

Finding of Groundwater Recharge, Transit and Discharge Areas

Pazemes ūdens plūsmu barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu robežu noteikšana

Aivars Spalviņš¹, Kaspars Krauklis², Inta Lāce³
¹⁻³Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Kopsavilkums – Pazemes ūdens horizontos var definēt barošanas, atslodzes un tranzīta apgabalus, kuru eksistenci nosaka zemes virsmas reljefs un hidrogrāfiskais tīkls (upes, ezeri, jūra). Tradicionāli par barošanas apgabaliem uzskata augstienes, kurās vienlaicīgi ir infiltrācijas plūsmas un pazemes ūdens līmeņu maksimumi. Arī Latvijas hidroģeoloģiskajā modelī LAMO tika izmantota šāda metode. LAMO dod reģionāla mēroga rezultātus telpiskā hidroģeoloģiskā sistēmā, kurā pat vienā ūdens horizontā var eksistēt būtiski atšķirīgi hidroģeoloģiskie apstākļi. Šī iemesla dēļ tradicionālā metode dod neviennozīmīgus un pat kļūdainus rezultātus. Izveidota jauna metode, kura viennozīmīgi atrisina barošanas, atslodzes un tranzīta apgabalu identifikācijas problēmu. Metode izmanto datus par pazemes vertikālo un horizontālo ūdens plūsmu ātrumiem. Metode ir rīks, kurš var dot jaunas zināšanas par Latvijas pazemes ūdens sistēmu.

Atslēgas vārdi – Hidroģeoloģiskā modelēšana, LAMO, pazemes ūdensobjekta barošanas, tranzīta un atslodzes apgabali.

I. IEVADS

Latvijas hidroģeoloģiskais modelis LAMO reģionālā mērogā apraksta procesus pazemes ūdens aktīvajā zonā [1] un ir īstenots licenzētas programmatūras “Groundwater Vistas” (GV) vidē [2]. Modelī bija jānosaka pazemes ūdensobjektu barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu robežas. Šī uzdevuma izpratnei nepieciešama informācija par ģeoloģisko vidi un tās pazemes ūdens plūsmām

Izmantojot galīgo starpību metodi, ģeoloģiskā vide LAMO ir aproksimēta ar 3D režģi, kuru veido paralelipēda tipa šūnas $h \times h \times m$ (h – plaknes aproksimācijas solis, 250 metri; m – mainīgs ģeoloģiskā slāņa biezums).

Ģeoloģisko vidi modelī veido 27 slāņi. Ir divu tipu slāņi, kuru loma pazemes ūdens sistēmā ir ļoti atšķirīga: ūdens horizonti ar filtrācijas koeficientu $k = 1 - 50$, m/dnn, un sprosts slāņi, kuriem $k = 10^{-2} - 10^{-6}$, m/dnn. Ūdens horizonti ir dzeramā ūdens avoti. Sprosts slāņi nodrošina telpisku pazemes ūdens kustību ģeoloģiskajā vidē.

Ūdens horizontos eksistē mainīgas vertikālās Q_z un horizontālās Q_{xy} pazemes ūdens plūsmas. Sprosts slāņos $Q_{xy} \sim 0$, $Q_z \sim \text{const}$. Šī iemesla dēļ barošanās, tranzīta un atslodzes apgabalus var noteikt tikai ūdens horizontiem.

Barošanās un tranzīta apgabalos $Q_z > 0$; atslodzes apgabalā $Q_z < 0$, un tā robežu veido $Q_z = 0$ līnija. Tranzīta apgabali savieno barošanas un atslodzes apgabalus. Barošanas apgabala

robežas atrašana nav triviāls uzdevums, tāpēc ka apgabalā vienlaicīgi ir Q_{xy} un Q_z plūsmas, bet pazīme $Q_z > 0$ nav pietiekama šīs robežas viennozīmīgai noteikšanai.

Rakstā piedāvāta jauna metode, kura izmanto plūsmas Q_{xy} un Q_z barošanas, tranzīta un tranzīta apgabalu robežu noteikšanai. Iztirzāti šobrīd izmantotās metodes trūkumi.

II. BAROŠANAS APGABALA NOTEIKŠANA AR TRADICIONĀLO METODI

Tradicionāli par barošanas apgabaliem uzskata augstienes, jo tur vienlaicīgi eksistē plūsmas Q_z un pazemes ūdens līmeņu φ maksimumi. Līmeņus φ šūnu $h \times h \times m$ centros aprēķina GV kā 61.56×10^6 kārtas (mezglu skaits LAMO 3D režģī) algebrisko vienādojumu sistēmas atrisinājumu:

$$A \varphi = \beta - G \psi, \quad (1)$$

kur A – ģeoloģiskās vides ūdensvadāmību matrica, kura izmanto datus par ģeoloģisko slāņu virsmām (z kartes) un filtrācijas koeficientiem (k kartes);

β – pazemes plūsmu robežnoteikumu vektors;

ψ – pazemes ūdens līmeņu robežnoteikumu vektors;

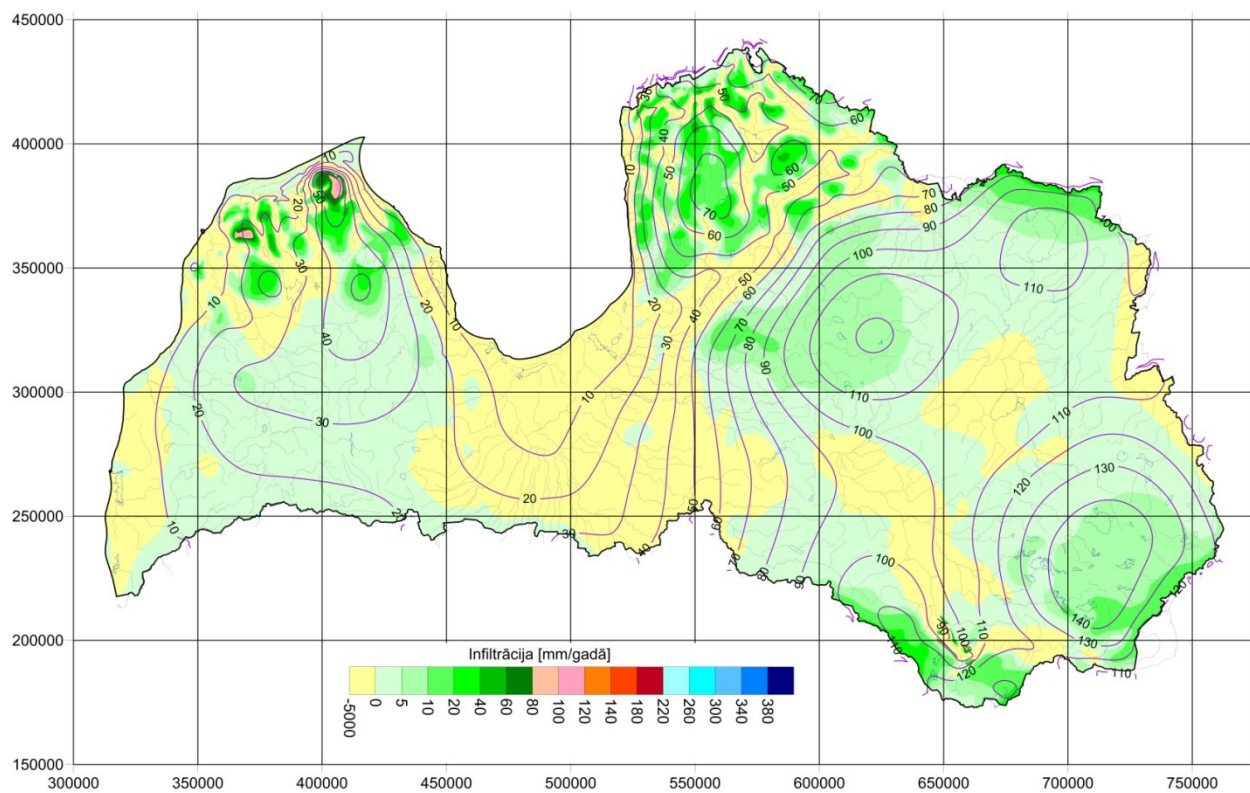
$G - \psi$ noteikumu saites matrica ar ģeoloģisko vidi.

Atrisinot sistēmu (1), aprēķina plūsmas katras elementārās šūnas sešās virsmas plaknēs: augšas un apakšas $h \times h$ plaknēs vertikālās plūsmas Q_z , m³/dnn, ar ātrumu $v_z = Q_z/h^2$, m/dnn, un horizontālās plūsmas sānu plaknēs $h \times m$ Q_x un Q_y , m³/dnn, ar ātrumiem $v_x = Q_x/(h \times m)$ un $v_y = Q_y/(h \times m)$, m/dnn. Plūsmas Q_x , Q_y , Q_z izmanto bilances aprēķinos, bet ātrumi v_x , v_y , v_z ir būtiski ūdens daļiņu trasēšanas programmas MODPATH darbībai [3]. Šie ātrumi šūnu ieejas plaknēs ir brīvi pieejami modelētājam.

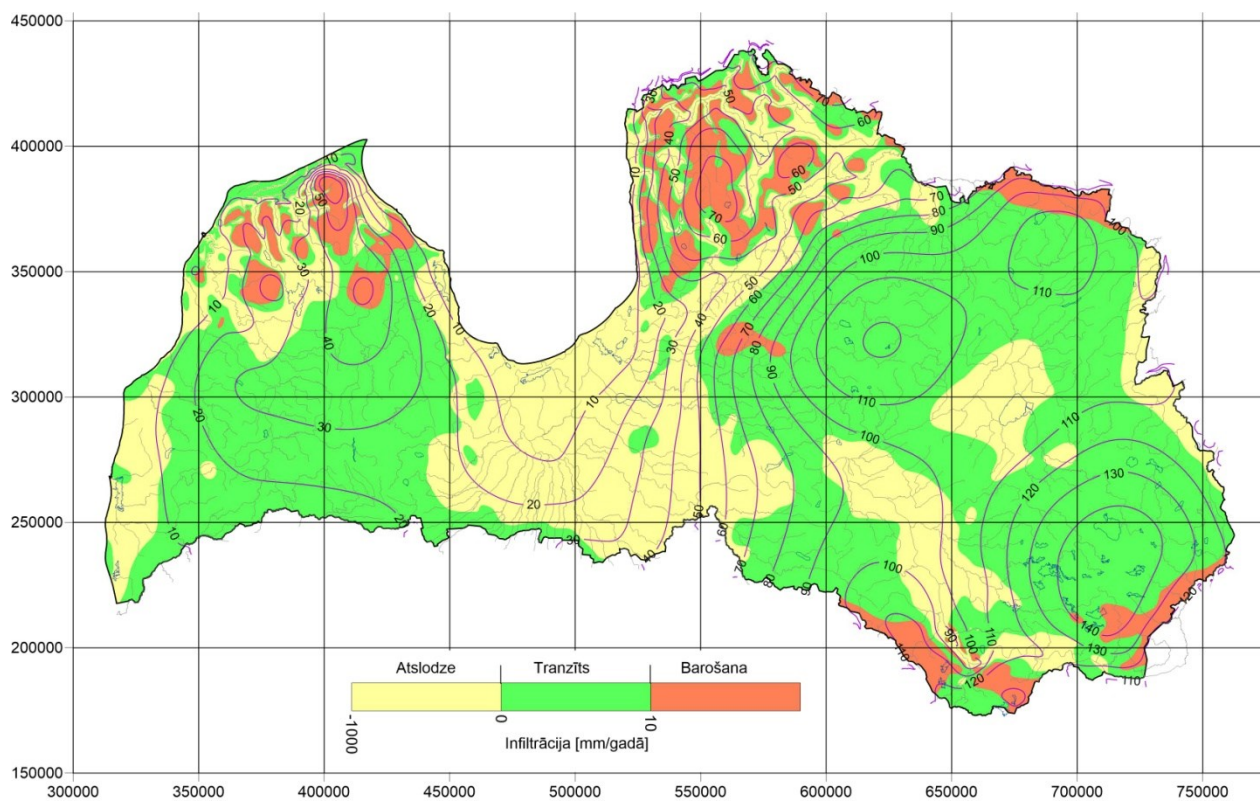
Tradicionālā barošanas tranzīta un atslodzes apgabala noteikšanas metode izmanto ātrumu v_z šūnas augšpusē infiltrācijas karšu iegūšanai:

$$\text{inf, mm/gadā,} = 365 \times 10^3 v_z. \quad (2)$$

Barošanas apgabalu noteikšanai metode izmanto kartes, kurās savietoti infiltrācijas, mm/gadā, un līmeņu φ , m vjl., sadalījumi.



1. att. Infiltrācijas plūsma un ūdens līmeņi D2ar horizontam (*LAMO 25. slānim*).



2. att. Pazemes ūdens barošanas, tranzīta un atslodzes apgabali D2ar horizontam (*LAMO 25. slānim*) pēc tradicionālās metodes.

Šādas kartes piemērs skatāms 1. attēlā ūdens horizontam D2ar (*LAMO* 25. slānis), kurš ir Latvijas aktīvās pazemes ūdeņu zonas apakšējā daļa [4]. Slānī eksistē būtiski atšķirīgi infiltrācijas apstākļi tā seklajā ziemeļu un dziļajās vidus un dienvidu daļās. Tāpēc tradicionālā metode nav identificējusi barošanas apgabalus D2ar slānī zem Vidzemes un Latgales augstienēm, kurās $inf < 10$ mm/gadā (skatīt 2. attēlu).

Tradicionālās metodes galvenais trūkums ir nepieciešamība katram ūdens horizontam un pat tā daļām izmantot atšķirīgus lokālo infiltrācijas maksimumu sliekšņus. Ja hidrogeoloģiskie apstākļi horizontā ir būtiski atšķirīgi (kā D2ar), tad metode visus lokālos barošanas apgabalus nespēj atrast.

Tāpēc, ka tiek izmantots tikai ātrums v_z slāņu augšpusē, tradicionālā metode barošanas apgabalu "atrod" arī neeksistējošā slānī (*LAMO* tā biezums $m = 0,02$ m) un sprostslānī, jo šajos slāņos eksistē savietoti ūdens līmeņu ϕ un infiltrācijas plūsmu maksimumi.

Sprostslāņos un neeksistējošos slāņos plūsmu ātrumi v_{zi} un v_{zi+1} i -tā slāņa augšpusē un apakšpusē ir vienādi. Ja izmanto šo ātrumu starpību Δ_i :

$$\Delta_i = v_{zi} - v_{zi+1}, \quad (3)$$

tad šādos slāņos $\Delta_i = 0$, t. i., tiem nevar definēt barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalus.

Formula (3) i -tajam *LAMO* slānim dod vertikālās plūsmas ātrumu Δ_i , kurš ir proporcionāls rezultējošajai vertikālajai pazemes ūdens plūsmai Q_{rezi} :

$$Q_{rezi} = Q_{zi} - Q_{zi+1} = h^2 \Delta_i, \quad (4)$$

kuru izmanto *GV* rīks "Mass balance" pazemes ūdens plūsmu lokālās bilances aprēķinam [4]. Ūdens horizontiem Q_{rez} nav vienāda ar nulli un ir plūsma, kura baro horizontu. Tāpēc Δ_i izmantošana ir būtiska viennozīmīgas barošanas apgabala robežas atrašanai.

III. UZLABOTĀ BAROŠANAS APGABALU MEKLĒŠANAS METODE

Uzlabotajai metodei i -tajam ūdens horizontam barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu identifikācijai izmantota bezdimensionāla funkcija:

$$r_i = 250 \frac{\Delta_i}{k_i \text{grad}\phi_i}; \quad k_i \text{grad}\phi_i = v_{xyi} = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}. \quad (5)$$

kur Δ_i – rezultējošais vertikālās plūsmas ātrums formulā (3);

v_{xyi} – horizontālās plūsmas rezultējošais ātrums;

v_{xi} , v_{yi} – ātrumi elementārās šūnas ieejas sānu plaknēs;

k_i , ϕ_i – filtrācijas koeficientu un ūdens līmeņu sadalījumi;

250 – empīriskā konstante.

Barošanas, tranzīta un atslodzes apgabaliem atbilst funkcijas r vērtības: $r \geq 1$ – barošana; $1 > r > 0$ – tranzīts; $r < 0$ – atslodze. Atslodzes apgabalā var noteikt "negatīvā" tranzīta zonu ($-1 < r < 0$) un apgabala centrālo daļu, kurā $r < -1$. Robežu $r = 1$ un $r = -1$ novietojumu nosaka empīriskās konstantes izvēle. Ja horizonts neeksistē, $r = 0$.

Formulā (5) horizontālais ātrums v_{xy} aizstāts ar izteiksmi $k_i \text{grad}\phi_i$ šādu apsvērumu dēļ:

- var veikt aprēķinu arī tad, ja nav iegūstami ātrumi v_x un v_y (slāņos ar noteikumu ψ);
- grad ϕ_i aprēķina precīzāk ar *SURFER* [5] laukumā $2h \times 2h$, bet *GV* dod v_x un v_y laukumā $h \times h$;
- grad ϕ_i samazinās ūdens līmeņa ϕ maksimuma un minimuma vietās, un tāpēc barošanas un atslodzes apgabalos veidojas funkcijas r lokālie ekstrēmumi [6].

Funkcija $r = 0$ ūdens horizonta neeksistējošā daļā ($m = 0$), kur $\Delta_i = 0$ un ātrums $|v_{xy}| > 0$ nav atkarīga no horizonta biezuma m . Tāpēc formulu (5) var izmantot horizontiem, kuri nav nepārtraukti (kā lielākā daļa *LAMO* slāņu).

Zem lieliem ezeriem grad $\phi \sim 0$, tāpēc šeit formula (5) dod lielas r vērtības.

Izteiksmi (5) nedrīkst izmantot sprostsliņos, jo tiem $\Delta_i \sim 0$; $k \text{grad}\phi \sim 0$, t. i., rodas nenoteiktība $0/0$.

Uzlabotās metodes izmantošanas rezultāts horizontam D2ar skatāms 3. attēlā, kur ar krāsu skalas palīdzību dots detalizēts funkcijas r attēlojums barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalos:

- ir atrasti visi horizonta lokālie barošanas apgabali Latvijas augstienēs;
- pazemes procesu intensitāte visos trijos apgabalos ir mainīga, par ko liecina r raksturs;
- atslodzes apgabala robežas 2. un 3. attēlā ir atšķirīgas, jo $r = 0$ līnijas novietojumu 3. attēlā nosaka ātrums $\Delta_i = 0$, bet 2. attēlā – ātrums $v_z = 0$.

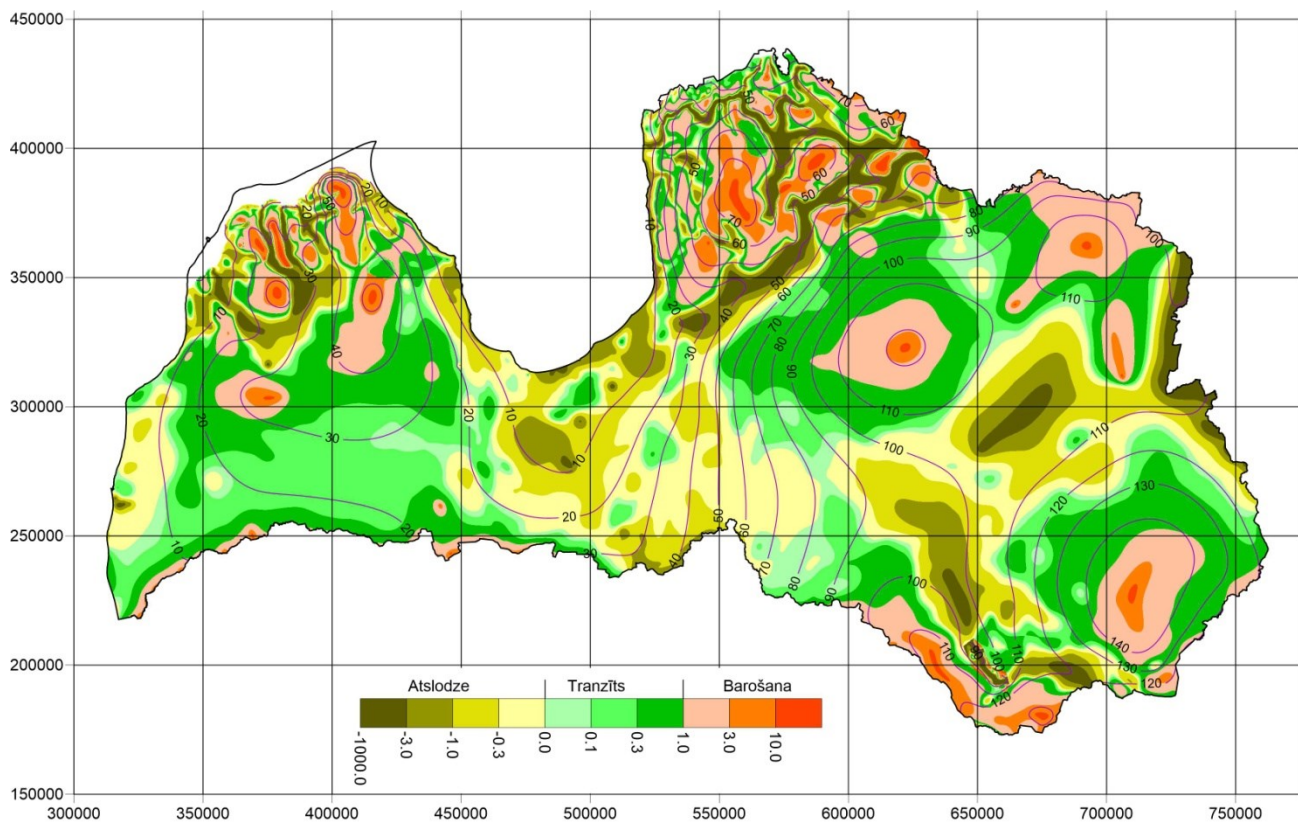
Atšķirībā no tradicionālās metodes uzlabotā metode tieši neizmanto datus par infiltrācijas plūsmas un līmeņu ϕ maksimumiem, jo to ietekmi nosaka attiecība Δ_i / v_{xyi} formulā (5). Tomēr 3. attēla kartē parādītas arī ϕ izolīnijas, jo tās modelētājam palīdz izprast barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu noteikšanas rezultātu.

Uzlabotā metode sekmīgi darbojas visos ūdens horizontos, un nav nepieciešama empīriskās konstantes izmaiņa. Jauno metodi varēs izmantot kā rīku telpiskai barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu robežu telpisku izmaiņu pētījumiem *LAMO* vidē.

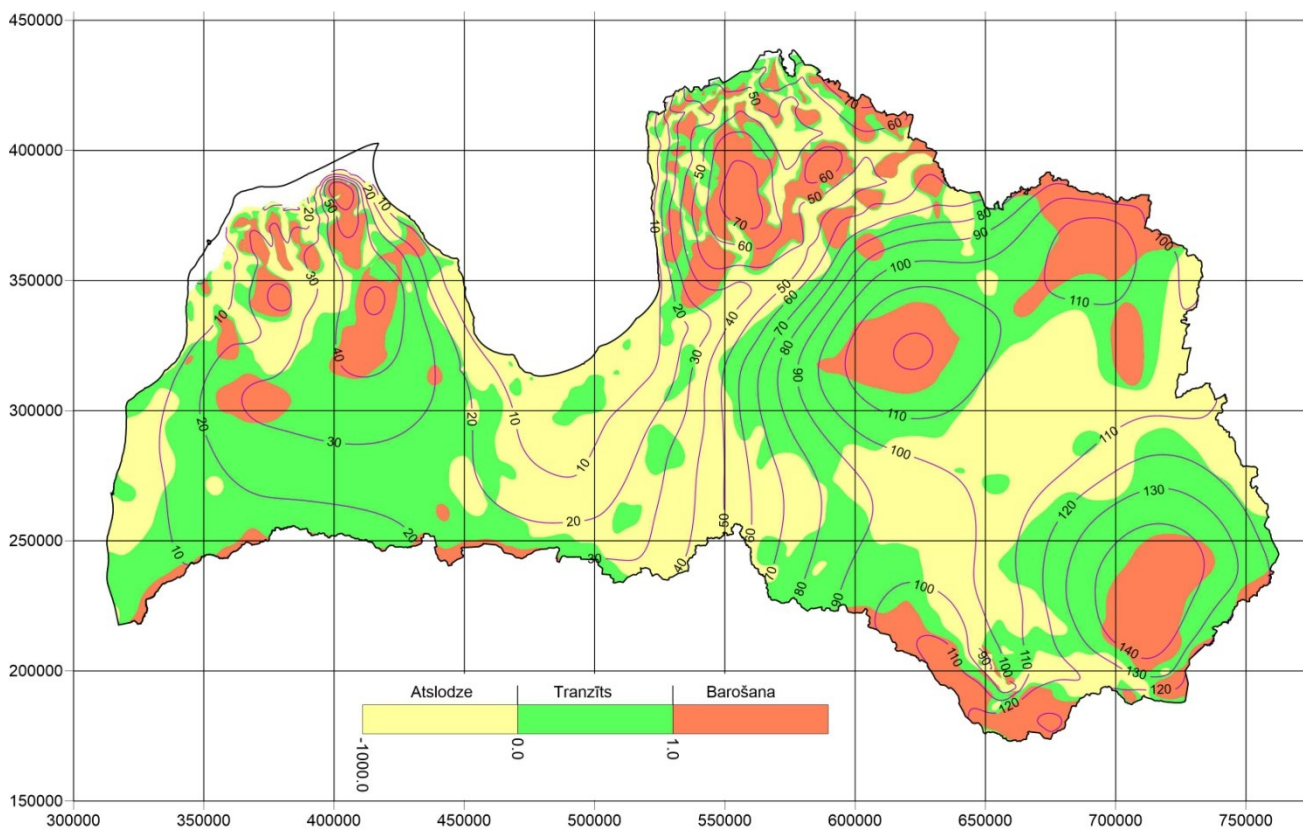
Metode ar detalizētu r gradāciju ir lietota *LAMO* diagnostikai un modeļa sākuma datu koriģēšanai.

Ja aprobežojas ar barošanas, tranzīta un atslodzes apgabalu robežu noteikšanu, tad kartē tiek attēlotas trīs zonas, kurās $r > 1$; $1 > r > 0$ un $r < 0$. Tad 3. attēla karte iegūst šo apgabalu tradicionālo attēlojumu (skatīt 4. attēlu.).

Jaunās metodes pirmie rezultāti apstiprina, ka pazemes ūdens plūsmu barošana, tranzīts un atslodze ir atkarīgi no virsmas reljefa un hidrogrāfiskā tīkla ietekmes līdz pat aktīvās pazemes ūdens zonas apakšējai daļai. Šāda īpašība nepiemīt upju baseinu sateces apgabaliem, kuru robežas saglabājās tikai kvartāra slāņos [7], [8].



3. att. Atslodzes, tranzīta un barošanas apgabali D2ar horizontam (*LAMO 25.* slānim) ar detalizētu funkcijas r attēlojumu.



4. att. Atslodzes, tranzīta un barošanas apgabali D2ar horizontam (*LAMO 25.* slānim) ar tradicionālu funkcijas r attēlojumu.

IV. SECINĀJUMI

Izstrādāta jauna metode pazemes ūdens plūsmu barošanas, tranzīta un atslodzes apgabala robežu noteikšanai.

Metode pielietota Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa *LAMO* datu apstrādāšanai. Pirmie rezultāti liecina, ka metodi varēs lietot kā rīku jaunu zināšanu iegūšanai par procesiem Latvijas pazemes ūdens sistēmā.

Metode sekmīgi izmantota *LAMO* diagnostikai un modeļa sākuma datu koriģēšanai.

Metode izstrādāta, īstenojot Valsts pētījumu programmu "EVIDEnT".

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] A. Spalviņš "Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa izveidošana Rīgas Tehniskajā universitātē," *Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskais žurnāls Datamodelēšana un robežproblēmas*, 55. sēj., 5.–11. lpp., 2016.
- [2] Environmental Simulations, Inc. *Groundwater Vistas. Version 6, Guide to using*, 2011.
- [3] D. W. Pollok, *User's Guide for MODPATH/MODPATH-Plot, Version 3. A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the US Geological Survey finite-difference groundwater flow model*, U.S. Geological survey, Sep. 1994 [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/of/1994/0464/report.pdf>
- [4] Projekta "Pazemes ūdensobjektu kartēšana Gaujas upju baseina apgabalā" materiāli, Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 12 lpp., 2013. 49 kartes, 6 tabulas, [Online]. Available: <http://www.emc.rtu.lv/>
- [5] Golden Software, Inc., *SURFER-13 for Windows, Users manual, Guide to Using*, 2015.
- [6] B. Siliņa un K. Šteinerts. *Rokasgrāmata matemātikā*, Rīga: Zvaigzne ABC, 367 lpp., 2006.
- [7] P. A. DeBarry, *Watersheds: processes assessment and management*. New Jersey: Willey and Sons Inc. Hoboken, p. 700, 2004.
- [8] K. Krauklis, A. Spalviņš un I. Eglīte "Latvijas zemieņu un augstieņu upju īpašību pētīšana ar Latvijas hidroģeoloģiskā modeļa palīdzību," *Datamodelēšana un robežproblēmas*, 55. sēj., 28.–33. lpp., 2016.

Aivars Spalviņš was born in Latvia. In 1963, he graduated from the Riga Polytechnical Institute (since 1990 – Riga Technical University) as a Computer Engineer. A. Spalviņš is the Head of the Environment Modelling Centre of RTU. His research interests include computer modelling of groundwater flows and migration of contaminants.

E-mail: Aivars.Spalvins@rtu.lv



Kaspars Krauklis received the Master's degree in Computer Systems from the Riga Technical University in 2007 and the Certificate in Teaching of Engineering Sciences from the Institute of Humanities of RTU in 2005. He is a researcher at the Environment Modelling Centre of RTU.

E-mail: kasparskrauklis@gmail.com



Inta Lāce was born in Latvia. In 1971, she graduated from Riga Polytechnical Institute (since 1990 – Riga Technical University) as a Computer Engineer. In 1995, Lāce received the Master's degree in Applied Computer Science. Since 1991, she is a researcher at the Environment Modelling Centre of RTU.

E-mail: intalace@yahoo.com



Finding of Groundwater Recharge, Transit and Discharge Areas

Aivars Spalviņš¹, Kaspars Krauklis², Inta Lāce³

¹⁻³ Riga Technical University

Groundwater recharge, transit and discharge areas for aquifers must be found. Their location depends on the influence of ground surface and hydrographical network (rivers, lakes, sea). It is commonly agreed that the recharge areas are located at hilly places where maximums of infiltration flows and piezometric groundwater levels coincide. Such method was applied for the hydrogeological model of Latvia *LAMO*. The model provides results for a complex spatial hydrogeological system where conditions even within one aquifer may differ considerably. For this reason, the common method of finding recharge, transit and discharge areas fails to provide accurate results. The new method has been developed. It is based on appliance of the ratio for velocities of vertical to horizontal groundwater flows. The resulting velocity of the vertical flow is found as the difference of velocities of flows on the top and bottom surfaces of the aquifer. The ratio r is the non-dimensional function. Its values $r = 1$ and $r = 0$ determine the locations of boundaries for the recharge and discharge areas, accordingly. For the transit area $0 < r < 1$. Within the recharge and discharge areas $r > 1$ and $r < 1$, correspondingly. The new method provides accurate results even for discontinuous aquifers where the zones of zero thickness appear. Within such zones $r = 0$. The method will be applied as a tool for investigating complex groundwater processes that are modelled by *LAMO*. The method was used for extra calibration of *LAMO* in order to improve its results.

The research was supported by the Latvian State Research Program EVIDEnT

Keywords: hydrogeological modelling, recharge, transit and discharge areas, *LAMO*