

# Giliausio planetos urvo užtvindymo matematinis modelis

Mindaugas Kavaliauskas

*Kauno technologijos universitetas*

Studentų g. 50, LT-51368 Kaunas

E. paštas: kavaliauskas.mindaugas@gmail.com

**Santrauka.** Lietuvos vardo tūkstantmečio minėjimo proga 2009 metų vasarą buvo organizuota ekspedicija į giliausią iki šiol atrastą Kruberio–Voronijos urvą, esantį Kaukaze. Ekspedicijos metu buvo nuskaityti matuoklių, visus metus fiksavusių vandens lygį urve, duomenys. Straipsnyje analizuojama vandens lygio ir meteorologiniai duomenys. Bandomas sudaryti urvo užtvindymo matematinis modelis, leisiantis prognozuoti vandens lygį urve ir užtikrinti ateityje vykdomų speleologinių tyrimų saugumą.

**Raktiniai žodžiai:** speleologija, potvynis, tiesinė regresija, laiko eilučių analizė.

## 1 Įvadas

Kruberio–Voronijos urvas [3] yra Vakarų Kaukazo kalnuose, Arabikos kalnų masyve (Gruzija, Abchazijos autonominė respublika). Šiuo metu urve yra pasiektas 2191 metrų gylis ir tai yra giliausias planetos urvas ir vienintelis siekiantis 2 km gylį. 2009 metų vasarą buvo organizuota Lietuvos speleologų ekspedicija „Gilyn į Žemės centrą“, kurios tikslas buvo pasiekti šio urvo giliausią vietą. Aido Gudaičio<sup>1</sup> vadovaujama speleologų grupė nusileido į 2140 metrų gylį ir čia pritvirtino Lietuvos vardo tūkstantmečio minėjimo ženklą. Norint pasiekti didesnę gylį, tektų nerti į sifoną (apsemtą urvo dalį), kurio pabaiga nėra žinoma.

Be Lietuvos vardo garsinimo, ekspedicija atliko ir daugiau užduočių, viena jų – duomenų nuskaitymas iš vandens lygio matavimo įrenginių [2] paliktų urve per 2008 metų ekspediciją ir šių įrenginių perkėlimas į kitas urvo vietas. Šie įrenginiai beveik metus laiko fiksavo vandens lygį dvejose urvo vietose – Tarybinių speleologų salėje (1710 m gylyje) ir Didžiajame išsišakojime (spėjamas gylis 1820 m). Šias urvo vietas toliau formulėse žymėsime atitinkamai  $TS$  ir  $DI$ . Be to vandens lygio davikliai buvo įtaisyti poromis su oro slėgio matavimo davikliais, kurie įtaisyti keliasdešimt metrų aukščiau – vandens neužliejamose vietose. Toks daviklių suporavimas leidžia tiksliau išmatuoti vandens lygį, nes faktiškai įrenginiai matuoja slėgį po vandenių, o turėjimas ir oro slėgio reikšmių leidžia pašalinti oro slėgio įtaką vandens lygio matavimuose. Tie patys įrenginiai matavo ne tik slėgį, bet ir oro bei vandens temperatūrą.

---

<sup>1</sup> Dėkoju Aidi Gudaičiui už suteiktus duomenis ir galimybę atlikti jų analizę.

## 2 Duomenų surinkimas ir pirminis apdorojimas

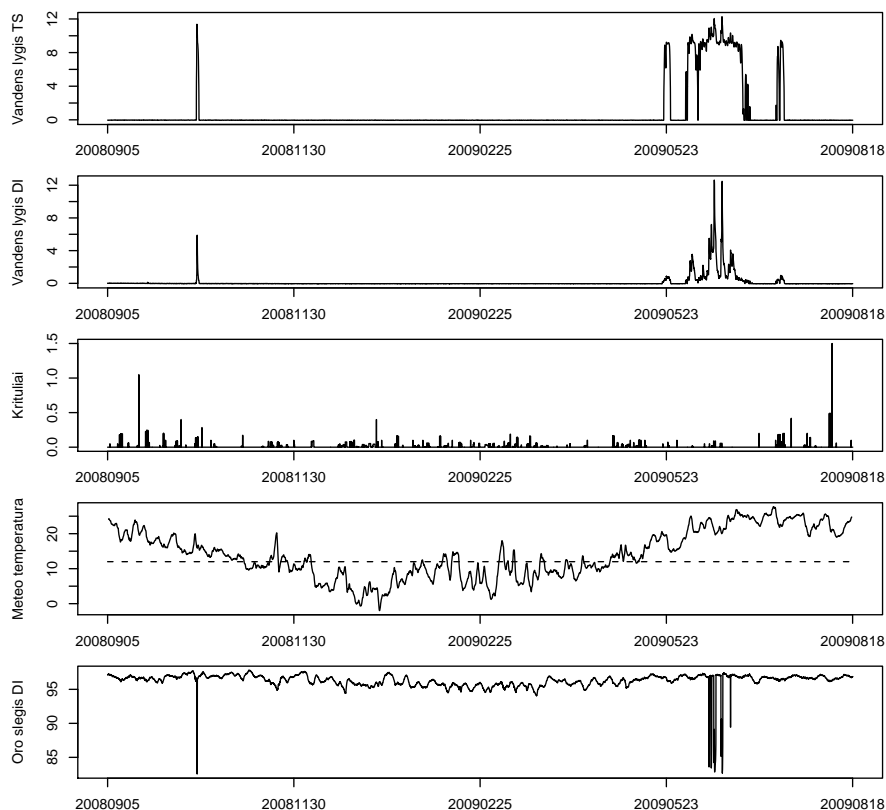
Spėjama, kad urvų užtvindymas turėtų būti susijęs su krituliais iškrentančiais urvo rajone. Todėl buvo bandyta ieškoti hidrometeorologinių duomenų. Tiksliausia prieinama informacija buvo rasta internetiniame tinklalapyje [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com) [1]. Čia skelbiama Soči tarptautinio aerouosto (tarptautinės civilinės aviacijos organizacijos suteiktas kodas: URSS) esančio vos 34 km nuo tiriamo urvo. Iš šio tinklalapio gauta informacija apie oro slėgį, oro temperatūrą, bei kritulių tipą (lietus, sniegas) kas valandą arba pusvalandį visam, beveik metus trukusiam, tiriamam laikotarpiui. Taip pat buvo gautas dar vieno svarbaus kintamojo – kritulių kiekio – dydis, tačiau šio kintamojo detalizavimas buvo žymiai mažesnis – suminis kritulių kiekis per parą. Kadangi vandens lygio ir oro slėgio matuokliai matavo temperatūrą ir slėgį kas 30 minučių, tai ir hidrometeorologinė informacija buvo transformuota taip, kad turėtume stebėjimus kas pusvalandį. Tuo tikslu, esant trūkstamiems atmosferos slėgio ir temperatūros duomenims, naudojome tiesinę interpoliaciją iš gretimų turimų reikšmių. Kritulių kiekį apskaičiuodavome išdalindami suminį paros kritulių kiekį tiems laiko momentams, kai buvo kritulių tipas turėjo požymį lietus arba sniegas. Valandiniai hidrometeorologijos stoties duomenys neretai nesutapdavo su suminiais kritulių duomenimis, pvz., suminis paros kritulių kiekis buvo lygus 0 cm kritulių, tačiau valandiniai duomenys rodė, kad kelias valandas iš eilės lijo. Tokiu atveju buvo laikoma, kad per parą iškrito mažiausias fiksuojamas 0.1 cm kritulių kiekis.

Šiek tiek reikėjo transformuoti ir pačius vandens lygio ir oro slėgio urve duomenis, nes į prietaisus buvo įvestas jų aukštis virš jūros lygio ir gauti duomenys su korekcijomis, kurios buvo nereikalingos šiame tyrime. Prietaisų parodymai buvo konvertuoti į slėgio parodymus. Be to visi duomenys turėjo būti sinchronizuoti laike, nes pradiniai duomenys pateikiami įvairiose laiko sistemose: vandens lygio ir oro slėgio matuokliai – vietos vasaros laiku, suminis paros kritulių kiekis – vietos laiku, kita hidrometeorologinė informacija – aviacijoje naudojamu pasauliniu koordinuotuoju laiku (angl. *UTC*).

## 3 Užtvindymo prognozavimas

Iš duomenų pateiktų 1 pav. matome, kad tiek Tarybinių speleologų salėje, tiek Didžiajame išsišakojime buvo keletas urvo užtvindymų kurie vyko 2008 m. spalio 16 d., bei 2009 m. gegužės 21–liepos 18 dienomis. Vandens gylis abejose matavimų vietoje potvynio maksimumo metu siekdavo 12 metrų. Priešingai nei tikėtasi, didžiausių užtvindymų metu nematome gausaus kritulių kiekio. Nebent 2008 m. spalio 16 d. ir 2009 m. liepos 13–18 d. potvynius būtų galima laikyti sukeltais lietaus, nes panašiu metu yra iškritę kritulių. Bet kokie bandymai sudaryti užtvindymo modelį paremtą iškritusiu kritulių kiekiu visam tiriamam laikotarpiui nedavė jokių teigiamų rezultatų.

1 pav. pateikta ir meteorologinės stoties vidutinė paros temperatūros. Tačiau reiktų pastebėti, kad meteorologinė stotis fiksuoja temperatūrą aerouosto teritorijoje 27 m virš jūros lygio, o įėjimas į urvą yra 2256 m aukštyje. Paprastai oro temperatūra pakilus 1 km nukrenta 5–6 laipsniais, tad urvo įėjimo aukštyje ji turėtų būti maždaug 12 laipsnių žemesnė nei meteorologinėje stotyje. 1 pav. 12 laipsnių riba pažymėta punktyrine linija. Matome, kad galutinai pavasarį vidutinė paros temperatūra urvo įėjimo aukštyje pakyla virš 0 laipsnių tik gegužės 10 d., o potvynis prasideda gegu-



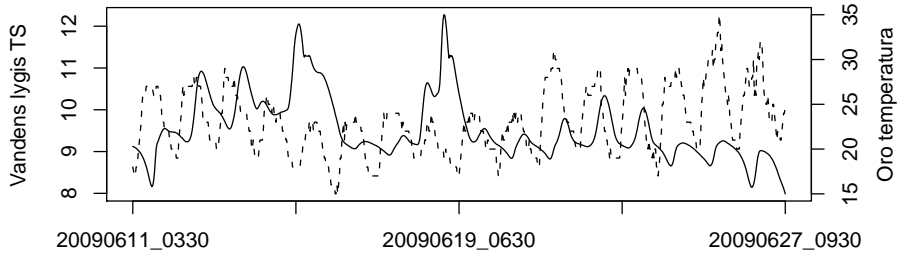
1 pav. Pagrindiniai pradiniai kintamieji.

žės 21 d. Todėl galime manyti, kad didžiausia įtaką pavasario ir vasaros pradžios potvyniams daro ne krituliai, o tirpstantis sniegas. Šią hipotezę patvirtina cikliškas vandens lygio svyravimas 24 valandų periodu matomas 2 pav., bei padidėjusi atitinkama Furje transformacijos amplitudės reikšmė.

Dėl šių priežasčių tik liepos vidurio potvynis (kuris gali būti sukeltas lietaus) buvo panaudotas vandens lygio modelio sudarymui. Vandens lygio priklausomybė buvo bandyta prognozuoti naudojant pirmos eilės autoregresijos procesą priklausomą nuo regresorių – kritulių kiekio praityje. Palyginus laiko tarpus tarp kritulių iškritimo ir vandens lygio padidėjimo pastebėtas nedidelis kelių valandų tarpas, todėl į modelį buvo bandyta įtraukti paskutinių 6 valandų kritulių kiekius. Taigi testuotas modelis:

$$h_t = a_0 + ah_{t-1} + b_1p_{t-1} + \dots + b_{12}p_{t-12}, \quad (1)$$

kur  $h_t$  – vandens lygis urve laiko momentu  $t$ , o  $p_t$  – kritulių kiekis laiko momentu  $t$ . Stebėjimai buvo atliekami kas pusę valandos, todėl čia ir toliau dydžių indeksuose naudosime laiko momentą  $t$  turinį atitinkamą žingsnį, pvz.,  $p_{t-12}$  žymi kritulių kiekių 6 valandom anksčiau nei laiko momentas  $t$ .



2 pav. Vandens lygio Tarybinių speleologų salėje (ištininė linija) ir oro temperatūros meteorologinėje stotyje (punktyrinė linija) reikšmės potvynio metu.

### 3.1 Didžiojo išsišakojimo vandens lygio modelis

Deja, naudojant modelį (1), nė vienas iš koeficientų  $b_i$  nebuvo statistiškai reikšmingas. Buvo aišku, kad koeficientų kiekį reikia mažinti. Tuomet buvo patikrinti duomenų modeliai

$$h_t = a_0 + ah_{t-1} + bp_{t-i}, \quad i = 1, \dots, 12. \quad (2)$$

Su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu 0.1 gauta, kad modelis patikimai priklauso tik nuo regresorių  $p_{t-1}$  ( $\alpha = 0.0639$ ),  $p_{t-2}$  ( $\alpha = 0.0494$ ),  $p_{t-3}$  ( $\alpha = 0.0215$ ),  $p_{t-4}$  ( $\alpha = 0.0285$ ) ir  $p_{t-5}$  ( $\alpha = 0.054$ ) narių, tačiau visus juos įtraukus į modelį vienu metu, regresijos koeficientai tapdavo vėl statistiškai nereikšmingais. Todėl galutinai modelis buvo parinktas naudojant vieną regresorių – kritulių sumą, bei atmetus statistiškai nereikšmingą ( $\alpha = 0.71$ ) koeficientą  $a_0$ :

$$h_t = ah_{t-1} + b(p_{t-1} + p_{t-2} + p_{t-3} + p_{t-4} + p_{t-5}). \quad (3)$$

Gauti modelio kintamųjų įverčiai  $a = 0.98455$  (kritinis reikšmingumo lygmuo  $\alpha < 2 \cdot 10^{-16}$ ),  $b = 0.053681$  ( $\alpha = 0.000426$ ).

### 3.2 Tarybinių speleologų salės vandens lygio modelis

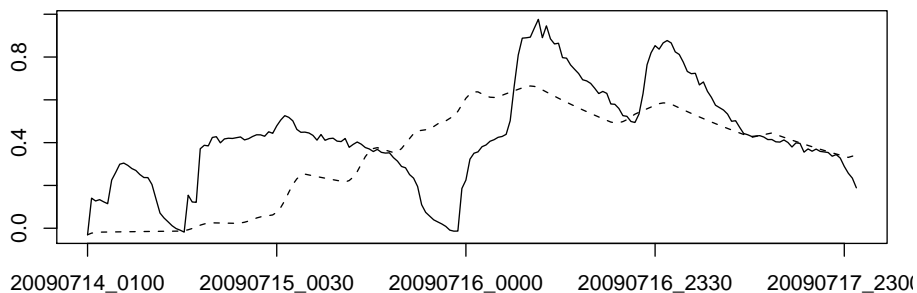
Tarybinių speleologų salės vandens lygio modelis sudarytas analogiškai kaip ir Didžiojo išsišakojimo vandens lygio modelis. Naudojant modelį (1) nė vienas iš koeficientų  $b_i$ , nebuvo statistiškai reikšmingas. Tikrinant modelius (2) gauta priklausomybė nuo regresorių  $p_{t-4}$  ( $\alpha = 0.0844$ ),  $p_{t-5}$  ( $\alpha = 0.0134$ ) ir  $p_{t-6}$  ( $\alpha = 0.0240$ ). Įtraukus į modelį visus šiuos regresorius vienu metu, statistiškai reikšmingų koeficientų negauta, todėl sudarytas modelis naudojant viena regresorių — šių narių sumą, o koeficientas  $a_0$  atmestas kaip statistiškai nereikšmingas ( $\alpha = 0.724$ ):

$$h_t = ah_{t-1} + b(p_{t-4} + p_{t-5} + p_{t-6}). \quad (4)$$

Gauti modelio kintamųjų įverčiai  $a = 0.991465$  (kritinis reikšmingumo lygmuo  $\alpha < 2 \cdot 10^{-16}$ ),  $b = 0.654266$  ( $\alpha = 0.0046$ ).

### 3.3 Užtvindymo pradžios prognozavimas

Pastebėsime, kad nors koeficientai modeliuose (3) ir (4) yra reikšmingi, o modeliai paaiškina 96.6% ir 97.68% vandens lygio svyravimo apie vidurkį (atitinkamai Didžia-



**3 pav.** Vandens lygis Didžiajame išsišakojime (ištiesinė linija) ir vandens lygio prognozė gauta naudojant tik kritulių kiekio meteorologinėje stotyje duomenis (punktyrinė linija).

jame išsišakojime ir Tarybinės speleologų salėje). Modelis nėra pakankamai tikslus (žr. 3 pav.) ir sunkiai pritaikomas užtvindymo pradžios prognozavimui. To priežastimi gali būti:

- Nepakankamai tikslūs meteorologiniai duomenys. Nors urvas nutolęs nuo meteorologinės stoties tik 34 km, tačiau meteorologinės stoties ir urvo įėjimo aukščių skirtumas viršija 2 km. Tai labai stipriai atsiliepia oro prognozės (ypač kritulių) tikslumui;
- Matematiniai modeliai (1)–(4) labiau tinkami vandens kiekiui nei vandens lygiui modeliuoti, nes jie bando įvertinti patenkančio (prilijančio) vandens kiekį. Tuo tarpu urvas nėra cilindro formos, todėl vandens lygis ir vandens kiekis susieti sudėtinga netiesine priklausomybe, priklausančia nuo urvo geometrinės formos. Tai galime pastebėti iš 1 pav., kuriame matome, jog Didžiajame išsišakojime vandens lygio potvynio metu reikšmės dažniausiai nesiekia 4 m ir tik maksimumai siekia 12 metrų, tačiau Tarybinių speleologų salėje vandens lygis greitai pakyla virš 8 metrų, o vėliau kinta nežymiai ir maksimumai taip pat siekia apie 12 m lygį. Tokią vandens lygio svyravimo specifiką būtų galima paaiškinti geometrinėmis urvo formos savybėmis;
- Mes stebime tik potvynius, kai vandens lygis viršija tam tikrą ribą. Esant nepakankamam vandens lygiui vanduo nėra fiksuojamas (daviklis kabo ore), todėl vandens lygio modelio sudarymui galima naudoti tik nedidelius potvynių laiko intervalus.

Turint kelių vandens lygio daviklių duomenis, galima prognozuoti užtvindymo pradžią vienoje urvo vietose pagal užtvindymus kitos urvo vietose. Suvidurkinus užtvindymo pradžių laikus iš turimų duomenų randame, kad užtvindymas Didžiajame išsišakojime prasideda vidutiniškai 1.666 valandos anksčiau nei užtvindymas Tarybinių speleologų salėje, todėl galime naudoti tuo pagrįstą užtvindymo pradžios laiko įvertį:

$$\hat{t}_{TS} = t_{DI} + 1.666, \quad (5)$$

tačiau šis įvertis sudarytas vos iš keleto stebėjimų. Tikslėsiam vidurkio apskaičiavimui ir pasikliautinio intervalo įvertinimui reiktų sukaupti daugiau statistinių duomenų.

Toks užtvindymo prognozavimas leistų prognozuoti užtvindymo pradžią žymiai tiksliau nei meteorologiniai duomenys, tačiau laiko intervalas tarp (turimuose duo-

menyse) stebėtų užtvindymo pradžių nėra didelis, todėl tokia prognozė galima tik neilgam laikotarpiui į priekį.

## 4 Išvados

Iš atliktų tyrimų seka išvados:

1. Didžiąją potvynių dalį sukelia ne lietus, o tirpstantis sniegas. Norint prognozuoti šiuos potvynius reiktų turėti sniego dangos storio stebėjimus;
2. Vasaros ir rudens metu (t.y., kai vyksta speleologinės ekspedicijos), lietaus sukeltus užtvindymus galima bandyti prognozuoti naudojantis Soči aerouosto meteorologiniais duomenimis, tačiau prognozės nėra tikslios. Tikslesnėms prognozėms būtini kritulių duomenys urvo aplinkoje;
3. Trumpam (kelių valandų) laikotarpiui į priekį galima vienu urvo vietų užtvindymą prognozuoti naudojantis, kitų urvo vietų užtvindymo duomenimis.

## Literatūra

- [1] *History : Weather Underground, Adler, Rusia*. Available from Internet: <http://www.wunderground.com/history/airport/URSS/2008/09/05/DailyHistory.html>. [2010-05-21].
- [2] *Levelogger Gold Data Loggers, Groundwater Data Loggers, Water Level Data Loggers*. Available from Internet: <http://www.solinst.com/Prod/3001/3001.html>. [2010-05-21].
- [3] *Voronya Cave*. Available from Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Voronya\\_Cave](http://en.wikipedia.org/wiki/Voronya_Cave). [2010-05-21].

## SUMMARY

### Flood model of the deepest cave in the world

M. Kavaliauskas

Lithuanian speleology expedition to the Krubera-Voronya cave, the deepest known cave in the world, was organized in summer of 2009. The data from water level logger devices was read. Data of cave water level and meteorologic data is analysed. Mathematical model of water level is proposed. This work should help to predict caves flooding and increase safety of speleological expeditions.

*Keywords:* speleology, flood, linear regression, time series analysis.