

????????

?????? ??????????? ????????? ????? ?? ??????? ?????????? ????????????????, ? ????? ????? ?? ??????????? ??????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ? ????????? CO₂ - ? ???? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????? ????? 6-7% ??????????? ?????????? CO₂ [1]. ? ? ??????? ?????????????????? ?????????????????? ??????????? (??), ??????? ??????? CO₂ ??????????? ?????????? 1.4 ????? CO₂ ? ? ????? ?????????????????? ????? [2], ? ? ???? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? McKinsey ? ?????????? ??????????? ?????????????????? ?????? – 1.85 [3, 4].

????? ?????????? ?????????????????? ??????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????? ?????? [5]. ? ?????????? ?????? ??????? ?????? ?????????????????? ?????????????????????? ?????? ?? ???? ???? ?????????????? ?????? 600 ?????????? ???? [6]. ??? ??????????? ? ?????????? ??????????? ?????????? ?? ?????????? ??????? ? ?????, ?? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?? ??????? ? ??????????? ?????????? ??????????? ?????????????????? ?????? ?? ?????????? ?????????? ?????? ?????????? (CaO), ??????? ?????????? (SiO₂), ?????? ??????? (Fe₂O₃), ?????? ?????????? (Al₂O₃) ? ?????? ??????? (MgO), ? ?????? ?????????????????? ??????????? MnO, P₂O₅ ? TiO₂ [5].

? ? ?????? ??????, ?????????? ??????? ?????????????????? ?????????????????????? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? [7-9], ?????????, ??????? ??????, ? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? [10-12] ? ?????????? ?????????? [13-15]. ?????????????????? ? ?????????? ??????????? ?????????????????? ?????????????? ??????? ?? ?????????????????? ?????? ? 2011 ??? ? ?????? ?????????? ?????????????? ?????? ?????????????? ? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? [16]. ? ?????????, ?????????, ?? ??????? ??????? ?????????????????? ??????????? ? ? ?????????????????? ?????? ?????????????? ?????? ??????? [17]. ? ??????? ?????????????????? ?? ?????????????????? ??????? ?? ??????? ?????????????????? ?????? ?????????????? ?????? ?????????????? ?? 21% [18]. ?????????????? ??????? ?????? ?????? ?????? ? ?????????????????? ??????? ?????????????????? ? ??????? ?????, ? ?????? ? ?????????????? ?????????????? ??????. ?????? ?????????, ?? ?????????? ?????, ?????????????????????? ?????? ?????????????????? ? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????????? ?????? [19-21].

?? ???? , ?????????????? ?????? ???? ? ???? ???? , ?????? ?????? ??????????? ?????????????????? ??????????, ? ??????????? ?????????????? ? ?????????????? ?????????????? ??????? ???? ?????????????? ?????? [22]. ?????? ??????? ?????????? ?????????? ??????????, ?? ?????????? ??????, ?????????? ?????? ?? ?????????? ??????????, ?????????????? ? ??????? ?????????????????? ?????????? ?? ??????. ??????????????????, ??????? ?????????? ?????????? ? ? ?????????????? ?? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????????????? ??????, ?? ?????? ?????????????? ?????????????????? ?????? ?????? [23]. ?????????????????? ?????? ?????? ?????? ?????????? ?????????????? Al³⁺ ??? ?????????? ? ?????????? ?????????????? ??????, ?? ??????? ?? ?????? ?????????? ? ?????? ??????????????, ??????? ?????????????? ?????? ? ?????????????????? ?????????????????????? [24]. ? ?????? ? ??????????????????, ?????????????? ?????????? ?????????????????? ?????? ??????? ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????, ? ?????? ?????????? ?????????????? ?????????????????????? ?????? ?????????? ?? ?????????????????? ??????? ?? ? ??????????????????, ??? ? ? ?????????????????? ?????? ??????? [25].

?????????? ??????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????????? ??????????? ?????? ?? ?????????????????? ?????????????????????? ??????? ?????? ? ?????????????? ?????????????????? ?????????? ?????? ?? ??????????????, ? ?????? ??????? ?????????????????? ??????????????????????, ?????????????????????? ? ?????????????????? ?????????? ??????? ?????? ?????? ?????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ? ?????????? ?????????????????? ??? ?????? ?????????????? ?????????????????? ?????????-????????????????? ?????????? ?????? ?? ?????????????-????????????????, ? ?????? ??????????? ?????????????????????, ?????????????? ?????????????????????? ?????????????????? ?????????????.

???????????? ? ???????

? ??????? ?????????????????? ?????????????????????? ?????????? ???? ?? «????????????» (??????????, ???????). ??????? ?????????????????? ??????????? ?????? ?? ?????????????? ?????????? ?????????????????????????????????????? ?????????? ?? ?????????????????? ARL 9900 (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, ?????????). ?????????????? ?????? ?????? ??????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?? ?????????????? JCM-7000 NeoScope (JEOL, ???????).

? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ??????? ?????????? (*Betula pubescens* Ehrh.) ????????? 15-1. ?????????????????? ??????? ?????????? ??????????-????????????????? ?????????????? (????) ?????? ?????????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? (????????). ??? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ? ?????????? in vitro (??? 1).

? ?????????? ??????????? ?? ?????????????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????? ?????????? ???? ? ?? 18763-2019. ?? ?????????????? ?????? ???? ?????????? ?? ?????????? ?????????????????? ?????????????, ?????????????????? ?????? ??????? ?????????? ??????????????????: ?? ?????????? ?????????? ~ 4.2 – ??????????????????; 4.8 – ??????????????????; 5.2 – ??????????????????. ? ?????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ? ?? ?????????? ?????????? ~ 6. ?? ?? ???? ?????????????? ??????? ?????????? ?????????????????????? ?????? ?? ?????????????? ?????????????????? ?????????? (?? ?????????? ?????????? ~ 6).

????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? 1 ???? ? ?????????????? ?? ??????? ?????????? ?? ??????????????. ? ??????? ??????????? ?????????????????????? ?? 15 ??????????. ?????????????????? ?????????????? ? ?????????? ?????????.

????????? ??????????????: ??????? ?? ??????? ?????????? ? ?????????? ?????????? (?????????? ?????????????????????? ? ?????????????? ??????????). ??????????? ?????????? ?????? ?????????????????? ?? ??????? ?????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ?????? CI– 202 (??), ??????? ?????? ?????????????? ?????? 670 ??, ?????????????????? ??????? ?????????????? 360 ??, ??????? 150 ??, ?????????? ?????????????????? 127 ??/??, ?????????? ?????????????? ?????????????? 0.01 ??².

????????? 1. ?????????????????????????? ??????????: ?) ?????????????? in vitro ?????????? ??????? ??????????; ?) ?????????? ? ?????????.

Figure 1. Experimental plants: a) in vitro propagation of downy birch plants; b) plants in a greenhouse.

?????????: ?????????????????? ?????????????? ?????????

Source: author's composition

??? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? in vivo ?????????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????????? SIRAS-4 (PP Systems, ???), ?????????????????? ?????????????? ?????????? ??????????, ?????????????????????? ??? ?????????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ??????????.

????????????? ?????????????? a, b ? ?????????????? ?????????????? ?? ?????????? Wellburn [26]. ????? 100 ?? ?????????? ?????? ?????????????? ? ?????????????? ?????? ? ?????????????? ?? 5 ??, ?????????????? 1 ?? 80% ?????????? ? ?????????????????? ? ?????????????????????? 15 ??? ? ??????????. ?????? ?????????????????????? 5 ??? ??? 13000 ??./??? ?????????????? ?????????????? ? ?????? ?????????????? ? ?????????? ?? ??????. ?????????????? 80% ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ? ?????????????? ?? 3 ??, ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?? 663, 646 ? 470 ?? ????????? 80% ??????????. ?????????????? ?????????????? ?????????????????? ?? ?????????????? ?????????????? (1 - 3):



???
 ? (663, 646, 470) – ?????????????? ??? 663, 646, 470 ??.
 ??? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ?????????? ??????????, ?????????? ?????????? ?????????????? ?????? ?????????????? 1.25 ? ?????????????? ? 30 ?? ?????????? ?????????? ?????????? ? 20 ?? 6 ? ?????????????? ??????????, ? ?????????????????????? ?? ??????????????????. ?????????? ?????????????? 0.1 ? (????????????? ?????????????????? ??????????) ?????????????????????? ? 1,5 ?? 3% ?????????? ?????????? ?????????????????????? ??????????, ?????????????????? ?????? ?????? Whatman # 2. ?????? ??? 0.8 ?? ?????????????? ?????????????? ? 0.8 ?? ?????????? ?????????????????? ? 0.8 ?? ?????????? ?????????? ??????????. ?????????? ?????????????? ? ?????????? ??? 100°? ?????? ??? ? ?????????????????????? ?? ?????????? ????. ?????????????? ?????? ?????????????????????? 1,6 ?? ?????????, ?????????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????? 15-20 ?. ?????????? ??? ?????????? ? ?????????????? ?????????? ?? ?????? ????, ?????????????? ?? ?????????????? ?????????????? ? ?????????? ??? ?????? ?????? 520 ?? (????????? ?????????????????????? ? ?????????? ??????????). ?????????????? ?????????????? ?? ?????????????????????? Multiskan Sky (Thermo Scientific, ???). ?????????????????? ?????????? ?????????????? ?? ?????????????????? ?????????? ? ?????????????????? ? ?? ??????????/? ?????? ?????? [27].
 ??? ?????????????????? ?????????????? ?????????????, 0.1 ? ?????????? ?????? ?????????????? ? ?????????????????????? ?????????? ? ?????????? ? 2 ?? ?????????- ?????????????????? (pH 7.8), ?????????????????? 1 ?? EDTA ? 2% ?????????????????????? ?????????????????? ? ?????????????????????? ??? 15000 g 10 ??? ??? 4°C. ??? ?????????????????????? ?????????? ??? ?????? ?????????????? ?????????? ?????? ?????????????????????? ?????????? ? ?????????????????????? ?????????????? ??? ?????????????????? 4°C. ? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????????????? ?????????? [28, 29] ?? ?????????? Multiskan Sky (Thermo Scientific, ???).
 ?????????????????????? ?????????????? ?????? ?????????????????? ? ?????????????????????? ?????? ?????????????????????? ?????????????????????? ?????????? (ANOVA). ?? ?????????? ? ? ?????????? ?????? ?????????????????? ? ??? ? ?????????? ± ?????????????????? ??????????????, ?????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? (p < 0,05).

?????????????

????????????????????? ??????
 ?????????? ?????????????????????? ?????????????? ?????? ?????????? ?? ?????????? ?????????? 0.5 – 5 ?? (??? 2?), ?????????? ?????????????????? ?????????????? ? ?????????? ?????????????? (??? 2?).

????????? 2. ?????????? ??????: ?) ?????????? ???; ?) ?????????????????? ??????????????????????

Figure 2. Slag sample: a) general view; b) electron micrographs

?????????: ?????????????????? ?????????????? ??????????

Source: author's composition

????????????????????? ?????? ?????????????????????? ?????????? ?????? ?????????? (???? 1), ?? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????? ?????????? (45.4 %), ?????????? ?????????? (32.3 %), ?????? ?????????? (12.3 %) ? ?????? ?????????? (7.3 %). ?????????? ?????????????? ?????????????? ? ?????????????????? ?????? 1 %.

Table 1

Slag sample composition

Slag sample composition

Component	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	S	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Content, wt. %	45.4±3.4	32.3±3.7	12.3±2.3	7.3±0.7	0.67±0.08	0.53±0.05	0.43±0.04	0.31±0.02	0.13±0.03	0.06±0.01

Source: own calculations

Slag sample composition, CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, MnO, S, Fe₂O₃, TiO₂. Content, wt. % 45.4±3.4 32.3±3.7 12.3±2.3 7.3±0.7 0.67±0.08 0.53±0.05 0.43±0.04 0.31±0.02 0.13±0.03 0.06±0.01

Source: own calculations

Table 2

Morphometric parameters of downy birch shoots before the start of the experiment

Morphometric parameters of downy birch shoots before the start of the experiment

Parameters

Plant height, cm
Root collar diameter, mm
Average number of leaves, pcs
Leaf area, cm²

Source: own calculations

60 days after the start of the experiment, the average height of the shoots was 14.5±0.82 cm, the average root collar diameter was 1.4±0.3 mm, the average number of leaves was 2.6±0.4 pcs, the average leaf area was 6.0 cm². The average content of CaO in the shoots was 45.4±3.4%, SiO₂ 32.3±3.7%, MgO 12.3±2.3%, Al₂O₃ 7.3±0.7%, Na₂O 0.67±0.08%, K₂O 0.53±0.05%, MnO 0.43±0.04%, S 0.31±0.02%, Fe₂O₃ 0.13±0.03%, TiO₂ 0.06±0.01%.

Source: own calculations

????? ???????? ?? ?????????? ????? ? ?????????? ???????? – ?????????? ?? ?????? ? 1.4 ????.
?????????? ?????????? ?????????????????? ??????
?????????????? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????? ?????? ???????? ? ?????????????????? ?????? ??????????????????
????????, ?? ?????????????????? ?????????? ? ??? ? ?????????? ?????? ?? ?????? ?????? ?????????? ? ??? ?????????????
????????? ?? pH 4.2 ?? pH 6.0 (???. 4?).

??????? 3. ?????????????????? ?????????? ?????? ??????: ?) ?????? ?????????; ?) ??????? ?????????; ?) ?????????? ?????? ?? ?????
????????; ?) ?????? ?????? ?????.

Figure 3. Morphometric parameters of birch shoots: a) plant height; b) stem diameter; c) number of leaves per plant; d) average leaf area

?????????: ?????????? ?????????? ???????

Source: author's composition

????????? ???????? ?????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ? ???????? ? ?????????????? ?????????????? ??????????
7.8±1.35 ??????/?²/??. ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????? ?? ?????????????? ?
????????????? ?????????? – 8.0±1.01 ? 9.5±1.03 ??????/?²/? ??????????????. ?? ???????? ?????????? ?????? (pH 6.0) ??????????
?? ? ?????? 11.7±0.93 ??????/?²/??. ???????? ?????? ?????????????? ?????????????????? ???????? ?? ??? ?????????? ?????????? ?
????????? ?????????? ?? ?????? ?????????. ?????? ?????????? ?????????? ???????? ?????????????? ?????????? ??????????????
?, ? ? ?????????????? ?? ?????????? ?????????????? ?????????? (???. 4?). ?? ???, ?? ? ? ?????? ? ?????????????? ??₂, ??????????
????????? ?????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?? ?????? ?????????????? ? ?????????? ??????.

????????????? ?????????????????? ??????
????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ???????? ?????????? ? ?????? ?????????? ?????????? ? ??????????????????
?????????. ? ????? ? ??, ??? ??? ?????? ?????????? ?????????????????? ???????? ?????? ?????????? ?? ?????????? ??????????????
?????????, ? ????? ?? ?????????? ?? ?????????? ???????? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????????? ??????. ?????????? ??????????
????????? ?????????? ?????????????????????? ?? ?????????? ?????????????? ?????????? (???. 5?), ?????????????? ?????????? (58 ??./??)
????????? ?? ? 6.0, ?????????????? (298.4 ??./??) ?? ? 4.2. ?????????? ? ?????? ?????????? ?????? ???????? ?????????????? ?????????, ??????
????????????? ? ??????, ?????????????????? ? ?????????????? ? ?????????????? ??????????, ?? ? ?????????? ?????????????.

??????? 4. ??????????? ??????????? ?????????????????? ?????????: ?) ?????????????? ?????????????? ??₂; ?) ?????????? ??????????????????

Figure 4. Photosynthetic system activity indicators: a) CO₂ assimilation rate; b) photosynthetic pigment content.

?????????: ?????????????? ????????????? ???????

Source: author's composition

??????? 5. ??????????? ??????????? ?????????????????? ?????????: ?) ??????????????????????; ?) ?????????????; ?) ?????????; ?) ??????????

????? ??????
?????????? ?????????? ????????????? ?????????????? ?????????????? «????? ??????»
?????????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? ??????????
????????????? ? ?????????? ?????? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ??????????
????????????? ?????? ? ?????????????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????????????? ??????????
????????????????????? ?????????????? ?????????? ?????????? ? ?????? ? ?????????????? ??????????
????????? ?????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ??????????
????????? ?????????????????? ??????????????
????? ??????, ?????? ?????? ? ?????? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ??????????
????????? ??????????, ? ? ?????? ?????????????? ?????????? ?????????????? ??????????
????????????? ?????????? ? ?????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????????? ??????????