. Ali, A., & Zhao, C. (2020). Direct liquefaction techniques on lignite coal: A review. *Chinese Journal of Catalysis*, 41(3), 375-389. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63492-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63492-3)
- [6]. International Organization for Standardization (ISO). (1975). ISO 1015:1975. Brown coals and lignites — Determination of moisture content — Direct volumetric method.
- [7]. International Organization for Standardization (ISO). (2010). ISO 1171:2010. Solid mineral fuels — Determination of ash.
- [8]. International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 20360:2020. Brown coals and lignites — Determination of the volatile matter in the analysis sample: one furnace method
- [9]. International Organization for Standardization (ISO). (2013). ISO 334:2013. *Solid mineral fuels — Determination of total sulfur — Eschka method.*
- [10]. Lampropoulos, A., Binas, V., Konsolakis, M., & Marnellos, G. E. (2021). Steam gasification of Greek lignite and its chars by co-feeding CO₂ toward syngas production with an adjustable H₂/CO ratio. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(56), 28486–28500. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.131>



ОБЗОР НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА РЕГЛАМЕНТ (ЕС) 2024/1252 В КОНТЕКСТА НА ОСИГУРЯВАНЕТО НА УСТОЙЧИВ ДОСТЪП ДО СУРОВИНИ ОТ КРИТИЧНО ЗНАЧЕНИЕ В ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ

Велислава Паничкова, velislava.panichkova@mgu.bg
Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"

РЕЗЮМЕ

Суровините от критично значение имат стратегическа важност за Европейския съюз, като същевременно поставят предизвикателства, свързани със сигурността на доставките. Настоящата статия има за цел да предложи аналитичен и систематизиран обзор на съдържанието на Регламент (ЕС) 2024/1252, без да претендира за практическо приложение или оценка на неговата ефективност. Фокусът е поставен върху изясняване на структурата, целите и основните правни механизми, заложен в акта. По този начин се цели допринасяне към по-доброто теоретично разбиране на регулаторната рамка в областта на суровините от критично значение.

OVERVIEW OF THE CONTENT OF REGULATION (EU) 2024/1252 IN THE CONTEXT OF ENSURING SUSTAINABLE ACCESS TO CRITICAL RAW MATERIALS IN THE EUROPEAN UNION

Velislava Panichkova, velislava.panichkova@mgu.bg
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"

ABSTRACT

Critical raw materials are of strategic importance to the European Union while also posing challenges related to supply security. This article aims to provide an analytical and systematic overview of the content of Regulation (EU) 2024/1252, without claiming any practical application or assessment of its effectiveness. The focus is placed on clarifying the structure, objectives, and main legal mechanisms established by the act. In this way, the study seeks to contribute to a better theoretical understanding of the regulatory framework in the field of critical raw materials.

В условията на засилваща се глобална конкуренция за достъп до стратегически ресурси и ускорен преход към устойчива икономика, въпросът за осигуряване на надеждни доставки на суровини от критично значение придобива особена актуалност за Европейския съюз. Настоящото изследване има за предмет съдържанието и основните механизми, въведени с Регламент (ЕС) 2024/1252, като акцентът е поставен върху нормативните решения за гарантиране на сигурни и устойчиви вериги на доставка. Целта на статията е да представи систематизиран преглед на регламента и да изведе неговото значение в контекста на стратегическата автономия и икономическата сигурност на Съюза. Изследването не прави практически анализ, а има за задача да очертае основните правни инструменти и политики, заложен в акта. Методологически, изложението се основава на нормативен и сравнително-аналитичен подход, чрез който се проследяват структурата, целите и ключовите разпоредби на регламента. По този начин се цели постигане на по-добро разбиране на правната рамка и нейната роля в подкрепа на устойчивото развитие и конкурентоспособността на Европейския съюз.

Суровините от критично значение са природни ресурси, които имат голямо икономическо значение за важни индустрии и технологични сектори, но същевременно съществува сериозен риск от прекъсване на доставките им. Този риск произтича от ограничените им източници, геополитически фактори или трудности, свързани с техния добив и преработка. В рамките на Европейския съюз към тази категория се отнасят материали, които са важни за стратегически области като възобновяемата енергия, дигиталните технологии и отбранителната индустрия, като за тях често липсват леснодостъпни или устойчиви



алтернативи.

Чрез политики като Регламент (ЕС) 2024/1252 на Европейския парламент и на Съвета се дава възможност да бъде гарантиран устойчив и надежден достъп до суровините от критично значение. Това е нормативен документ от 11 април 2024 г., с който се цели създаване на рамка за гарантиране на сигурни и устойчиви доставки на тези суровини. Той изменя действащите до този момент регламенти на Европейския съюз с номера: 168/2013, 2018/858, 2018/1724 и 2019/1020.

Глава 1 от настоящия регламент носи заглавието *Общи разпоредби*. Тя включва два члена, съответно **Член 1** *Предмет и цели* и **Член 2** *Определения*.

Като цел на регламента, упомената в **Член 1**, се определя подобряване функционирането на вътрешния пазар, като се създаде рамка за гарантиране на достъпа на Съюза до стабилни и устойчиви доставки на суровини от критично значение. Тази цел може да бъде постигната посредством мерки, целящи: намаляване на риска от прекъсване на доставките на суровини от критично значение и подобряване на способността на Съюза да наблюдава и смекчава свързания с доставките риск и гарантиране на свободното движение на суровините от критично значение със същевременно гарантиране на високо равнище на опазване на околната среда.

За нуждите на регламента се използват редица определения със значение на дефиниции. Според **Член 2** те са 64 на брой. Част от тях представляват определения на една дума/термин, като например "суровина", "добив", "запаси", "проучване" и др., а друга - поредица от думи под формата на кратки словосъчетания или по-дълги изрази, като например "залежи на полезни изкопаеми", "проект за суровини от критично значение" и др.

Глава 2 от настоящия регламент е озаглавена *Стратегически суровини и суровини от критично значение*. Тя, също като предходната, включва два члена, съответно **Член 3** *Списък на стратегическите суровини* и **Член 4** *Списък на суровините от критично значение*. **Член 3** дава определение на понятието "стратегически суровини", а също така посочва, че в **Раздел 1, Приложение I** на настоящия регламент се изброяват суровините, определени като стратегически. Списъкът на стратегическите суровини се преглежда периодично от Комисията и при необходимост се актуализира до 24 май 2027 г. и на всеки три години след това. **Член 4** дава определение на понятието "суровини от критично значение" и указва, че те са представени в **Раздел 1, Приложение II** на този регламент. Този списък, аналогично на предходния, се преглежда и при необходимост актуализира от Комисията също до 24 май 2027 г. и на всеки три години след това.

Глава 3 е със заглавие *Укрепване на веригата на Съюза за създаване на стойност в сектора на суровините*. Тя включва пет раздела. **Раздел 1** носи заглавието *Сравнителни показатели*. В него се съдържа един член. **Член 5** разглежда *Сравнителни показатели*, а именно: капацитет за добив на Съюза; капацитет за преработка на Съюза; капацитет за рециклиране на Съюза. Посочва се, че Комисията и държавите членки укрепват етапите от веригата за създаване на стойност в сектора на стратегическите суровини чрез мерки, посочени в настоящата глава 3, като имат за цел да се гарантира, че до 2030 г. капацитетът на Съюза във връзка с всяка стратегическа суровина ще се е увеличил в значителна степен по отделните показатели, както и да се диверсифицира вносът на стратегически суровини в Съюза с цел гаранция, че до 2030 г. годишното потребление на Съюза може да разчита на внос от няколко трети държави или отвъдморски страни или територии. **Раздел 2** е озаглавен *Стратегически проекти*. В него са включени 3 члена. **Член 6** разглежда *Критерии за признаване на стратегически проекти*, а именно: значително допринасяне за сигурността на доставките на стратегически суровини за Съюза; осъществяване на проекта в рамките на приемлив срок; устойчиво изпълнение на проекта по отношение на наблюдение, предотвратяване и минимизиране на въздействието върху околната среда и предотвратяване и свеждане до минимум на неблагоприятното въздействие чрез използването на социално отговорни практики; създаването и изпълнението на проекта ще има трансгранични ползи извън съответната държава членка; проектът ще бъде взаимно изгоден за Съюза и за съответна трета държава по отношение на проекти в трети държави. В **Приложение III** на регламента са посочени елементи и данни въз основа на които се оценява



изпълнението на споменатите критерии. **Член 7** е озаглавен *Заявление и признаване*. Заявленията за признаване на проект за суровини от критично значение като стратегически проект се подават от организатора на проекта до Комисията, като съдържат упоменатата в параграф 1 информация. Параграфът регламентира по подточки какво е необходимо да включва заявлението. Заявленията се попълват по единен образец въз основа на приет акт за изпълнение. Оценката се извършва от Комисията чрез редовна покана с редовни крайни срокове. Комисията прави оценка на пълнотата и изчерпателността на предоставената информация и по преценка може да изиска допълването ѝ. Относно обсъждането и приемането на заявленията, както и вземането на решение за признаването на даден проект за стратегически, Комисията работи съвместно с Европейския съвет за суровините от критично значение (ЕССКЗ). **Член 8** носи наименованието *Задължения за докладване и предоставяне на информация за стратегически проекти*. От него става ясно, че организаторът на проекта, признат за стратегически, се задължава на всеки две години след датата на признаване, да предоставя информация относно напредъка по изпълнението и финансирането на проекта. Комисията, при необходимост, може да поиска от организаторите на проекта, допълнителна информация относно спазването на заложените критерии. При настъпващи промени в процеса на изпълнение на проекта, организаторът се задължава да уведоми Комисията. Той е задължен и да създава и актуализира специален уебсайт с информация за проекта, който е на разположение на обществеността със свободен достъп. **Раздел 3** е с наименованието *Процес на издаване на разрешителни*. Той съдържа 6 члена. **Член 9** от него е озаглавен *Единно звено за контакт*. Според него държавите членки създават или определят един или повече органи като единни звена за контакт. Те отговарят за улесняване и координиране на процесите, свързани с придвижване на всякакъв тип документация и информация, свързана с проектите. **Член 10** от раздела носи заглавието *Приоритетен статут на стратегическите проекти*. Предвид същността на стратегическите проекти, а именно - стратегическите проекти допринасят за сигурността на доставките на стратегически суровини в Съюза и също така са проекти с по-висш обществен интерес, на тях се предоставя специален статут на проекти с възможно най-високо национално значение, като всички процедури, свързани с тях, се разглеждат като спешни. **Член 11** разглежда въпроса, свързан с *Времетраене на процеса на издаване на разрешителни*. Според него процесът на издаване на разрешителни за стратегически проекти в Съюза не е по-дълъг от 27 месеца - за стратегически проекти, включващи добив, и 15 месеца - за стратегически проекти, включващи само преработка или рециклиране. **Член 12** е с наименованието *Екологични оценки и разрешения*. Той касае случаите, когато за даден стратегически проект се изисква оценка на въздействието върху околната среда. Организаторът на проекта се съобразява със становище от съответното единно звено за контакт относно обхвата и нивото на изчерпателност на информацията, която ще бъде включена в доклада за оценка на въздействието върху околната среда. **Член 13** е озаглавен *Планиране*. Според него органите, които отговарят за изготвянето на планове, разглеждат възможността за включването в тези планове, когато е целесъобразно, на разпоредби за разработването на проекти за суровини от критично значение. **Член 14** регламентира *Приложимост на конвенциите на Икономическата комисия за Европа на ООН* и гарантира осигуряване на публичен достъп по лесноразбираем начин до всички решения, приети съгласно настоящия раздел 3. **Раздел 4** с наименованието *Улесняващи условия* съдържа четири члена. **Член 15** разглежда *Ускорено прилагане на стратегически проекти*. Комисията извършва дейности, в сътрудничество с държавите членки, за ускоряване и привличане на частни инвестиции в стратегически проекти. Държавата членка, чиято територия е засегната от стратегически проект, предприема мерки, за да улесни неговото навременно и ефективно изпълнение. **Член 16** регламентира *Координиране на финансирането*. По искане на организатор на стратегически проект постоянната подгрупа провежда консултации относно това как може да бъде завършено финансирането на проекта, като се има предвид вече осигуреното финансиране и при необходимост се търсят допълнителни източници на финансиране. До 24 май 2026 г. Комисията предоставя на Европейския съвет за суровините от критично значение доклад, описващ пречките пред достъпа до финансиране за стратегически проекти и дава препоръки за улесняване на този достъп. **Член 17** разглежда въпроса с *Улесняване на сключването на договори за изкупуване*.



Комисията установява система за улесняване на сключването на тези договори, която позволява на потенциалните изкупвачи да подават оферти, а на организаторите - да подават предложения. Въз основа на офертите и предложенията, Комисията е тази, която осъществява връзката на организаторите на стратегически проекти с най-подходящите за техния проект потенциални изкупвачи. В **Член 18** се регламентира *Онлайн достъпът до административна информация*. Държавите членки, а след това и Комисията, предоставят онлайн и по централизиран и леснодостъпен начин информацията относно всички административни процеси, свързани с проектите за суровини от критично значение, признаването на проекти като стратегически и относно ползите от това признаване. **Раздел 5** с наименованието *Проучване* съдържа един член. **Член 19** разглежда въпроса, свързан с *Национални програми за проучване*. В срок до 24 май 2025 г. всяка държава членка е задължена да изготви своя национална програма за общо проучване, която е насочена към суровини от критично значение и минерали, съдържащи суровини от критично значение. Тези национални програми се преглеждат най-малко на всеки пет години и при необходимост се актуализират. Тези програми се предоставят на Комисията, както и информация относно напредъка при прилагането на мерките, включени в националните програми. Основна информация за тези програми се оповестява публично на уебсайт със свободен достъп от съответните държави членки.

Глава 4 разглежда въпросите, свързани с *Наблюдение и смекчаване на риска*. Съдържанието ѝ включва шест члена. **Член 20** регламентира въпросите, свързани с *Наблюдение и стрес тестове*. Комисията извършва наблюдение върху свързаните с доставките рискове за суровините от критично значение. Наблюдението обхваща посочени в този член параметри. Комисията, в сътрудничество с националните органи, участващи в постоянната подгрупа, гарантира провеждането на стрес тест за всяка верига на доставки на стратегически суровини най-малко на всеки три години или ако в резултат на наблюдението бъдат открити свързани с доставките рискове. Същността на стрес тестовете е описана в Член 20, а получените резултати биват публично оповестени на уебсайт със свободен достъп. **Член 21** касае *Задължения за предоставяне на информация за наблюдението*. Държавите членки имат ангажимента да предоставят на Комисията информация за нови или съществуващи проекти за суровини от критично значение на тяхна територия, включително и класификация на новите проекти в съответствие с Рамковата класификация на ООН за ресурсите. **Член 22** регламентира *Докладване на стратегически запаси*. Държавите членки подават до Комисията информация относно състоянието на стратегическите си запаси от стратегически суровини. Информацията може да бъде допълнена с данни за стратегическите запаси от суровини от критично значение и други суровини. **Член 23** касае *Координиране на стратегическите запаси*. Според него в срок до 24 май 2026 г. и на всеки две години след това Комисията споделя с Европейския съвет за суровините от критично значение проект за сравнителен показател за указване на безопасен праг на стратегическите запаси на Съюза за всяка стратегическа суровина, сравнение на общото ниво на стратегическите запаси на Съюза за всяка стратегическа суровина спрямо проекта за сравнителен показател и информация за потенциалната трансгранична достъпност на стратегическите запаси с оглед на правилата или процедурите за тяхното пускане в обръщение, разпределяне и разпространение. Комисията, като взема предвид мненията на Европейския съвет за суровините от критично значение, приема сравнителен показател за указване на безопасен праг на стратегическите запаси на Съюза от стратегически суровини. **Член 24** разглежда *Готовност на дружествата при рискове*. В срок до 24 май 2025 г. и в срок от 12 месеца от всяко актуализиране на списъка на стратегическите суровини, държавите членки набелязват големите дружества, действащи на тяхна територия. Те извършват оценка на риска на своята верига на доставки на стратегически суровини най-малко на всеки три години. Ако в резултат на оценката на риска, бъде открита значителна уязвимост по отношение на прекъсвания на доставките, големите дружества полагат усилия за смекчаване на тази уязвимост. **Член 25** касае *Съвместно закупуване*. Комисията създава и управлява система за обединяване на търсенето на заинтересованите предприятия, използващи стратегически суровини, установени в Съюза, и търси предложения от доставчици, които да отговорят на това обединено търсене. Предприятията от Съюза, участващи в системата, могат по прозрачен начин съвместно да договорят закупуването, включително цените или други условия на споразумението за



закупуване, или да използват съвместно закупуване, за да постигнат по-добри условия с доставчиците си или да предотвратят недостиг. Участващите предприятия от Съюза спазват правото на Съюза, включително конкурентното му право.

Глава 5 носи наименованието *Устойчивост*. Тя включва три раздела. **Раздел 1** касае *Кръговост*. В него са залегнали четири члена. **Член 26** разглежда *Национални мерки относно кръговостта*. До две години след датата на влизане в сила на акта за изпълнение, всяка държава членка приема и изпълнява национални програми, които съдържат или в които тя включва мерки с различни предназначения, които са описани в този член. Програмите могат да бъдат интегрирани в нови или съществуващи планове за управление на отпадъците и програми за предотвратяване образуването на отпадъци. Държавите членки идентифицират поотделно и докладват количествата компоненти, съдържащи съответните количества суровини от критично значение, отстранени от отпадъци от електрическо и електронно оборудване, както и количествата суровини от критично значение, оползотворени от такова оборудване. В докладите си държавите членки предоставят информацията относно приемането на националните програми и относно напредъка при ефективното прилагане на предприетите мерки. До 24 май 2025 г. Комисията приема актове за изпълнение, с които утвърждава списък на продуктите, компонентите и потоците отпадъци, за които се счита, че имат най-малкото значим потенциал за оползотворяване на суровини от критично значение. **Член 27** разглежда *Оползотворяване на суровини от критично значение от миннодобивни отпадъци*. Операторите, задължени да изготвят планове за управление на отпадъците в съответствие с член 5 от Директива 2006/21/ЕО, предоставят на компетентния орган, определен в член 3, точка 27 от посочената директива, проучване за предварителна икономическа оценка на потенциала за оползотворяване на суровини от критично значение от миннодобивните отпадъци, съхранявани в съоръжението; както и от миннодобивните отпадъци, които се генерират, или, когато се счита за по-ефективно, от извлеченото количество, преди то да се превърне в отпадък. До 24 ноември 2026 г. операторите на съоръжения за миннодобивни отпадъци представят проучването на компетентния орган съгласно определението в член 3, точка 27 от Директива 2006/21/ЕО. Операторите на нови съоръжения за миннодобивни отпадъци представят това проучване на компетентния орган съгласно определението в член 3, точка 27 от Директива 2006/21/ЕО, при представянето на своите планове за управление на отпадъците в съответствие с член 7 от посочената директива. До 24 ноември 2027 г. държавите членки приемат и прилагат мерки за насърчаване на оползотворяването на суровини от критично значение от миннодобивни отпадъци, по-специално от затворени съоръжения за миннодобивни отпадъци, идентифицирани в базата данни, като съдържащи потенциално икономически оползотворими суровини от критично значение. Базата данни се създава до 24 ноември 2026 г., като цялата информация се въвежда в базата данни до 24 май 2027 г. Тя се предоставя в публично достъпна и цифрова форма и се актуализира най-малко на всеки три години, за да се включи допълнителна налична информация и нови затворени съоръжения или нови идентифицирани съоръжения. **Член 28** указва *Възможност за рециклиране на постоянни магнити*. Считано от две години от датата на влизане в сила на акта за изпълнение всяко физическо или юридическо лице, което пуска на пазара устройства, съдържащи магнити, гарантира, че на тези продукти има видим, ясно четим и незаличим етикет, посочващ дали в тези продукти се съдържа(т) един или повече постоянни магнити и ако в продукта се съдържа(т) един или повече постоянни магнити, дали тези постоянни магнити спадат към някой от следните видове: неодим—желязо—борни; самарий—кобалтови; алуминий—никел—кобалтови; феритни. **Член 29** касае *Рециклирано съдържание на постоянни магнити*. От 24 май 2027 г. или две години след влизането в сила на делегирания акт, посочен в параграф 2, като се прилага по-късната от двете дати, всяко физическо или юридическо лице, което пуска на пазара продукти, които съдържат един или повече постоянни магнити, посочени в предходния член и за които общото тегло на всички такива постоянни магнити надвишава 0,2 kg, оповестява публично на уебсайт със свободен достъп дела на неодим, диспрозий, празеодим, тербий, бор, самарий, никел и кобалт, оползотворени от отпадъци след потребление, който се съдържа в постоянните магнити, вградени в продукта. До 24 май 2026 г. Комисията приема делегиран акт за допълване на настоящия регламент чрез установяване на правила за изчисляване и проверка на дела на неодим, диспрозий,



празеодим, тербий, бор, самарий, никел и кобалт, оползотворени от отпадъци след потребление, който се съдържа в постоянните магнити, вградени в продуктите, посочени в параграф 1 от настоящия член. **Раздел 2** е озаглавен *Сертифициране и отпечатък върху околната среда*. Той включва два члена. **Член 30** разглежда *Признати схеми*. Правителства, промишлени сдружения и обединения от заинтересовани организации, които са разработили и упражняват надзор над схеми за сертифициране, свързани с устойчивостта на суровини от критично значение, могат да подадат заявление до Комисията за признаване на техните схеми. Заявленията трябва да съдържат всички съответни доказателства, свързани с изпълнението на критериите, посочени в Приложение IV (Критерии за схемите за сертифициране) от настоящия регламент. **Член 31** регламентира *Декларация за отпечатък върху околната среда*. До 24 ноември 2026 г. Комисията представя на Европейския парламент и на Съвета доклад, в който се определя кои суровини от критично значение имат приоритет при преценката дали задължението за деклариране на отпечатъка върху околната среда на суровините от критично значение е необходимо и пропорционално. **Раздел 3** касае *Свободно движение, съответствие и надзор на пазара*. Той включва три члена. **Член 32** регламентира *Свободно движение*. Според него държавите членки не забраняват, не ограничават и не възпрепятстват предоставянето на пазара или въвеждането в експлоатация на продукти, съдържащи постоянни магнити или суровини от критично значение, които са в съответствие с настоящия регламент, поради причини, свързани с информация за рециклирането или рециклираното съдържание на постоянните магнити, или поради причини, свързани с информацията за отпечатъка върху околната среда на суровини от критично значение, обхванати от настоящия регламент. **Член 33** регламентира *Съответствие и надзор на пазара*. Преди да пуснат на пазара продукт, отговорните физически или юридически лица гарантират, че е проведена приложимата процедура за оценяване на съответствието и е изготвена необходимата техническа документация. **Член 34** регламентира *Прилагане и привеждане в съответствие със законодателството на Съюза за хармонизация*. На Комисията се предоставя правомощието да приема делегирани актове в съответствие с член 38 за допълването на членове 28, 29, 31 и 33.

Глава 6 е с наименованието *Управление*. Тя съдържа три члена. **Член 35** указва създаването на Европейски съвет за суровините от критично значение. Създава се такъв съвет и той консултира Комисията и изпълнява задачите, посочени в настоящия регламент. **Член 36** говори за състава и функциите на *Европейски съвет за суровините от критично значение*. Той се състои от представители на всички държави членки и Комисията. **Член 37** разглежда *Международно сътрудничество и стратегически партньорства*.

Глава 7 е озаглавена *Делегирани правомощия и процедура на комитет*. Тя съдържа два члена. **Член 38** касае *Упражняване на делегирането*. Правомощието да приема делегирани актове се предоставя на Комисията при спазване на предвидените в настоящия член условия. **Член 39** носи заглавието *Процедура на комитет*. Съгласно него Комисията се подпомага от комитет. Този комитет е комитет по смисъла на Регламент (ЕС) № 182/2011.

Глава 8 указва *Изменения*. В четирите члена там се указват съответно Изменение на Регламент (ЕС) № 168/2013, Изменение на Регламент (ЕС) 2018/858, Изменения на Регламент (ЕС) 2018/1724 и Изменения на Регламент (ЕС) 2019/1020.

Глава 9 включва *Заклучителни разпоредби*, представени в шест члена. **Член 44** е за *Проследяване на напредъка*. До 24 ноември 2026 г. Комисията представя доклад, включващ индикативни прогнози за годишното потребление на всяка суровина от критично значение през 2030 г., 2040 г. и 2050 г., включително ниска, висока и референтна прогноза, както и индикативни сравнителни показатели за добива и преработката на всяка стратегическа суровина с оглед на постигане на съответствие със сравнителните показатели, определени в член 5, параграф 1, буква а), за 2030 г. До 24 май 2027 г. и най-малко на всеки три години след това Комисията, като взема предвид становищата на ЕССКЗ, проследява напредъка по постигането на сравнителните показатели, посочени в член 5, параграф 1, както и ограничаването на очакваното увеличение на потреблението на суровини от критично значение в



Съюза, посочено в член 5, параграф 2, и публикува доклад, в който подробно описва напредъка на Съюза по постигането на съответствие с тези сравнителни показатели и това ограничаване. **Член 45** касае *Докладване от страна на държавите членки*. До 24 май 2026 г. и всяка година след това държавите членки изпращат на Комисията доклад, съдържащ информацията, посочена в член 19, параграф 5, член 21, параграфи 1 и 2, член 22, параграф 1, член 23, параграф 5 и член 26, параграф 6. **Член 46** касае *Работа с поверителна информация*. Според него информацията, получена в хода на прилагането на настоящия регламент, се използва само за целите на настоящия регламент и е защитена от съответното право на Съюза и национално право. Според **Член 47 Санкции** до 24 ноември 2026 г. държавите членки установяват система от санкции, приложими при нарушение на настоящия регламент, и вземат всички мерки, необходими за осигуряване на прилагането им. Предвидените санкции трябва да бъдат ефективни, пропорционални и възпиращи. Държавите членки нотифицират незабавно на Комисията тези разпоредби и мерки и я нотифицират незабавно за всяко последващо изменение, което ги засяга. Съгласно **Член 48 Оценка**, до 24 май 2028 г. Комисията извършва оценка на настоящия регламент с оглед на целите, преследвани с него, и представя доклад за това на Европейския парламент, Съвета и Европейския икономически и социален комитет. Според **Член 49 Влизане в сила**, настоящият регламент влиза в сила на двадесетия ден след публикуването му в Официален вестник на Европейския съюз. Чрез дерогация от параграф 1 от настоящия член, членове 40 и 41 се прилагат от 24 май 2028 г. Настоящият регламент е задължителен в своята цялост и се прилага пряко във всички държави членки. Съставен е в Брюксел на 11 април 2024 година.

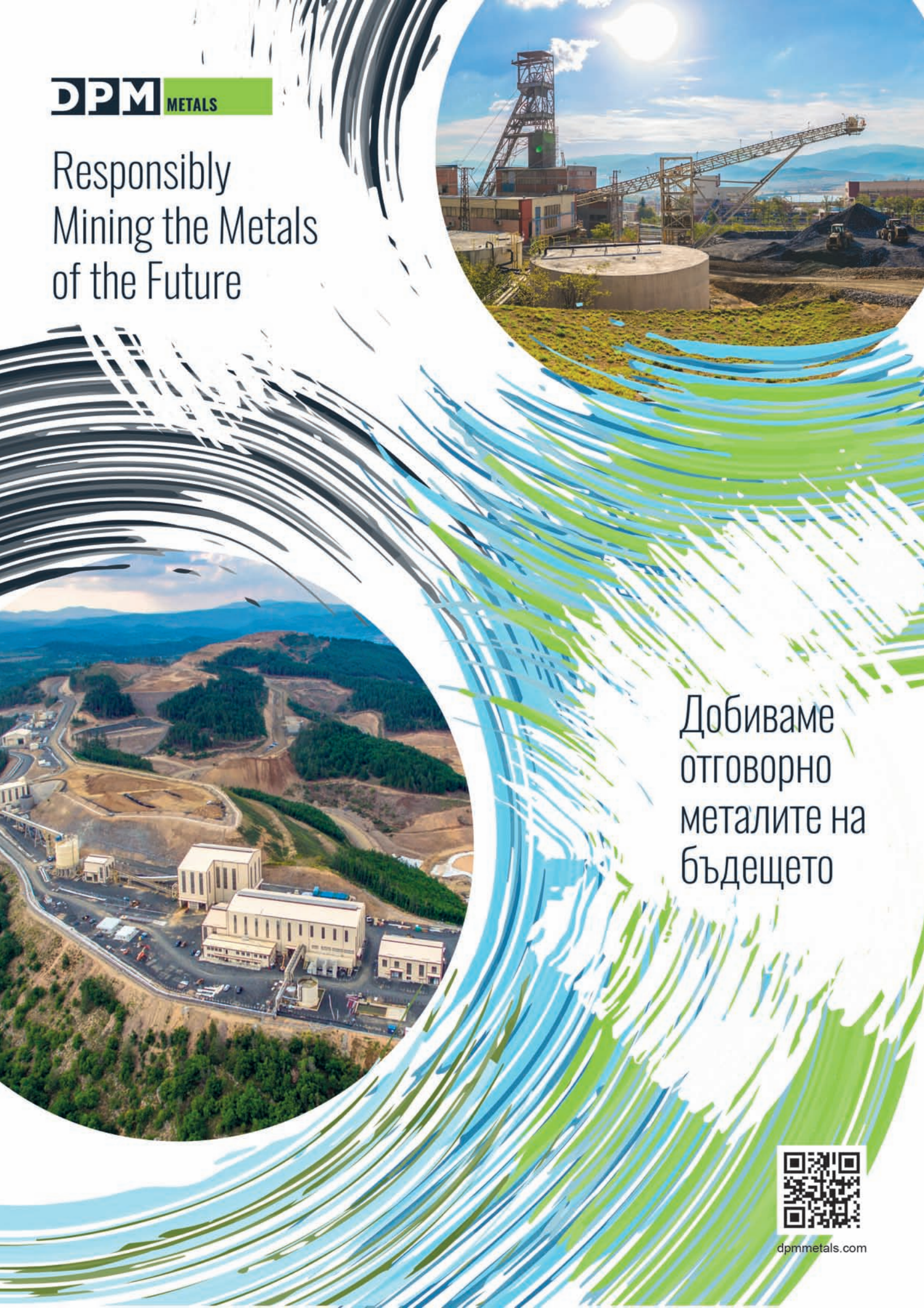
Следват **Приложения I - V**. **Приложение I** се отнася за *Стратегически суровини*. **Раздел 1** от него посочва *Списък на стратегическите суровини*, а **Раздел 2** - *Методика за избор на стратегически суровини*. **Приложение II** е за *Суровини от критично значение*. **Раздел 1** представя *Списък на суровините от критично значение*. **Раздел 2** показва *Изчисляване на икономическото значение и свързания с доставките риск*. **Приложение III** представя *Оценка на критериите за признаване на стратегически проекти*. **Приложение IV** се отнася до *Критерии за схемите за сертифициране*. **Приложение V** касае *Отпечатък върху околната среда*.

В заключение може да се приеме, че Регламент (ЕС) 2024/1252 представлява съществен елемент от усилията на Европейския съюз за укрепване на неговата стратегическа автономия и гарантиране на устойчив достъп до суровини от критично значение. Направеният обзор позволява да се открият основните механизми и правни инструменти, чрез които се цели повишаване на сигурността на доставките, диверсификация на източниците и насърчаване на кръговата икономика. Макар настоящото изследване да има предимно описателен характер, то подчертава значението на регламента като част от по-широка интегрирана политика в областта на ресурсната обезпеченост. Анализът показва, че ефективното прилагане на предвидените мерки ще изисква координирани действия както на равнище Европейски съюз, така и от страна на държавите членки. В този смисъл регламентът следва да се разглежда не само като нормативен акт, но и като стратегически инструмент за дългосрочно устойчиво развитие. Перспективите за бъдещи изследвания са свързани с проследяване на практическото му прилагане и оценка на въздействието му върху икономическата и индустриалната политика на Съюза.

Използвана литература:

РЕГЛАМЕНТ (ЕС) 2024/1252 НА ЕВРОПЕЙСКИЯ ПАРЛАМЕНТ И НА СЪВЕТА от 11 април 2024 година за създаване на рамка за гарантиране на сигурни и устойчиви доставки на суровини от критично значение и за изменение на регламенти (ЕС) № 168/2013, (ЕС) 2018/858, (ЕС) 2018/1724 и (ЕС) 2019/1020

Responsibly Mining the Metals of the Future



Добиваме
отговорно
металите на
бъдещето

