

????????

?????? ??????????? ????????? ????? ?? ??????? ?????????? ????????????????, ? ????? ????? ?? ?????????? ??????????? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????? 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 ?????????? ?????????? ??????????; ?) ?????????? ? ??????????.

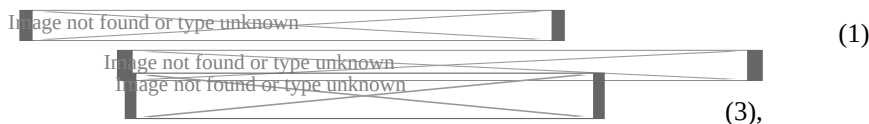
Figure 1. Experimental plants: a) in vitro propagation of downy birch plants; b) plants in a greenhouse.

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

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 %.

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

0.5 – 5 %

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

Source: own calculations

60

????? ???????? ?? ?????????? ?????? ? ??????????? ????????? – ?????????? ?? ?????? ? 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. ??????????? ??????????? ?????????????????????? ?????????: ?) ??????????????????????????; ?) ??????????????; ?) ?????????; ?) ??????????
?????????

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