

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

[7-9],
 [10-12] ? [13-15].
 2011
 Taiyuan Iron and Steel Group ? Harsco Corporation ?? [16].
 [17].
 21% [18].
 [19-21].

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

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

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

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

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

????????? / 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 ?? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????, ??????, ?????? ? ??????????. ? ?????????? ?????????????? (????? 1 %) ?????????????? ?????, ?????, ?????????, ????, ?????? ? ?????.

????????????? ?????? ??????? ?????? ?? ?????? ?????????.

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

?????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? ??????????, ?????? ? ?????????????? ?????? ??????, ?????????????????????? ? ?? ?????????? ??? ?????????????????? ??????????. ? ?????? ? ??, ?????? ?????????? ?????? ??? ??????????: ?????? ?????????, ?????????? ?????????? ?????? ?????????, ?????????? ?????????????? ?????????? ?? ?????? ?????????? ? ??????? ?????????? ?????????? (????? 2).

Table 2

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

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

????????? / Parame

?????? ?????????, ?? / Plant height, cm
????????? ?????????? ?????? ?????????, ?? / Root collar diameter, mm
????????? ?????????????? ?????????, ?? / Average number of leaves, pcs.
????????? ??????, ?? ² / Leaf area, cm ²

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

Source: own calculations

????? 60 ??? ???? ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ? ?????? ? ?????????? ??????????, ?????????????? ? ?????????????? ?????????????????????? ?????????? ???, ?? ?????????? ? ?????????????, ?????????????? ? ?????????? ??? ?????????????? ?????? (??? 3). ?? ?????? ?? ?????????????????? ?????? (??? 3?), ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ? ?????????? ? pH 5.2, ?????????????? ?????????????????? ?????? (26.1±2.1 ??). ?? ???, ?????? ?????? ?????????? ?????????????? ?????????????????? ? ?????????? ?????? ? ?????????? ? pH 4.2 (15.0±2.1 ??). ? ?????, ??? ?????????? ?????????????? ? ?????????? ?????????? ? ?????????? pH ?????? ?????????, ??? ?????????????? ?????? ?????????? ?? ?????????????? ?????????? ?????????????? ??????, ??-????????, ?? ??? ?????????? ?????????????? ? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????? ?????? ??????- ? ??????????????????.

????????????????? ? ?????????????? ?????????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????? ? ?????????????? ? ?????????? ?????????? (??? 3?). ?????????????? ?????????? ?????????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? ?????? ?? ?????????????????? ?????????????.

????????????????? ?????? ?????????, ?????????????????? ? ?????????? ? ?????????????????? ?????????????????? (?? 4.2), ??? ?????????????? ?????????? 1.4±0.3 ?????? 2.6±0.4 ? ?????????? (?? 6.0). ?????????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????? ?? 38% ? ?????????, ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????? ? ?? 20 % ? ?????????????.

? ?????????? ?????????????????????????? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ? 5.6±0.37 ?? ? ?????? ?????? ?? 14.5±0.82 ?? ? ??????. ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ? ?????????????????? ?????????? ??? ?????????????? ?????????????????? ?????????????????? ?? ?????????? (??? 3?). ?????? ?? ?????????? ?????????????????? ?????????? ??? ?????????? ?????????????????? ? ?????????? ?????????? ? ?????????? pH ?????????????? (? ?????? ?????? ??????????????). ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?? ?????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? (??? 3?). ?????????? ?????? ?? ??? ?????????? ?????????????????? ?????????????, ?????????????????? ?????????? ?????????? ??????????

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

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