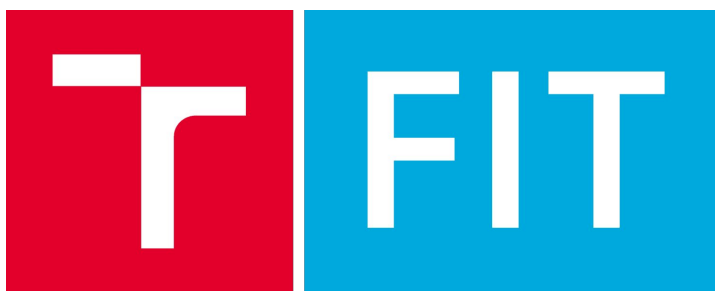


VYSOKÉ UČENIE TECHNICKÉ V BRNE

Fakulta informačných technológií



Modelovanie a simulácie

2015/2016

Varianta číslo 4

Aplikácia celulárnych automatov v biológii

Filip Gulán (xgulan00)

6.12.2015

Marek Marušic (xmarus05)

Obsah

<u>1 Úvod</u>	2
<u>1.1 Autori a zdroje informácií</u>	2
<u>1.2 Validita</u>	2
<u>2 Rozbor témy a použitých metód/technológií</u>	2
<u>2.1 Popis použitých postupov</u>	3
<u>2.2 Popis pôvodu použitých metód/technológií</u>	4
<u>3 Koncepcia</u>	4
<u>4 Architektúra simulátoru</u>	5
<u>4.1 Výstupy simulátoru</u>	5
<u>5 Podstata simulačných experimentov a priebeh</u>	5
<u>5.1 Postup experimentov</u>	5
<u>5.2 Experiment 1</u>	6
<u>5.3 Experiment 2</u>	7
<u>5.4 Experiment 3</u>	9
<u>5.5 Experiment 4</u>	10
<u>5.6 Experiment 5</u>	12
<u>5.7 Experiment 6</u>	13
<u>5.7 Závery experimentov</u>	14
<u>6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver</u>	14

1 Úvod

Táto práca vznikla ako projekt do predmetu Modelovanie a simulácie a je v nej riešená implementácia a simulácia (zdroj [2] slajd 8) celulárneho automatu (zdroj [2] slajd 317), ktorý má za úlohu skúmať ontogenézu rastlinného spoločenstva a jeho šírenie. Práca má za hlavnú úlohu overiť výsledky z vedeckého článku opakovaním vykonaných experimentov a taktiež navrhnúť nové experimenty. Zmyslom experimentov je demonštrovať to, aký má vplyv vegetatívne, nevegetatívne rozmnožovanie a rôzne vekové štádiá rastlín na celkové šírenie rastlinej populácie. V modeli (zdroj [2] slajd 7), ktorý popisuje táto práca sú tiež zahrnuté rôzne incidenty, ako pošliapanie rastlín, ktoré majú za následok okamžitý úhyn jedincov populácie, alebo tiež ako šírenie populácie ovplyvňuje určená prírodná prekážka.

1.1 Autori a zdroje informácií

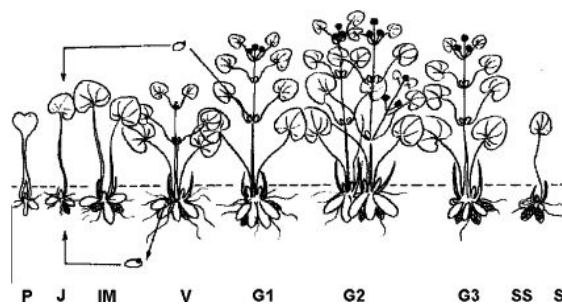
Autori práce sú študenti Fakulty informačných technológií Vysokého učenia technického v Brne Filip Gulán a Marek Marušic. Za pomoc pri pochopení odborných termínov a danej problematike patrí poďakovanie odbornej konzultantke Kláre Vidovej, študentke Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského v Bratislave. Informácie uvedené v tejto práci, ako aj model, boli prebrané z vedeckého článku [1] časopisu Ecological Modeling vydavateľstva Elsevier.

1.2 Validita

Experimentovanie prebiehalo za rovnakých podmienok, aké sú uvedené vo vedeckom článku [1]. Pre získanie validity (zdroj[2] slajd 37) boli dosiahnuté výsledky simulácie priebežne porovnávané s výsledkami článku. Novo navrhnuté experimenty boli konfrontované s konzultantkou a externými informačnými zdrojmi.

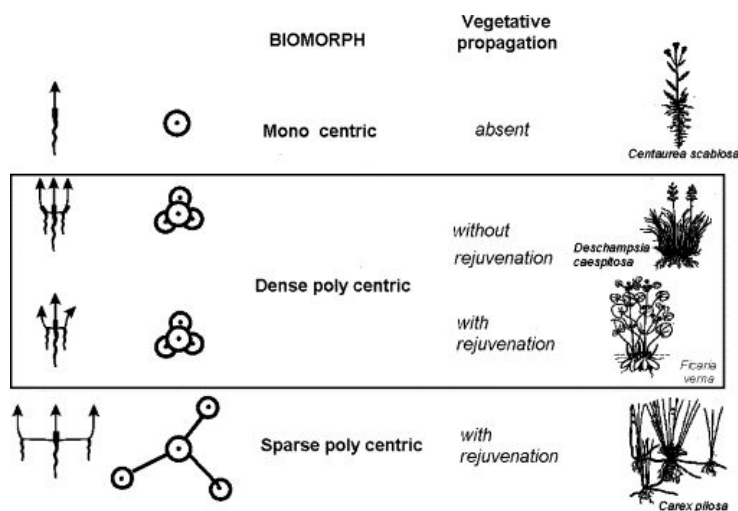
2 Rozbor témy a použitých metód/technológií

Populáciu rastlín reprezentuje priestorové rozloženie jednotlivcov rôznej veľkosti a veku. Títo jednotlivci môžu šíriť svoje potomstvo v rôznych podobách a rôznych priestorových vzoroch. Tieto okolnosti vedú ku komplexnej priestorovej dynamike rastlinných spoločenstiev. Vývoj rastlinného spoločenstva závisí ako na jedincoch a ich vývoji, tak aj na vývoji celkovej populácie [4]. Ontogenéza, vývoj rastliny, je proces, pri ktorom sa mení morfológická štruktúra rastliny. Je to neustály proces, ktorý nie je charakterizovaný iba fyzickým časom, ale aj biologickým časom daného organizmu. Podľa detailnej štúdie [6], ktorá prebiehala na veľkej vzorke rôznych druhov rastlín v rôznych spoločenstvách, môžeme zdiskretizovať rastlinnú ontogenézu na niekoľko štádií.



Obrázok 1: Príklad vekových štádií rastlín. Zdroj [1].

Detailný popis môžete nájsť v publikácii [6], pre účely tejto práce, nie je nutné tieto štádiá podrobne poznať, nutné je však vedieť, že existujú. Je nutné vedieť, že rastlina zo semienka vzniká v určitom štádiu, v určitom štádiu sa vegetatívne rozmnožuje a v určitom štádiu rastlina zomiera. Podľa toho, ako sa daná rastlina vegetatívne rozmnožuje delíme rastliny na 3 morfológické štruktúry [6]. Monocentrický typ rastliny nie je schopný vegetatívneho rozmnožovania, takýto typ rastliny je odkázaný iba na rozmnožovanie tým, že vietor semená tejto rastliny roznesie. Husto a riedko polycentrické rastliny sa už dokážu rozmnožovať aj vegetatívne (nepohlavne), teda rastlina vytvára kópie samej seba mladistvého vekového štádia. Rozdiel medzi husto a riedko polycentrickými rastlinami je ten, že husto polycentrické svoje klony vytvárajú blízko seba a riedko polycentrické zase naopak.



Obrázok 2: Typy ontogenézy a rozmnožovania pre jednotlivé morfológické štruktúry. Zdroj [1].

2.1 Popis použitých postupov

Pre implementáciu projektu bol vybraný jazyk C++. C++ je objektovo orientovaný jazyk, ktorý je jeden z najrýchlejších programovacích jazykov.

Rýchlosť pri simuláciách je veľmi výhodná, keďže niektoré náročné výpočty simulačných modelov môžu trvať veľmi dlho. Použitím C++ sa znížia tieto výpočtové doby. Pri nesprávne zvolenom programovacom jazyku, by simulácie mohli trvať značne dlhšie. Pred samotnou implementáciou a programovaním výslednej aplikácie, sme si vytvorili návrhový vzor

výslednej aplikácie s pomocou získaných informácií z vedeckého článku a znalostí nadobudnutých počas štúdia na FIT.

Pre vizualizáciu výslednej simulácie sme zvolili knižnicu OpenGL. Táto knižnica je navrhnutá pre vysoko výkonnú grafiku, a veľmi jednoducho prenositeľná medzi rôznymi operačnými systémami.

2.2 Popis pôvodu použitých metód/technológií

Výpočet samotnej simulácie sme sa rozhodli naimplementovať iba za pomoci štandardných knižníc jazyku C/C++¹. Toto rozhodnutie sme vykonali na základe všeobecnej jednoduchosti implementácie celulárnych automatov, kde nie je náročné vytvoriť simulačný program. Náročnosť implementácie je skrytá hlavne vo výpočtoch jednotlivých stavov buniek. Tejto implementácii náročných výpočtov by sme sa nevyhli ani pri použití akejkoľvek knižnice, keďže každý simulačný model používa iné rovnice, výpočty a pravidlá.

OpenGL² je jedno z najlepších prostredí, pre vývoj prenositeľných a interaktívnych 2D a 3D grafických aplikácií. Od svojho uvedenia na trh v roku 1992 sa stalo najpoužívanejším a najpodporovanejším API. Rozhodli sme sa ho použiť kvôli jeho prenositeľnosti, rýchlosti a jednoduchosti použitia keďže sme potrebovali zobrazit' 2D pole pre jednoduchšiu prezentáciu výsledkov simulácií.

3 Konceptia

Konceptia vychádza z informácií predstavených v kapitole 2 a z článku [1]. Rastliny sa nachádzajú v bunkách celulárneho automatu, v každej bunke môže byť jedna rastlina. Priestor automatu má tvar rotačnej plochy (torus), aby sa vyhlo nežiadúcim efektom na krajoch priestoru. Každá rastlina má svoje vekové štádium a všetky rastliny majú určenú rovnakú dobu smrti, teda v akom vekovom štádiu rastlina uhynie a v prípade existencie času vegetácie, aj kedy sa rastlina vegetatívne rozmnoží do svojho okolia (produkuje mladé nezávislé klony seba samej). V priestore sa teda môže nachádzať iba jeden špecifikovaný druh, všetky rastliny budú mať rovnaké vlastnosti. Iné vekové štádia ako štádium mladej rastliny (keď rastlina vyklíči, alebo inak vznikne), štádium vegetatívnej reprodukcie a senilné štádium(štádium, kedy rastlina zomiera) môžeme zanedbať, pretože nemajú vplyv na tento model. Okrem vegetatívneho rozmnoženia, je tu pre každú voľnú bunku celulárneho automatu tiež určitá percentuálna šanca vyrastenia mladej rastliny prostredníctvom vetrom zaviatého semienka (tzv. semienkový dážď). Každá rastlina má určitú percentuálnu šancu zaniknúť. Toto môže byť prezentované, ako napríklad prechod cez záhradu, kedy dotyčná osoba pošliape živé rastliny. Model bol rozšírený aj o autormi navrhnutými prvkami. V priestore sa môže nachádzať taktiež prírodná prekážka (napríklad kameň), ktorý by mal zaberať určité miesto. Originálny model pracoval iba s husto polycentrickým typom rastlín, ktoré sa rozmnožujú aj semienkovým dažďom aj vegetatívne. Autori do modelu pridali

¹ <https://isocpp.org/>

² <https://www.opengl.org/>

možnosť simulácie monocentrických rastlín. Teda rastlín, ktoré sa dokážu rozmnožovať iba vetrom naviatými semenkami.

4 Architektúra simulátoru

Simulátor obsahuje 2 triedy *areaCells* a *cells*. Trieda *cells* reprezentuje jednu bunku 1x1 cm pôdy na poli a udržiava informácie o danej bunke. Informácia či v bunke rastie rastlina a aký má rastlina vek je uložená v premennej *state*. V jednej bunke môže rásť iba jedna rastlina od svojho vzniku po svoju smrť. Každá bunka obsahuje súradnice na ktorých sa nachádza v danom poli. Pole pôdy je reprezentované triedou *areaCells*. Táto trieda reprezentuje maticu s jednotlivými bunkami *cells*. Obsahuje základné informácie o modeli ako jeho veľkosť, počet krokov simulácie (1 krok predstavuje 1 rok), dĺžku života rastliny, vegetačný čas rastliny, percentuálne obsadenie pola atď. Tiež obsahuje metódy, ktoré zabezpečujú simuláciu. V každom kroku simulácie sa vypočíta nasledujúci stav políčka pomocou metódy *evolve()*. Táto metóda reprezentuje pravidlá celulárneho automatu a ponúka jednoduché znova použité simulačnej aplikácie pre rôzne celulárne automaty úpravou práve tejto metódy.

4.1 Výstupy simulátoru

Simulátor je schopný prezentovať výsledky simulácie viacerými spôsobmi. Prvý a hlavný spôsob je prostredníctvom percentuálneho zastúpenia rastlinnej populácie v priestore a čase, ktoré sú uložené buď do súboru vo formáte csv (prepínač -f FILE), alebo vytlačené na štandardný výstup. Druhým spôsobom je vizualizácia priestoru v príkazovej riadke (prepínač -c). Tu sú pekne vidieť jednotlivé veky rastlín. Posledným spôsobom, je grafická OpenGL vizualizácia (prepínač -g).

5 Podstata simulačných experimentov a priebeh

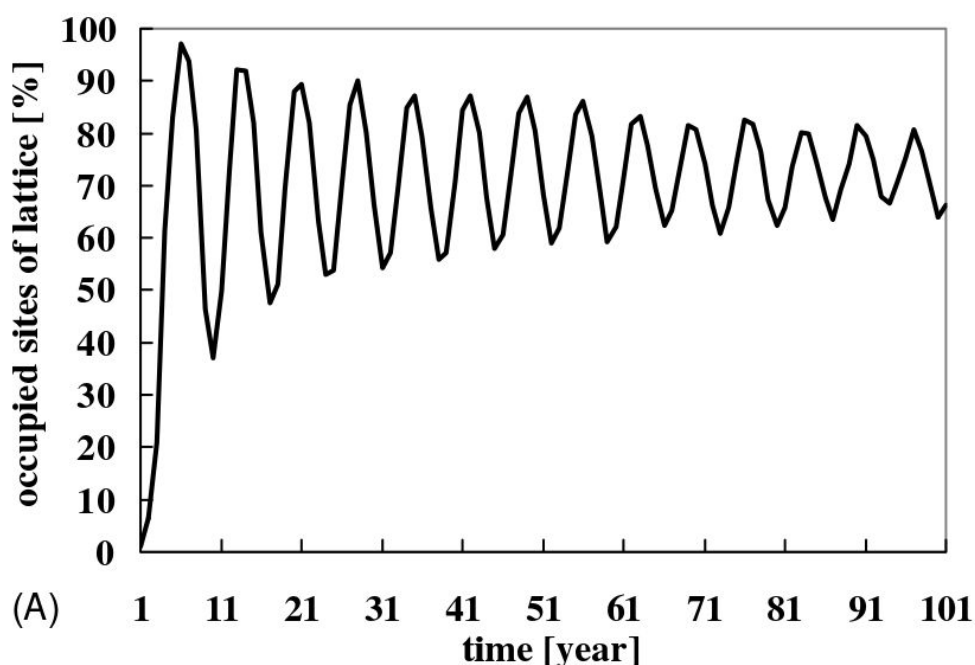
Podstata simulačných experimentov je skúmať ontogenézu rastlinného spoločenstva a jeho šírenie. Práca má za hlavnú úlohu overiť výsledky z vedeckého článku [1] opakovaním vykonaných experimentov a taktiež navrhnúť nové experimenty. Zmyslom experimentov je demonštrovať to, aký má vplyv vegetatívne, nevegetatívne rozmnožovanie a rôzne vegetatívne obdobie rastlín na celkové šírenie rastlinnej populácie. V kapitolách 5.2, 5.3, 5.4 a 5.5 sú znova vykonané experimenty z článku [1] a v kapitole 5.6 a 5.6 sú popísané vlastné experimenty s modelom.

5.1 Postup experimentov

Z každého experimentovania sme získali údaje o percentuálnom zastúpení rastlín v priestore a modelovom čase (Zdroj [2] slajd 21) pomocou vytvoreného simulátoru. Tieto výsledky boli potom uložené vo formáte csv a následne vizualizované formou grafu pre účely tejto práce.

Získané grafy z nášho simulátoru boli následne porovnávané s grafmi a výsledkami článku [1].

5.2 Experiment 1



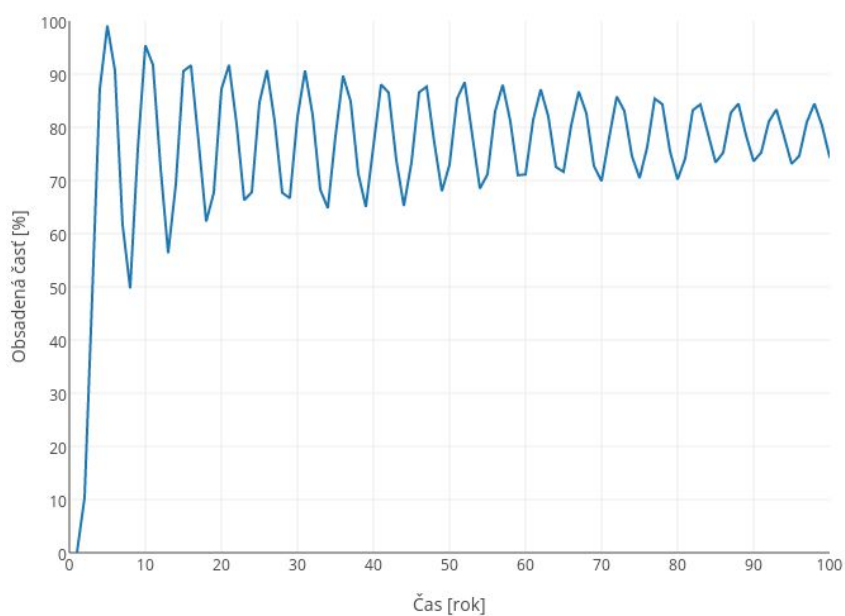
Obrázok 3: Dynamika populácie, schopnosti rozmnožovania v prvej polovici života. Vegetačný čas = 2, čas úmrtia = 5, semienkový dážď = 0.1. Zdroj [1].

V tomto experimente boli parametre modelu nastavené nasledovne: čas úmrtia nastavený na 5 rokov, semienkový dážď na 10% pravdepodobnosť a vegetačný čas na 2. rok života. Z toho nám vyplíva že rastliny sa rozmnožujú v prvej polke svojho života a populácia nepodlieha náhodnému vyhynutiu. Po skončení behu programu sme získali výsledok (viz. obrázok 4) kde výsledný graf obsadenia plochy rastlinnou populáciou osciluje.

Toto je spôsobené vegetačným vekom v prvej polovici života. Keď nie sú žiadne susedné prázdne bunky, na ktoré by sa dalo rozmnožiť, nemôžu vzniknúť nové rastliny. Týmto javom rastliny v bunkách zostarnú a nie sú schopné sa ďalej rozmnožovať vegetatívne. Po niekoľkých časových krokoch rastliny dosiahnu úmrtný vek a nastáva intenzívne vymieranie rastlín. Tu môžeme pozorovať veľký pokles počtu rastlín v modeli. V tomto bode sa rozmnožovanie deje iba pomocou semienkového dažďa.

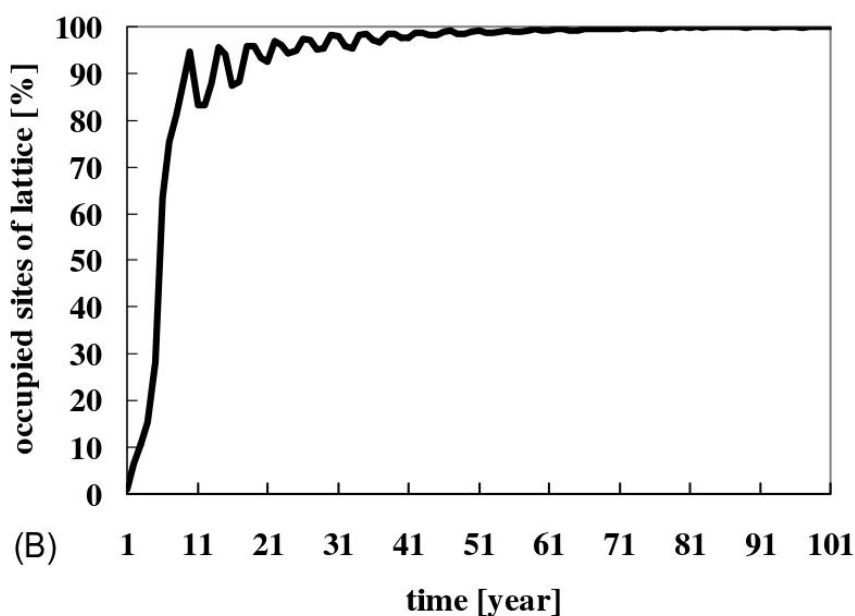
V nasledujúcich krokoch rastliny znova dosahujú vegetačný vek a znovu zaplňujú plochu modelu mladými rastlinami, schopnými rozmnožovať sa vegetatívne, čím sa preváža počet umierajúcich rastlín a cyklus sa opakuje znova.

Pre porovnanie ako sa populácia rozmnožuje v prvej polovici života a v druhej polovici života použijeme v nasledujúcom experimente hodnotu vegetačný čas nastavenú na 4. rok života.



Obrázok 4: Simulácia z obrázku 3 pomocou nášho simulačného modelu.
Vegetačný čas = 2, čas úmrtia = 5, semienkový dážď = 0.1.

5.3 Experiment 2

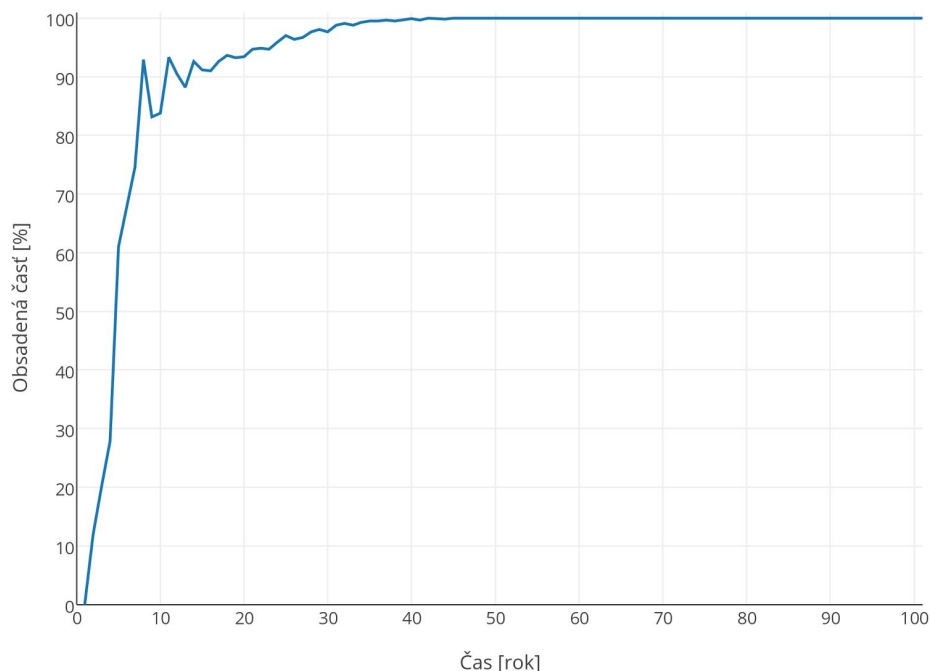


Obrázok 5: Dynamika populácie, schopnosti rozmnožovania v druhej polke života. Vegetačný čas = 4, čas úmrtia = 5, semienkový dážď = 0.1. [1]

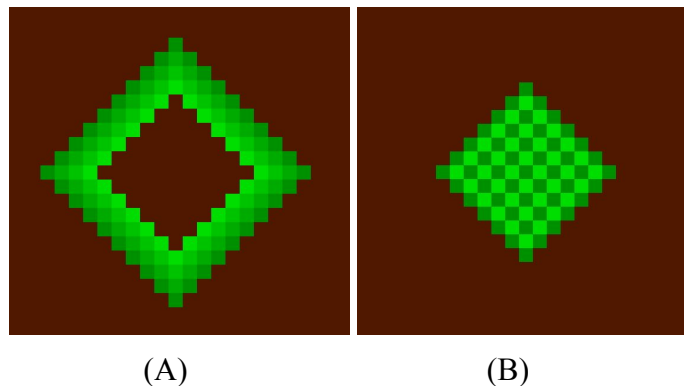
V tomto experimente ukážeme ako vplýva vegetačný čas v druhej polovici života na populáciu rastlín. Nastavíme vegetačný čas na 4. rok života a ostatné parametre ponecháme rovnaké ako v experimente 1. Na obrázku 6 môžeme pozorovať výsledok tohoto experimentu a všimneme si že oscilácie miznú a dynamika populácie sa zmenila.

Tento rozdiel je spôsobený zmenou vegetačného času na druhú polovicu života čo zapríčinilo rozdielny tvar rozmnožujúcej sa populácie. Pre rôzne vegetačné časy môžeme pozorovať rôzny tvar rozmnožujúcej sa populácie na obrázku č. 7. Tvar rozmnožujúcej sa populácie s vegetačným časom 2 vyzerá ako kruhová vlna, s prázdny stredom (obrázok 7A). Populácia s vegetačným časom 4 (obrázok 7B) má vyplnený aj stred, keďže rodiaca sa rastlina má možnosť preniknúť aj do vnútra rozširujúceho sa kruhu. Toto je spôsobené rozdielnym umiestnením rastlín v priestore v rôznych vekových fázach.

Tento jednoduchý príklad poukazuje na dôležitosť priestorovej štruktúry v dynamike rozmnožujúcej sa populácie.

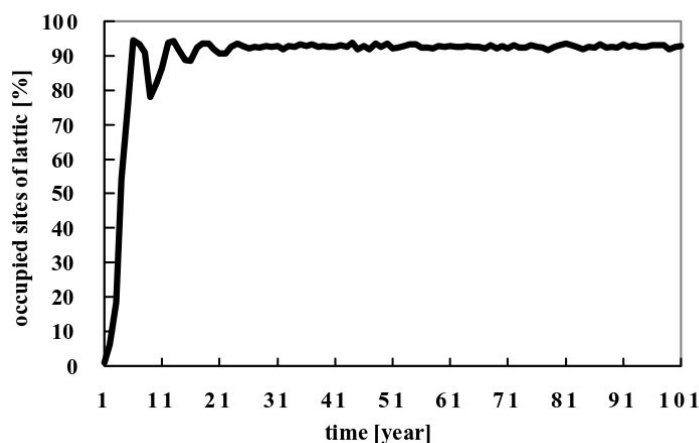


Obrázok 6: Simulácia z obrázku 5 pomocou nášho simulačného modelu.
Vegetačný čas = 2, čas úmrtia = 5, náhodné rozmnoženie 0.1.



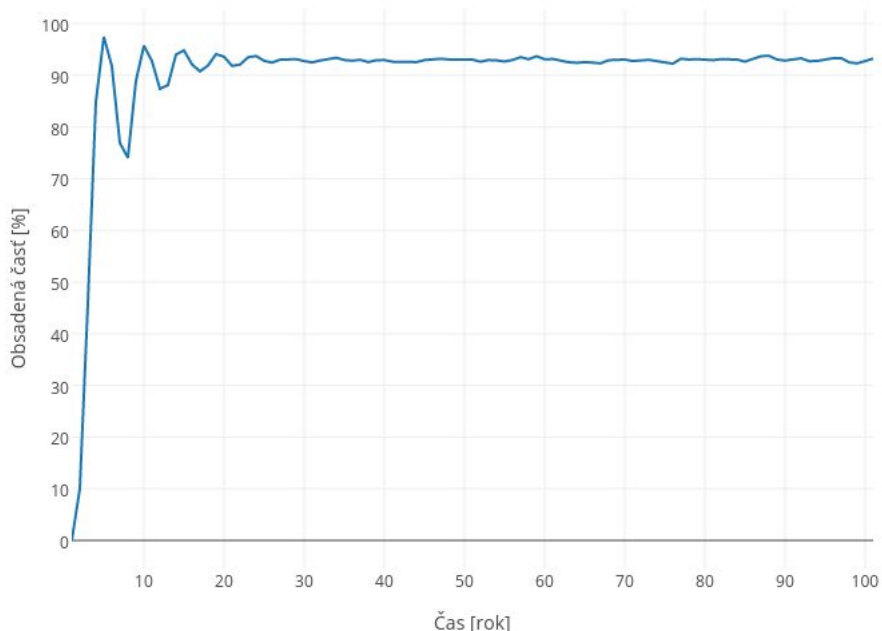
Obrázok 7: Rôzne tvary rozmnožujúcej sa populácie v rôznych vegetačných časoch.
(A) Vegetačný čas 2. (B) Vegetačný čas 4.

5.4 Experiment 3



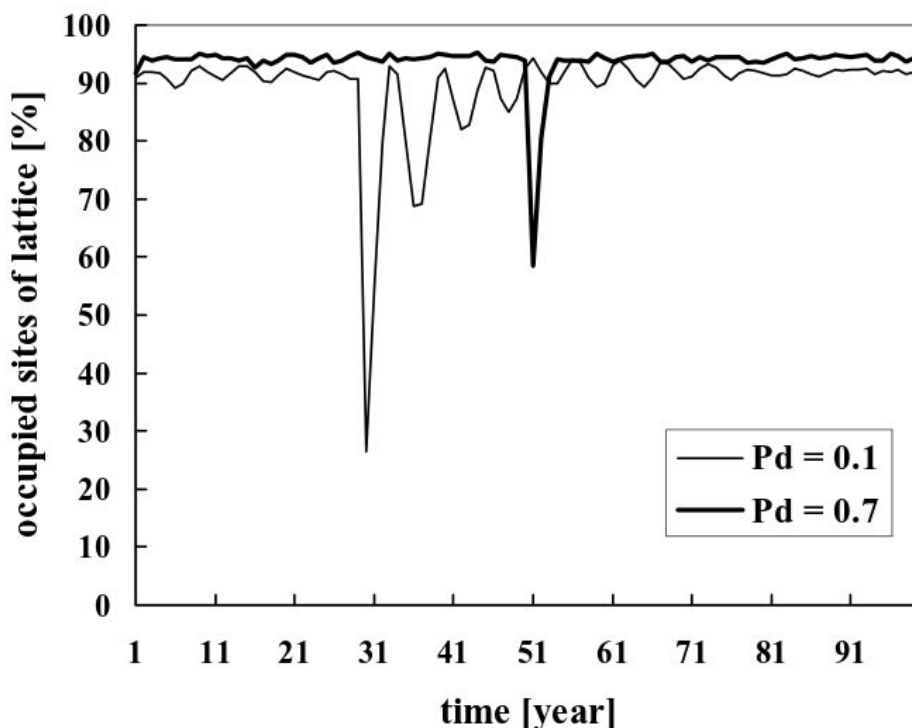
Obrázok 8: Účinok náhodného vyhynutia s intenzitou 10% na početnosť populácie. (ostatné parametre rovnaké ako v experimente 1) [1].

Použité parametre v experimente sú rovnaké ako v experimente 1 s pridaním parametru náhodného úmrtia nastaveného na 10%, pre demonštráciu účinku tohoto parametru na veľkosť populácie rastlín. Výsledok simulácie môžeme pozorovať na obrázku č. 9. Okrem nižšieho počtu rastlín v začiatkovej fáze vidíme že zvyšovaním intenzity náhodného úmrtia sa znižuje amplitúda oscilácie krivky znázorňujúcej obsadenie priestoru rastlinami z obrázku 4. Tento jav je spôsobený omladzovaním populácie náhodnými úmrtiami jedincov a väčším počtom voľných buniek pre nových mladých jedincov.



Obrázok 9: Simulácia obrázku 8 pomocou nášho simulačného modelu.

5.5 Experiment 4



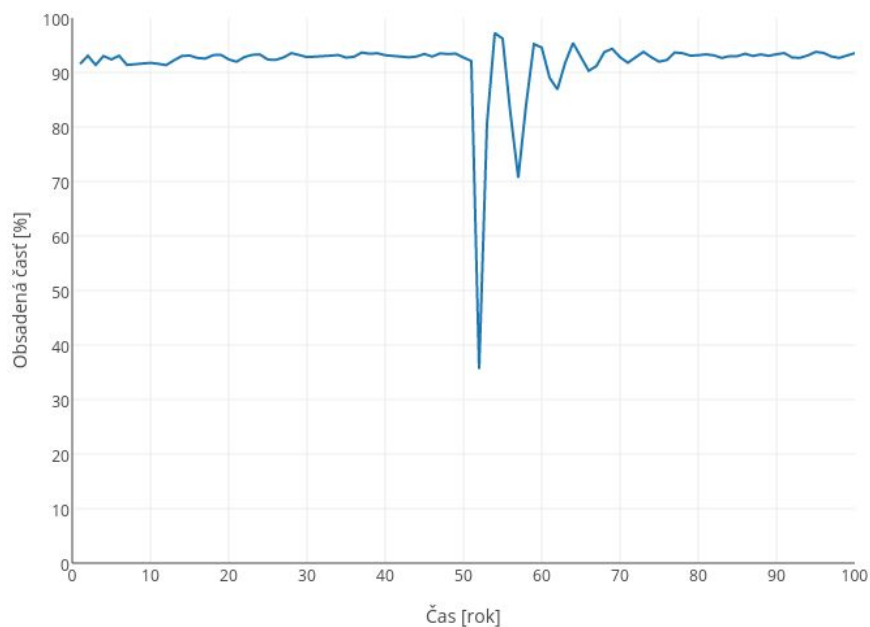
Obrázok 10: Adaptácia populácie na rôzne intenzity zániku jedincov. [1]

Pre jednoduchosť v tomto experimente bolo zanedbané rozmnožovanie vplyvom naviatých semienok. Mladé rastlinky boli umiestnené na spodný okraj priestoru, a následne šírili svoje klony do priestoru. Priestor bol v tomto kroku úplne ohraničený. Keď bol priestor z väčšiny plochy zaplnený rastlinami, okraje plochy boli odstránené a priestor nadobudol tvar rotačnej plochy (torus), kvôli nežiadúcemu efektu okrajov priestoru. Tieto vlastnosti, umožnili skúmať vnútorný vývin populácie, bez vplyvu vonkajších faktorov.

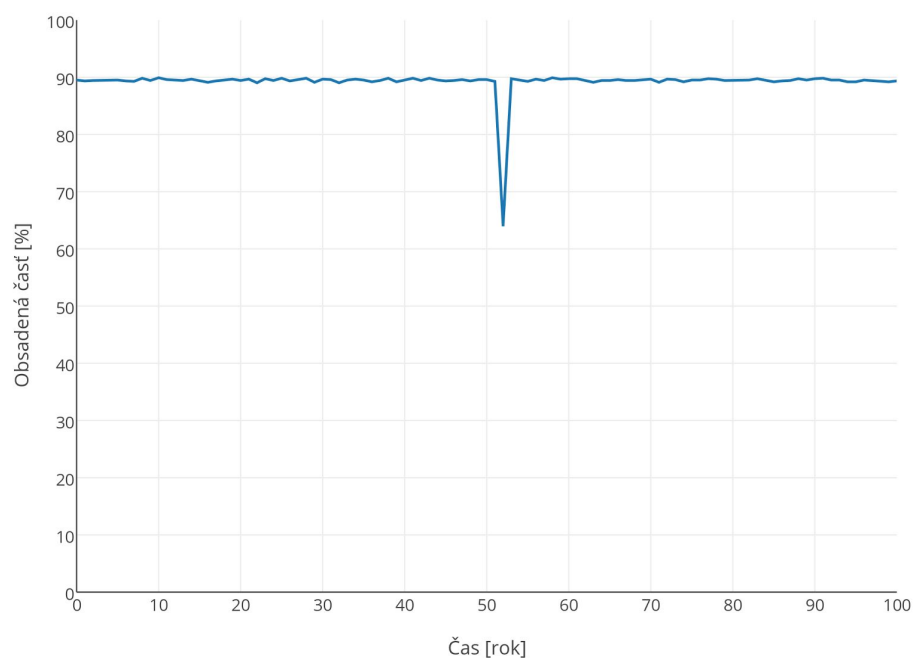
Experiment má za úlohu skúmať reakciu a zotavenie rastlinnej komunity na intenzívne úmrtie v jednom časovom kroku. Presnejšie sa v našom experimente toto intenzívne úmrtie stalo pre obidva prípady v rovnakom čase a to v 50 roku (pre názornejšiu ukážku). Pravdepodobnosť tohoto úmrtia bola nastavená na 90% a pravdepodobnosť obyčajného úmrtia, ktoré je prítomné počas celého experimentu, bola nastavená na 10%. Vegetačný čas rastliny bol nastavený na 2. rok a úmrtie na 5. rok.

Na obrázku č. 11 je vidieť, že v čase intenzívneho úmrtia populácia prudko klesla a ďalej nejaký čas populácia striedavo stúpala a klesala. Tento jav je spôsobený tým, že väčšina rastlín, mala po tomto incidente rovnaké vekové štádium a naraz vznikali aj zanikali. V porovnaní s obrázkom č. 12 môžeme sledovať že keď rastliny podliehali neustálemu väčšiemu percentuálnemu úhynu, tak sa celková populácia so stratou časti populácie kvôli

intenzívnemu hromadnému úmrtiu vysporiadala lepšie, a populácia obnovila svoj stav rýchlejšie. Tento efekt môže byť vysvetlený nasledovne. Pri väčšej pravdepodobnosti úmrtia sa znižuje počet dospelých rastlín a zvyšuje počet mladých rastlín, ktoré sú schopné sa rozmnožovať a tým sa populácia rýchlejšie dostane do stavu pred 50. rokom.



Obrázok 11: Adaptácia populácie na rôzne intenzity zániku jedincov získaná z našej simulácie. Neustály zánik s pravdepodobnosťou 10% a intenzívny zánik v čase 50 rokov s pravdepodobnosťou 90%.

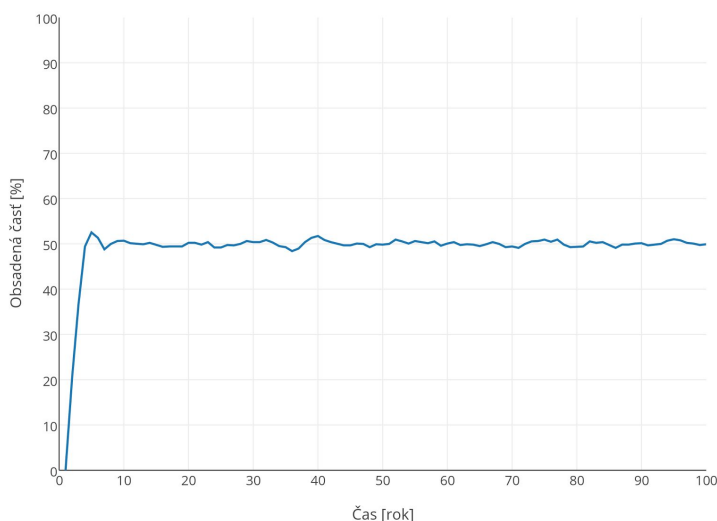


Obrázok 12: Adaptácia populácie na rôzne intenzity zániku jedincov získaná z našej simulácie. Neustály zánik s pravdepodobnosťou 70% a intenzívny zánik v čase 50 rokov s pravdepodobnosťou 90%.

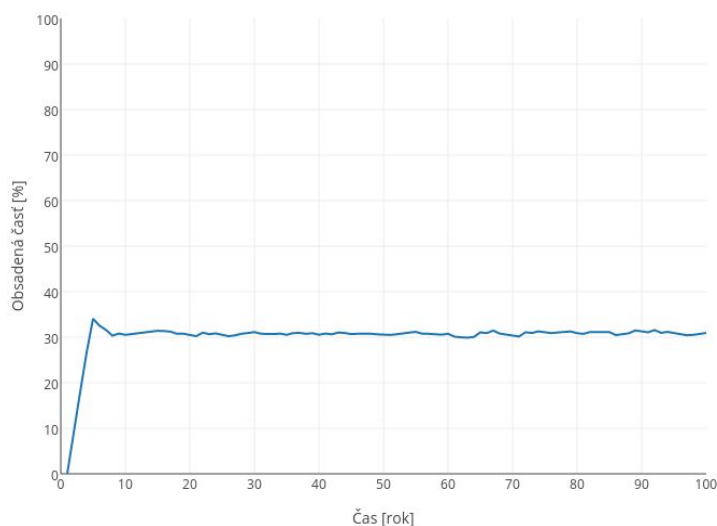
5.6 Experiment 5

Experiment je zameraný, na demonštráciu ako absencia vegetatívneho rozmnožovania u monocentrických rastlín ovplyvňuje celkovú dynamiku a počet jedincov v rastlinnom spoločenstve. Parametre sú zvolené rovnaké ako v experimente 1 (kapitola 5.2) a vegetatívny čas je zanedbaný. Tieto rastliny sa teda budú rozmnožovať iba vetrom naviatymi semienkami. Pravdepodobnosť vytvorenia rastliny z takéhoto semienka je daná parametrom.

Na obrázku č. 13 a č. 14 je vidieť, ako s narastajúcou pravdepodobnosťou semienkového dažďa narastá aj celková rastlinná populácia. Graf na obrázku č. 14 v porovnaní s grafom na obrázku č. 4 nedosahuje takej výšky. Je to spôsobené tým, že po tom ako sa rastlina v experimente 1 vznikla, tak sa vyvíjala a sama sa mohla v určitom vekovom štádiu vegetatívne rozmnožovať, čoho ale monocentrické rastliny nie sú schopné.



Obrázok 13: Dynamika populácie, schopnosti rozmnožovania bez vegetačného času. Čas úmrtia = 5, semienkový dážď = 0.2.

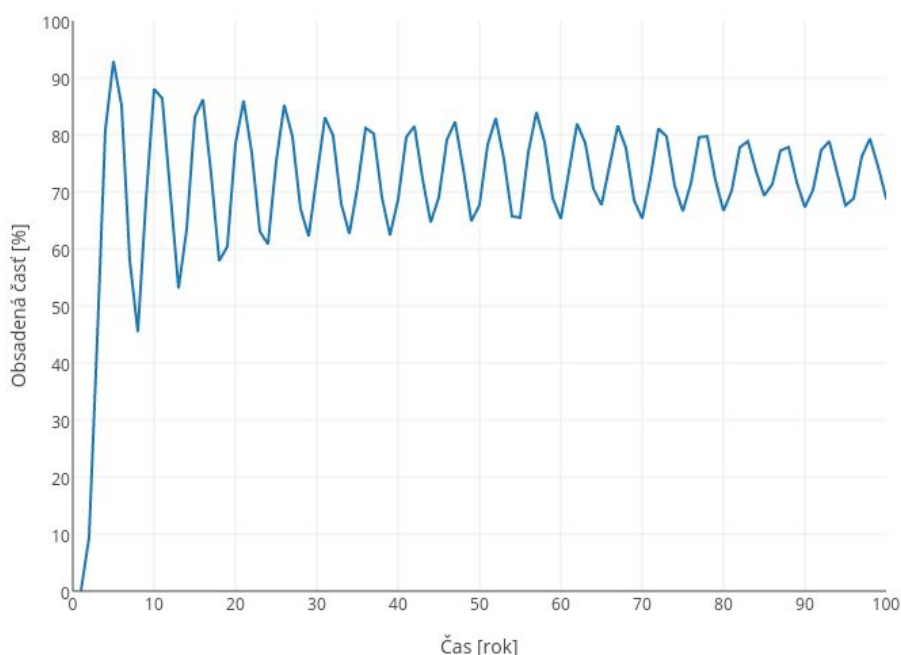


Obrázok 14: Dynamika populácie, schopnosti rozmnožovania bez vegetačného času. Čas úmrtia = 5, semienkový dážď = 0.1.

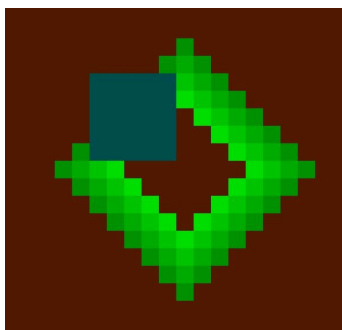
5.7 Experiment 6

Cieľom experimentu 6 je pozorovať, aký vplyv má na rast a vývoj rastlinného spoločenstva určená prírodná prekážka, napríklad kameň. Vstupy simulátoru odpovedajú vstupom experimentu 1 (kapitola 5.2) s tým rozdielom, že bol pridaný kameň o veľkosti $\frac{1}{4}$ šírky plochy a $\frac{1}{4}$ výšky plochy, teda kameň zaberá $\frac{1}{16}$ obsahu plochy, kde sa nachádzajú ratsliny.

Ako môžeme vidieť porovnaním obrázku č. 15 a obrázku č. 4, tak populácia sa vyvíjala takmer totožne, nezávisle na tom, či sa v priestore nachádza kameň, alebo nie. Iba výška grafu obrázku č. 15 bola zmenšená cca o 6-7%. Je to z dôvodu, že rastliny nemohli rásť na ploche, ktorú zaberá prírodná prekážka. 6-7% odpovedá cca priestoru ktorý zaberá kameň v priestore. Ako je možné vidieť aj na obrázku č. 16, tak kameň nemal žiaden vplyv na vegetačné šírenie rastlín, rastliny ho jednoducho obrástli.



Obrázok 15: Dynamika populácie, schopnosti rozmnožovania s vplyvom prírodnej prekážky. Vegetačný čas = 2, čas úmrtia = 5, semenkový dážď = 0.1.



Obrázok 16: Ukážka šírenia rastlín s prírodnou prekážkou. Tmavo tyrkysový štvorec je kameň. Bol zanedbaný semenkový dážď, pre dôraznejšiu ukážku.

5.7 Závery experimentov

V týchto experimentoch sme vykonali 2 vlastné experimenty a 4 experimenty za účelom porovnania výsledkov s výsledkami z nami vybraného článku.

Dosiahnuté výsledky našim simulačným modelom sú takmer rovnaké s výsledkom z článku. Nastávali tu podobné udalosti dosiahnuté v článku. Z experimentov je možné odvodiť správanie systému v simuláciach s dostatočnou vierohodnosťou, keďže sa podarilo zopakovať simulácie z daného článku. V priebehu experimentovania sa ukázala dôležitosť vplyvu rôznych javov na celkovú populáciu, ako vegetačný čas a pravdepodobnosti úmrtia rastliny.

Všetky experimenty sa dajú spustiť príkazom `make run` nášho simulátoru.

6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver

V tejto simulačnej štúdii sme sa pokúsili o implementáciu a simuláciu celulárneho automatu a experimentov z článku o rozmnožovaní populácie rastlín [1]. Z výsledkov vyplýva že počet rastlín v priestore závisí z veľkej časti na ich čase rozmnožovania a úmrtia. Následne sme ukázali že intenzita náhodného úmrtia rastlín môže mať rôzne vplyvy na počet a vek rastlín v priestore. Výsledky simulácie sú veľmi podobné výsledkom z citovaného článku. V rámci projektu vznikol nástroj pre simuláciu rôznych javov pôsobiacich na populáciu rastlín. Táto aplikácia je schopná vizualizovať populáciu rastlín a exportovať jej hodnoty do csv súboru. Implementovaná bola v jazyku C++ s využitím OpenGL knižnice.

Referencie

- [1] KOMAROV, A.S, M.M PALENOVA a O.V SMIRNOVA. The concept of discrete description of plant ontogenesis and cellular automata models of plant populations. *Ecological Modelling* [online]. 2003, **170**(2-3): 427-439 [cit. 2015-12-03]. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00243-6. ISSN 03043800. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380003002436>
- [2] PERINGER, Petr. *Modelování a simulace* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/course-files-st.php/course/IMS-IT/lectures/IMS.pdf>
- [3] PERINGER, Petr. *Seminář C++: Slajdy k přednáškám* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ICP/public/Prednasky/ICP.pdf>
- [4] ROMANOVSKÝ, Alexej. *Obečná biologie*. 2. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988, 695 s.
- [5] FOGG, G. *Život a růst rostlin*. 1. vyd. Praha: Orbis, 1969, 250 s., 24 obr.na příl. Malá moderní encyklopedie (Orbis).
- [6] GATSUK, SMIRNOVA, VORONTZOVA, ZAUGOLNOVA a ZHUKOVA. Age States of Plants of Various Growth Forms. *Journal of ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980, **1980**(68): 675-696. DOI: 10.2307/2259429. ISSN 1365-2745.