

????????

????????????? ?????? ? ?????????????? ?????, ?????????????? ?????????? ??????, ?????????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? [1]. ?????????? ?????????????, ?????????? ?????????? ??????????, ?????????? ??? ? ?????????????? ?????? ? ?????????? ?????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????? ?????? ?????? ?????? ?????????????? ?????????? ?????? [2]. ?????? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????? ?????????? ?????? ?????????? ? ?????????????? ??????????, ?? ?????? ?????? ?? ? ??????-????????????? ?????? ? ??????????????

?????? ?????? ?????????? ? ??????? ?????????? ?????????-????????????????? ??????? ??????, ?????????????? ?? ?????????? ?????? ?????, ?? ?????? ? ??? ?????????? ?????? ?? ?????????? ??????????????, ?????????? ?????????? ?????????? ? ??????????, ? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????? ?? ?????? ? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? (???) [3]. ?????????????? ? ?????????????? ??? ?????? ?????????? ? ?????????? ?? ??? ??????, ?????????????????? ? ?????? ?????? ??????. ?????? ?? ?????????????? ?? ?????????????????? ?????? ?? ?????????????????? ?????????? ?????????? ??????????????, ?? ? ?????? ? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ?????? ??????. ?? ??? ?????? ?? ?????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ?? ?????????????? ??????, ?? ?????????? ?????? ? ?????????????????? ?????? ?????????? ??????????. ? ?????? ? ??? ?????? ?????????? ? ?????????????? ?????? ?????????, ? ?????? ?????????? ? ?????????? ?????????????????? ?????????????? ?????????????? ? ?????? ?????????? ? ?????????? ?????????????????????.

????? ?????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????????? ??? *Quercus* ?????????? ?????? ?????????, ?????????? ?????????? ? ?????? ?????? ?????? ?????? – ? ?????????? ?????????? ?? ?????????? ?????? ?????? [4,5]. ? ?????????, ?? ?????????? *Quercus robur* L. ?????????? ?????????????? ?????? ?????? ? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????? [6]. ?????????? ?? ??, ?? ??? ?????????????? ?????? ??? ?????????? ?????????? ?????????????????????? ?????? *Quercus* [7], ?????????????? ?????????? ?????????? ?? ?????????????? ?????????? ?????? ? ? ?????????? ?????????????? ?????????? [8]. ?? ?????????????????? ? ?????? ? ?????????? ?????????? ?????????????? ? ?????????? ?????? ?????????, ?????????? ?????? ?????????????? ?????? ?????? [7, 9, 10-12]. ? ?????? ?????????? ?? ?????? ?????????????????? ?????? ?????? ?????????????? ?? ?????????????? ?????????????, ?? ? ?????? «????????????? ??????» ?????? ?????? ?????????, ?? ?????????????? ?? ?????????????? ?????????? ??????, ?????? ?????????????????? ??????. ?????? ?????? ?? ?????????????????? ?????????? ? ?????? ?????????? -?-? ?????????? ?????????? ??????, ?????? ?????????? ?????????????????, ?????? ?????????? ?????????? ?? ?????? ?????? ?????????? ? ?????????? ?????????????? ?????????????? [13]. ?????????????? ?????????????? ?????????? ??????-????????????????? ?????????, ?????????? ?? ?????????????? ??????-?????????, ?????????? ?????? ?????????? ? ?????????? ?????????? [14].

????? ?????????? ?????????????? ?????? ?????????????????? ?????? ?????? ? ?????? ? ?????? ?????????????????????? ?????????????????? ?????????? ??? ?????????????? *Q. robur* L. ? ?????????? ?????????? RNA-seq. ? ?????? ?????? ?????????? ?????????????????? ?????????????????? ?????, ?????? ?? ?????????????????? ?????? ? ?????????????????? GO-????????????????? ? KEGG-?????, ? ?????? ?????????????????? ?????????? ?????-????????????, ?????????????? ?????????????????? ?? ?????????? ?????????????????? ? ??????????

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

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

? ?????? ??? ?????????????? ?????????, ?????????? ?? ?????? 46-????? ??? ?????????? *Q. robur* L ?? ?????????????? ?????? ?????????? ? ?????????????? ?????? (????????????? ?????? ?????????? ?????????, 51°42'47" ?.; 38°57'08" ?.). ?????? 339/57, ?????????? ?????? ??? ? ?????? ???, ?????????????????? ?? ?????? ?????? ? ?????????? ???, ??? ?????????? ? ?????? ?????????????? ??????????, ?????? ?????? ?????? 1992 ? 2010 ?????, ?? ??????, ?????????? ? ?????? ??????. ?????? ?????????????????? ? ?????????? ?????? ? 4-????????? ?????? ? ?????????????????? ?????? ?????????????????? ?????????? ?????? ? ?????????? (3:1).

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

????????? ?????? ?????????? ?? ?????????? ?????????? ?????????????, ?????????????? ?????? ?????????? ?? ?????? ?????????? ?????????? ?????? (??). ?????????????? ?????????? ?????????????? ?? 80±5% ??, ? ?????? ?????????? – ?? 45±5% ???. ?? ?????????????? ?????????? ?? ?????? ?????? ?????????? ?? ??? ? ?????? ? ?????????? ?????????? ???, ?????? ?????? ??????. ?????? ??? ?????????????? ? ?????? 60 ?????? ??????????????. ?????????? ?????????? ?????????? ? ? ?????? ?????????????, ?????????????? ?????? ?????????????? ?????????????? ? ?????? ?????? ? ?????? ?? ?????????????? -80°C ?? ?????????? ?????????????.

RNA-Seq

????????? ?????? ?????? ?????? ?????????????? ? ?????? ?????? ? ??????????, ?????? ??? ?????????? ?????????? ?? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? CTAB [48]. ?????? ?????? ?????? ?????????????? ?? ?????????? ??, ?????????? ?????????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????, ?????????????? ?????????? ? ?????????????? ?????? ?????? ?????????? ?????????????? ??????????????. ?????????????? ?????? ?????????? ? ?????????????????? ?????, ?????????? 2% ?????????????????????? (??), 100 ?? ???-HCl (pH 8,0), 20 ?? ???, 1,4 ? NaCl, ? ?????? ? ?????????????? ?????????? ?? 40 ?????? ?? ?????????? 65°C. ?????????? ?????? ? ?????????????????? ?????? ?????????? 1:10, ?? ?????????????? ?????????? ??????????. ?????????? ?????? ?????????? ? 50 ?? ?????????????????? ?????? ? ?????? ?? ?????????????? -80°C ?? ?????????? ?????????????.

???????? ???? ????????? ?????? ?????????????? ? 1% ?????????? ???? ? ?????????? ??????. ?????????????? ?????????? ???? ?????????? ? ?????????? VilberLourmat (????????). ?????????????? ??? ?????????? ?? ???????????? Qubit 2.0 ? ?????????????????? ?????? RNA BR Assay Kit (Thermo Fisher Scientific, ???).

????????????? ??? RNA-Seq ??? ?????????????? ? ?????? ?????? TruSeq Stranded mRNA (Illumina) ? ?????????????? ? ?????????????? ??????????????. ?????????? ?????????? ?????????????? ?? ?????????? Illumina Novaseq 6000. ?????????? ?????? ?????????????????? ??? ?????????????????? ? ?????????????????? ????

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

????????????????? ??? ???? ?????????????? ?? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ?????????? ? ?????????? FastQC (v. 0.74) [49] ? Trimmomatic (v. 0.39) [50]. ??? ?????????? ?????????? ??? ?????????????? ? ?????????????? ?????????? GCF_932294415.1 (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_932294415.1/) ? ?????????????????? ?????????????? ?????????? Galaxy [51] ? hisat2 (v. 2.2.1) [52] ??? ?????????????? ?????????????? ??????????????????????

????????????????? ?????? ?????????????????????? ?????????????? ?????????? ? ?????????? ?????? featureCounts (v. 2.0.3) [53] ? DESeq2 (v. 1.44.0) [54]. ?? ?????????? ?????????? ?????????? ??? ?????????? ?????? «DESeqDataSet» ? ?????????? ?????????? [design = ~ condition], ??? ?????????? «condition» ?????????? ?????????? ?? ?????????????????? ?????????? ? ?????????????????????????? ?????????? (?????????, ?????????????????? ?????????????????? ??????????). ?????? ?????????? ?????? ?????????????????? ?????? ? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????? 10 ?? ?????? ?????????? ??????????.

????????????????????? ?????????????????????????? ?????????? ?????, ?????????????????????? ?????? ??????????????. ?????????????????????? p-value (padj) < 0.05 ?????????????????? ??? ?????????? ?????????????????????? ??????????????, ? ?? ?????? ??? ?????????????? ?????????? $\log_2FC > 1 -$??? ?????????? ?????????????????? ??????????????. ??? $\log_2FC$?????????????????????? ??? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ?????????????? ?????? ?????????????????????? ? ?????????????? ??????????. ?????? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????????? ??? ?????????? ($\log_2FC > 0$), ??? ? ?????????? ($\log_2FC < 0$) ??????. ?????????????????? ?????? $|\log_2FC| > 1$?????????? ?????? ?????????????? ?????????????? ?????????????, ??? ?????????? ?????????????? ?????????????? ?????????????? ??????????

??????? ?????????????? Gene Ontology (GO-?????) ? ?????????????????? ?????? ??? ???? ?????? ?????????????????? ?????? (KEGG) ??? ?????????? ? ?????????? ?????????-????????????? DAVID (<https://davidbioinformatics.nih.gov/>) [55]. ??? ?????????? ?????????????????? ?????????? ?????????????? GO-????????? ?????????????????? ?????????????????????????? ??????. ?????????????? p-value ??? ? ?????????????????? ??? ?????????? ?????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? p-value ??? ?????????????? ?? ?????????? < 0.05.

????????????????? ?????????????? GO-????????? ? ?????????????? DESeq2 ??? ?????????? ? ?????????????????? ?????????? ggplot2 (v. 3.5.0) ? GOPlot (v. 1.0.2) [56] ? R (v. 4.4.0) ? ?????????? matplotlib (v. 3.10) ? pandas (v. 2.2.3) ? Python3 (v. 3.13.0).

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

??? ?????????? ?????? ?? ?????? ?????? ? ?????????????????? ? ?????? ?????????? *Q. rot* . ? ?????????????????? ?????????? ?????? ??? ?????????? ?????????????????? ?????? ?????????????? ??????. ?????????????????? ?????? ???-????????????????? ? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????? (GCF_932294415.1) ?????????? ??? (?????. 1, ????. S1).

??????? ?????????? Q30 ?????????? ?????? ?????????' $\leq 87.48\%$, ??? ?????????????????? ?????????? ?????????? ? ?????????????????? ?????? ?????????? ?????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????? ?????????? ?????????????????? ? ?????????????????? ?????????????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ?????????? ($\geq 90.33\%$) ? ??? ? ?????????????? ??? ?????????? ?????????????????????? ?????????? ??????