

# Generatívne modely vývoja biologických štruktúr

Alica Kelemenová

Ústav informatiky, FPF Slezská univerzita v Opave  
Bezručovo nám.13, 74601 Opava, ČR  
kelemenova@fpf.slu.cz

## Abstrakt

Cieľom príspevku je poskytnúť prehľad diskretných modelov, ktoré využívajú vývojové pravidlá na popis objektov motivovaných biologickými štruktúrami a umožňujú v adekvátnom rozsahu štúdium dejov prebiehajúcich v týchto štruktúrach.

Uvedieme Lindenmayerove vývojové systémy, ekogramatické systémy, membránové systémy a morfogenetické systémy. K jednotlivým modelom uvedieme informácie o motivácii vedúcej k ich zavedeniu a o štruktúre modelov, typické okruhy problémov a referencie.

## 1 L systémy

Najstarším z modelov, ktoré zmienime sú vývojové systémy Aristida Lindenmayera zavedené roku 1968. (Lindenmayer, 1968). Lindenmayerove systémy dnes predstavujú typický a detailne rozpracovaný generatívny model, ktorý bol inicializovaný a vytvorený na základe podnetov z biologických vied. Cieľom A. Lindenmayera bolo navrhnúť model vývoja jednoduchých organizmov, ktorý by umožnil nielen opísať skúmanú biologickú predlohu, ale by tiež vypovedal o možnom vývoji tohto organizmu, umožnil charakterizovať jeho vlastnosti a biologicky relevantné prejavy.

Motivačnou predlohou tohto modelu sú organizmy s jednoduchou vláknitou štruktúrou reprezentované reťazcami buniek. Na modelovanie buniek a ich vzájomných komunikačných možností sa rozhodol A. Lindenmayer využiť v tom čase teoretickú novinku, konečné automaty. Biologická predloha vyžadovala, aby všetky automaty v reťazci, reprezentujúce bunky pracovali synchronne, a tiež aby sa reťazce automatov mohli predlžovať či skracovať podľa toho, ako sa bunky v organizme množia alebo zanikajú. Tieto kľúčové požiadavky viedli ku vzniku a rozvoju teórie L systémov, tak ako ju dnes poznáme.

Vďaka G. Rozenbergovi majú dnes L systémy tvar paralelne pracujúcej formálnej gramatiky. Možnosti, ktoré L systémy poskytujú pre simuláciu vývoja rastlín reprezentatívne ilustruje kniha *Algoritmická krása rastlín* (Prusinkiewicz, Lindenmayer 1990), na ktorú naviazali ďalšie publikácie, napríklad *Algoritmická*

*krása lastúr* (Meinhardt 1995) a *Algoritmická krása rias, špongií a koralov* (Kaandorp, Kubler 2001).



Obr. 1: Knihy o algoritmickej kráse rastlín, lastúr rias, špongií a koralov

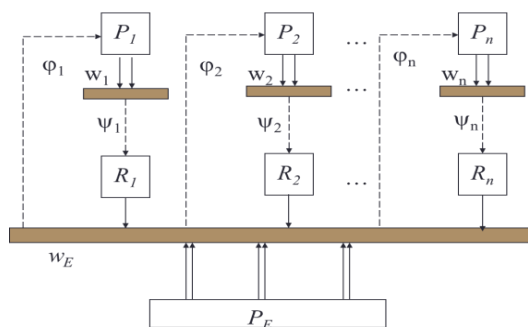
Typickými oblasťami aplikácií L systémov sú rôzne modely v biológii a medicíne. (Kókai a kol. 1999) (Aghamirmohammadali a kol. 2018) L systémy poskytli významný stimul pre rozvoj počítačovej grafiky. Algoritmická botanika sa venuje P. Prusinkiewicz s kolektívom <http://algorithmicbotany.org/>. Aplikácie teórie nájdeme aj v oblastiach, ktoré priamo nesúvisia s ich pôvodnou motiváciou, v architektúre, hudobnej vede, i pri návrhu ornamentov (McCormack 2003), (Manousakis 2006). V teórie formálnych jazykov znamenal výskum L systémy sústredenú koncentráciu na paralelizmus. Záujemcom o výpočtové aspekty L systémov odporúčame (Herman, Rozenberg 1975), (Kari, Rozenberg, Salomaa 1997), (Kelemenová 2005, 2010) a (Kelemen, Kelemenová 2001).

## 2 Ekogramatické systémy

V tejto kapitole predstavíme model ekosystému zložený z L systémov, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú. Predstavujú biologicky motivovanú variantu gramatických systémov. (Csuhaj-Varjú a kol. 1994). Ekosystém je tvorený prostredím a organizmami. V ekogramatickom systéme každému organizmu prislúcha L systém, ktorý charakterizuje jeho individuálny vývoj v situácii, keď sa stav prostredia nemení a keď vývoj organizmu neovplyvňujú iné organizmy. L systémom je tiež určený vývoj prostredia v ekogramatickom systéme. Tento charakterizuje vývoj prostredia tak, ako prebieha bez zásahu organizmov. Ekogramatické systémy boli

navrhnuté v (Csuhaj-Varjú a kol. 1994, 1997) na základe nasledujúcich požiadaviek na väzby medzi prostredím a organizmami (Farmer, Bellin 1991):

- Činnosť prostredia ekogramatického systému je stabilná. Jeho stabilita je daná tým, že pravidlá vývoja prostredia ekogramatického systému sú pevne stanovené. Systém neumožňuje obmedziť či rozšíriť ich počet ani regulovať ich použitie.
- Stav prostredia však môže dočasne zablokovať použitie niektorých vývojových pravidiel organizmov.
- Organizmy sa môžu vzájomne ovplyvňovať, či zasahovať do vývoja prostredia prostredníctvom akčných pravidiel. Každý organizmus vykoná v jednom kroku najviac jednu akciu na zvyšku ekosystému. Môže zasiahnuť do vývoja niektorého organizmu, alebo ovplyvní vývoj prostredia.
- Akcie organizmov sú majú prioritu pred vlastným vývojom prostredia a organizmov. To znamená, že pri synchronizovanej práci celého systému, pravidlá prostredia a vývojové pravidlá organizmov prepíšu len tie časti svojich reťazcov, kde v danej chvíli nezasiahli iné organizmy.
- Výber akčných pravidiel organizmu môže byť obmedzený dosiahnutým stupňom vývoja organizmu. Takéto systémy umožňujú sledovať a študovať vývoj ekosystému komplexne. Pozorovať súčasne stav prostredia, aj stavy jednotlivých organizmov, určiť vývojové postupnosti reťazcov v prostredí aj v jednotlivých organizmoch.



**Obr. 2:** Ekogramatický systém

Zaujímavé výsledky sme napríklad získali pri štúdiu monokultúr. Sú to ekogramatické systémy, s viacnásobným výskytom organizmov toho istého typu. Všetky organizmy sú na začiatku činnosti v identickom stave. Činnosť ktoréhokoľvek ekogramatického systému je možné nahradiť aktivitami vhodnej monokultúry v prípade, že v prostredí nájdeme vhodný inicializačný stav, alebo keď takýto stav (reťazec) do prostredia pridáme ako počiatkový stav. Výsledky o ekogramatických systémoch sa v prevažnej miere dotýkajú ich výpočtovej sily (Kelemenová 2004), (Langer 2005-2008). Z aplikácii môžeme uviesť modelovanie komunity robotov, simulovanie evolučných algoritmov ekogramatickými systémami (Dediu, Grando 2005), ekogramatické systémy modelujúce kultúrne zmeny

(Csuhaj-Varjú, Jiménez-López 1998, 1999) ako aj skúmanie súvislostí medzi umelými neurónovými sieťami a ekogramatickými systémami (Sosík 1996).

### 3 Membránové systémy

Veľmi bohatú široko rozpracovanú oblasť inšpirovanú biochemickými procesmi v bunkách tvoria membránové systémy, skrátene P systémy.

Membránové systémy boli časopisecky predstavené v (Păun 2000). Prudký nástup výskumu v tejto oblasti o dva roky viedol k monografii (Păun 2002). Pár rokov neskôr kvalitu a závažnosť výskumu P systémov zvyrazňuje vydanie Oxfordského handbooku (Păun, Rozenberg, Salomaa 2009). Aktuálne informácie o membránových systémoch nájdete na stránke <http://ppage.psyste.ms.eu/>. Záujemcom o aplikácie P systémov odporúčame publikáciu (Frisco a kol. 2014).

Model P systémov vychádza z membránových štruktúr, z architektúry a fungovania živých buniek. Reflektuje organizovanie buniek v tkanivách, orgánoch alebo aj štruktúry ako kolónie buniek. Jedným zo základných cieľov pri tvorbe tohto modelu bolo vytypovať bunecné aktivity vhodné na realizáciu výpočtov. Membránové výpočty sú distribuované a paralelné, spracovávajú multimnožiny objektov lokalizované vo vytypovaných štruktúrach zložených z membránami ohraničených oblastí, pomocou evolučných pravidiel. Podstatnú úlohu v modeli hrá vzájomná komunikácia medzi susediacimi membránovými oblasťami a komunikácia s prostredím. Na základe týchto ideí a množstva biologických podnetov vznikli rôzne typy membránových modelov ako P automaty, P kolónie, páliace P systémy,... (Gheorghe a kol. 2013). Ako ilustráciu uvedieme ďalšom pôvodný základný model P systému a P kolónie.

#### 3.1 Základný model P systému

Pôvodný model P systému má membrány hierarchicky usporiadané do stromovej štruktúry. V jednotlivých oblastiach určených membránami sú umiestnené objekty, reprezentované symbolmi, alebo reťazcami symbolov. Vyvíjajú sa na základe evolučných pravidiel, priradených k jednotlivým oblastiam. Okrem zmeny objektov určujú pravidlá aj cieľovú membránu (oblasť), do ktorej bude umiestnený vytvorený objekt. Použitie evolučných pravidiel vzhľadom k jednotlivým objektom prebieha paralelne a ich aplikácia môže regulovaná reláciami priority. Objekty sa môžu vyvíjať nezávisle alebo v spolupráci s ostatnými objektmi. Špeciálnu triedu objektov pri tom tvoria katalyzátory. Ich prítomnosť umožňuje vývoj iných objektov, sami však zmene nepodliehajú. Objekty môžu prechádzať cez membrány v oboch smeroch, smerom von alebo dovnútra vnorenej oblasti.

Membrány sa môžu tiež rozpustiť. Pritom sa všetky objekty z rozpustenej membrány stanú objektmi membrány umiestnenej bezprostredne nad pôvodnou membránou a evolučné pravidlá rozpustenej membrány zanikajú. Vonkajšia membrána (obal) systému sa rozpustiť nemôže. Vývoj membránového systému zapisujeme postupnosťou konfigurácií, tj. aktuálnych obsahov jednotlivých membrán systému. Počiatočná konfigurácia a spôsob používania evolučných pravidiel určujú vývoj membránového systému, tj. výpočet realizovaný membránovým systémom. Výpočet je ukončený vtedy, keď pre ďalší výpočet nie je možné použiť žiadne pravidlo systému. Výstup výpočtu je daný obsahom výstupnej membrány alebo obsahom prostredia.

Ilustrujeme na jednoduchom príklade činnosť membránového systému. Systém obsahuje dve do seba zapadajúce membrány. Na začiatku výpočtu obsahuje vonkajšia membrána objekty  $A$  a  $B$  a na ich zmenu používa tri pravidlá:

$$A \rightarrow (aAb, \text{dnu}), \quad A \rightarrow (ab, \text{von}), \quad B \rightarrow (cc, \text{tu})$$

Prvé pravidlo nahradí symbol  $A$  symbolmi  $aAb$  a celý reťazec umiestni do vnútornej membrány. Druhé pravidlo nahradí symbol  $A$  symbolmi  $ab$  a vysunie nový reťazec do vonkajšieho prostredia. Tretie pravidlo zmení  $B$  v tejto membráne na  $cc$ .

Vnútorná membrána na začiatku výpočtu neobsahuje žiadny objekt a pracuje s jedným pravidlom:

$$B \rightarrow (Bc, \text{von}),$$

ktoré nahradí symbol  $B$  reťazcom  $cB$  a celý reťazec umiestni do vonkajšej membrány. Systém pracuje sekvenčne, na každom kroku používajú membrány najviac jedno pravidlo. Výpočet končí s reťazcom obsahujúcim rovnaký počet písmen  $a, b, c$  vo vonkajšom prostredí. Dĺžka vytvoreného reťazca závisí od okamihu, kedy vonkajšia membrána využije pravidlo  $A \rightarrow (ab, \text{von})$ .

Výpočet prebieha napríklad takto:

$$(\quad, AB, \quad), (\quad, \quad, aAbB), (\quad, aAbBc, \quad),$$

$$(\quad, \quad, aaAbbBc), (\quad, aaAbbccc, \quad),$$

$$(aaabbccccc, \quad, \quad).$$

Trojice reprezentujú obsahy vonkajšieho prostredia, vonkajšej membrány a vnútornej membrány.

### 3.2 P kolónie

P kolónie sú tvorené systémom membrán komunikujúcich priamo so svojím pasívnym prostredím. (Kelemen a kol. 2004).

Objekty v P kolónii môžu reprezentovať napríklad atóm, molekulu alebo makromolekulu. Môžu sa zhlukovať a vytvárať aktívne entity v oblasti ohraničenej membránou, alebo sa nachádzajú v pasívnom prostredí. Každá membrána obsahuje

fixovaný počet objektov. Prostredie je zdrojom dostatočného počtu základných objektov potrebných na prevedenie výpočtu. Činnosť membrán je riadená programami. Programy korešponujú s najjednoduchšími (biochemickými) reakciami, ktoré prebiehajú v rámci objektov a vytvárajú nové objekty. Programy obsahujú jedno pravidlo pre každý objekt vnútri membrány, každé pravidlo prepisuje iný objekt membrány. P kolónie využívajú dva typy pravidiel. Evolučné pravidlá, ktoré spôsobujú zmenu objektu a komunikačné pravidlá, ktoré zabezpečujú výmenu objektov medzi prostredím a membránou. Membránové oblasti P kolónie môžu mať k dispozícii niekoľko programov. P kolónie začínajú výpočet so špeciálnymi objektmi v každej membráne a v prostredí. Počet týchto objektov v membránach je rovnaký a pevne stanovený. Výsledok výpočtu je určený počtom sledovaných symbolov v prostredí na konci výpočtu, keď žiadna membrána nemôže realizovať žiadny zo svojich programov. Štúdium kolónií je zamerané na ich generatívnu silu, v závislosti na počte membrán, počte objektov v membránach a počte programov. Prehľad skúmaných problémov a dosiahnutých výsledkov o P kolóniách poskytuje (Kelemenová 2009) a monografia (Cienciala 2015).

## 4 Morfogenetické systémy

Zavedenie M systémov sleduje cieľ vytvoriť bio-inšpirovaný výpočtový model, ktorý okrem schopnosti počítať v Turingovom zmysle, „sníma“ svoje fyzické prostredie a interaguje s ním a je tiež schopný samomodifikácie a evolúcie. Morfogenetické systémy, predstavili autori na konferencii o nekonvenčných výpočtoch roku 2017 (Sosík a kol. 2017). Model vychádza z filozofie membránových systémov a rozširuje ho o možnosť pracovať s homeostázou a samo-reprodukciou. Podstatný rozdiel od predchádzajúcich modelov spočíva tiež v tom, že M systémy reflektujú geometriu objektov. Umožňujú definovať rozmer, tvar a vzájomnú polohu jednotlivých prvkov v priestore. Súčasný stav poznania M systémov je určený publikáciami (Sosík a kol. 2017, 2018), v ktorých je zavedená a motivovaná štruktúra M systémov, stanovená ich výpočtová sila, zostrojený simulátor M systémov a tiež reprezentovaný vývoj rastlín pomocou M systémov.

### Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol s podporou Ministerstva školstva, mládeže a telovýchovy ČR v rámci Národného programu udržiteľnosti (NPU II), projekt IT4Innovations Excellence in Science - LQ1602.

## Literatúra

- Aghamirmohammadali, S.M.A., Boozarjomehry, R.B., Abdekhodaie, M. (2018) *Modelling of retinal vasculature based on genetically tuned parametric L-system* <https://doi.org/10.1098/rsos.171639>
- Cienciala, L. (2015). *Membránové agenty (O variantách P kolonií)*. Filozoficko-přírodovědecká fakulta, Slezská univerzita v Opavě.
- Cienciala, L. a Ciencialová, L. (2018). Some new results of P colonies with bounded parameters. *Natural Computing*. 17(2): 321-332.
- Cienciala, L. a Kelemenová, A. (2007) Život ve světě symbolů: počítání pomocí membrán. V zborníku *Myseľ, inteligencia a život*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, str. 369-388
- Ciencialová, L. (2019). APCol Systems with Agent Creation. In *Membrane Computing*. CMC 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11399. Springer, Cham. pp. 84-94
- Ciencialová, L., Cienciala, L. a Sosík, P. (2018). Generalized P colonies with Passive Environment, *Theoretical Computer Science*. 724: 61-68.
- Ciencialová, L., Csuhaaj-Varjú, E., Vaszil G., a Cienciala, L. (2019). APCol Systems with Verifier Agents. In *Membrane Computing*. CMC Lecture Notes in Computer Science, vol 11399. Springer. pp. 95-107
- McCormack, J. (2003) *The Application of L-systems and Developmental Models to Computer Art, Animation, and Music Synthesis*. A Thesis. Monash University, Clayton, Australia.
- Csuhaaj-Varjú, E., Kelemen, J., Păun, G. a Dassow, J. (1994). *Grammar Systems: A Grammatical Approach to Distribution and Cooperation*. Gordon and Breach.
- Csuhaaj-Varjú, E. a Jiménez-López, M.D. (1998). Cultural eco-grammar systems: A multi-agent system for cultural change. *Silesian Univ.* pp. 165-182.
- Csuhaaj-Varjú, E., Jiménez-López, M.D. a Martín-Vide, C. (1999). Pragmatics and Eco-Rewriting Systems. In *Grammatical models of multi-agent systems*. pp. 262-283.
- Csuhaaj-Varjú, E., Kelemen, J., Kelemenová, A. a Paun, G. (1994). Eco (grammar) systems. A preview. In: *Proc. 12th European Meeting on Cybernetics and System Research*, Vienna, pp. 941-948
- Csuhaaj-Varjú, E., Kelemen, J., Kelemenová, A. a Paun, G. (1997). A grammatical framework for life-like interactions. *Artificial life*. 3(1): 1-28.
- Csuhaaj-Varjú, E., Kelemen, J., Kelemenová, A., Păun, G. a Vaszil, G. (2006). Cells in environment: P Colonies. *Journal of Multi-Valued Logic*. pp. 201-215
- Dediu, A.H., a Grando, M.A. (2005). Simulating Evolutionary Algorithms with Eco-grammar Systems. In: *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach*. LNCS 3562, pp. 112-121.
- Enguix, G.B. a Jiménez López, M.D. (2006) Linguistic Membrane Systems and Applications. In: *Applications of Membrane Computing*. Natural Computing Series. Springer. pp 347-388.
- Farmer, J. D. a Bellin, A. (1991). Artificial life – the coming evolution. In: *Artificial Life II, Proc. Workshop on Artificial Life* Addison-Wesley, pp. 815-840
- Frisco, P., Gheorghe, M., a Perez-Jimenez, M. (2014). *Applications of Membrane Computing in Systems and Synthetic Biology*, Springer-Verlag.
- Gexiang, Z., Pérez-Jiménez, M. J. a Marian, G. (2017). *Real-life Applications with Membrane Computing*. Springer.
- Gheorghe, M., Paun, G., Pérez-Jiménez, M.J. a Rozenberg, G. (2013) Frontiers of membrane computing: Open problems and research topics. *Intern. J. Found. Computer Sci.*: 171-249.
- Herman, G. T., a Rozenberg, G. (1975). *Developmental Systems and Languages*. North-Holland.
- Jiménez-López, M. D. (1999). Cultural Eco-Grammar Systems: Agents between Choice and Imposition. A Preview Agents Everywhere, In: *Agents Everywhere*. Springer, pp. 181–187.
- Kari, L., Rozenberg, G., a Salomaa, A. (1997). L systems. In: *Handbook of formal languages*. Vol 1. pp. 253-324
- Kaandorp, J. A. a Kubler, J. E. (2001). *The Algorithmic Beauty of Seaweeds, Sponges and Corals*. Springer.
- Kelemen, J. a Kelemenová, A. (2001). Život ve světě symbolů: Úvod do jazykově-teoretického studia životnosti. *Kognice a umělý život I*. Slezská univerzita v Opavě. str. 101-118.
- Kelemen, J., Kelemenová, A. a Păun, G. (2004). The power of cooperation in a bio-chemically inspired computing model: Preview of P colonies: In: *Workshop and Tutorial Proceedings, 9<sup>th</sup> Interna-*

- tional Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, ALIFE IX*, pp. 82-86
- Kelemenová, A. (2004). Eco-grammar systems. In: *Formal Languages and Applications*. Springer, pp. 311-322
- Kelemenová, A. (2005). Lindenmayerove systémy a ich tvorca v spomienkach, faktoch a citátoch. V zborníku *Kognice a umělý život V*. str. 235-250 tiež v zborníku *Mysel', inteligencia a život*. STU Bratislava, str. 399-414
- Kelemenová, A. (2006). Kolónie gramatik a membránových štruktúr. V zborníku *Kognice a umělý život VI*. Slezská univerzita v Opavě. str. 205-211
- Kelemenová, A. (2009). P Colonies. In: *The Oxford Handbook of Membrane Computing*, Oxford University Press, pp. 584-593
- Kelemenová, A. (2010). Život vo svete symbolov na KUŽ I-X. V zborníku *Kognice a Umělý život X*, str. 181-190.
- Kelemenová, A. a Bartík, T. (2008) Monocultures in eco-grammar systems. In: *Automata and Formal Language*. AFL 2008, MTA SZTAKI. pp. 208-219
- Kelemenová, A. a Vavrečková, Š. (2011) Generative Power of Eco-Colonies. In *Computation, Cooperation, and Life*. pp. 107-121
- Kókai G., Tóth Z., Ványi R. (1999) Modelling Blood Vessels of the Eye with Parametric L-Systems Using Evolutionary Algorithms. In: *Artificial Intelligence in Medicine*. Lecture Notes in Computer Science, 1620. Springer. pp 433-442
- Langer, M. (2005) Agenty umístěné v prostředí ekogramatických systémů – Poziční ekogramatické systémy. V zborníku *Kognice a umělý život V* Slezská univerzita v Opavě. str. 339-350
- Langer, M. (2006) Generativní síla pozičních ekogramatických systémů. V zborníku *Kognice a umělý život VI* Slezská univerzita v Opavě. str. 259-264
- Langer, M. (2007) Poziční ekogramatické systémy a (řízené) pure gramatiky. V zborníku *Kognice a umělý život VII* Slezská univerzita v Opavě. str. 215-219
- Langer, M. (2008) Hierarchie pozičních ekogramatických systémů. V zborníku *Kognice a umělý život VIII*. Slezská univerzita v Opavě, str. 201-204
- Lindenmayer, A. (1968). Mathematical model of cellular interactions in the development I, II. *J. Theor. Biol.* 18: 280-299, 300-315
- Manousakis, S. (2006) *Musical L-Systems* Master's Thesis - Sonology The Royal Conservatory, The Hague
- Meinhardt, H. (1995). *Algorithmic beauty the of Sea Shells*. Springer.
- Metta, V. P. a Kelemenová, A. (2014). Universality of Spiking Neural P Systems with Anti-spikes. *TAMC 2014, Chennai, India*, Lecture Notes in Computer Science vol. 8402. Springer. pp. 352-365
- Metta, V. P. a Kelemenová, A. (2015). Sorting Using Spiking Neural P Systems with Anti-Spikes and Rules on Synapses. In: *Membrane computing*. LNCS\_9504, pp. 290-303
- Păun, G. (2000). Computing with membranes, *Journal of Computer and System Sciences*. 61(1): 108-143
- Păun, G. (2002). *Membrane Computing: An Introduction*. Springer-Verlag.
- Păun, G., Rozenberg, G., a Salomaa, A. (2009). *Oxford Handbook of Membrane Computing*, Oxford University Press.
- Prusinkiewicz, P. a Lindenmayer, A. (1990). *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer.
- Rozenberg, G. a Salomaa, A. (1980). *The Mathematical Theory of L Systems*. Academic Press.
- Sosík, P. (1996). On eco-grammar systems and artificial neural networks. *Computers and Artificial Intelligence*. 15: 247-264
- Sosík, P., Smolka, V., Drastík, J., Moore, T. a Garzon, M. (2017). Morphogenetic and homeostatic self-assembled systems. In *Unconventional Computation and Natural Computation, UCNC 2017*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10240, pp. 144-159.
- Sosík, P., Smolka, V., Drastík, J., Bradík, J. a Garzon, M. (2017). On the robust power of morphogenetic systems for time bounded computation. In *Proceedings of the 18th International Conference of Membrane Computing (CMC18)*, pp. 333-358.
- Sosík, P., Smolka, V., Drastík, J., Bradík, J. a Garzon, M. (2018). Modeling plant development with M systems. In *Membrane Computing (CMC19)*, pp. 201-214.
- Zhang, G., Perez-Jimenez, M. a Gheorghe, M. (2017). *Real-life Applications with Membrane Computing*, Springer-Verlag.