

Современная наука и инновации.
2023. № 4 (44). С. 32-40.
Modern Science and Innovations.
2023; 4(44):32-40.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /
TECHNICAL SCIENCE

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ / INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Марьяна Альбековна Георгиева
[Maryana A. Georgieva]

Системный анализ
эрозионно-русловых процессов

System analysis of erosion-bed
processes

Научная статья / Original article

УДК 681.51: 621.18-5
<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.4>

Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, maryana.g@list.ru /
Southern Federal University, Taganrog, Russia, maryana.g@list.ru

Аннотация. Эрозионно-русловые процессы могут быть вызваны различными факторами, такими как высокая скорость потока воды, неравномерность потока, изменение направления потока воды, выход на поверхность вод из водоносных пластов и горизонта грунтовых вод, наличие препятствий в русле и другими факторами. Математическое описание рассматриваемых процессов в их сложной взаимосвязи и системный анализ, позволяют прогнозировать развитие эрозионно-русловых процессов, таких как: изменение глубины русла, увеличение скорости потока воды, образование местных водопадов и порогов, прорывы дамб и другие опасности. Кроме того, вынос материала из русла может привести к загрязнению водоемов и нарушению экосистем.

Ключевые слова: системный анализ, эрозионно-русловые процессы, математические модели гидролитосферных процессов, переменные коэффициенты перетекания

Для цитирования: Георгиева М. А. Системный анализ эрозионно-русловых процессов // Современная наука и инновации. 2023. № 4 (44). С. 32-40. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.4>

Abstract. Erosion-bed processes can be caused by various factors, such as high speed of water flow, uneven flow, change in the direction of water flow, water coming to the surface from aquifers and the groundwater horizon, the presence of variability in the channel and other factors. A mathematical description of the processes under consideration in their complex relationships and system analysis allows us to predict the development of erosion-bed processes, such as: changes in the strength of the channel, an increase in the speed of water flow, the formation of local waterfalls and rapids, dam breaks and other dangers. In addition, the removal of material from the riverbed can lead to pollution of water bodies and disruption of the ecosystem.

Keywords: system analysis, erosion-bed processes, mathematical models of hydrolithospheric processes, variable flow coefficients

For citation: Georgieva MA. System analysis of erosion-bed processes. Modern Science and Innovations. 2023;4(44):32-40.. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.4>

Введение. Гидролитосфера нашего региона, как правило состоит из поверхностных рек, грунтовых вод и водоносных горизонтов. Глубина залегания рассматриваемых горизонтов в разных регионах разная. Например, в регионе КМВ глубина залегания составляет от десятков метров (окрестности г. Кисловодска), до тысяч метров (окрестности г. Георгиевска). Все рассматриваемые горизонты (поверхностные реки, грунтовые воды и водоносные горизонты), как правило находятся в гидравлической взаимосвязи и оказывают существенное влияние на эрозионные процессы. Когда уровень грунтовых вод выше уровня

земли, это может привести к образованию более мягких и менее устойчивых почв, что может увеличить склонность к эрозии [2].

Материалы и методы исследований. Одним из наиболее распространенных примеров является эрозия береговых линий. Если уровень грунтовых вод находится близко к поверхности земли, то это может привести к размыву береговых линий и созданию углублений и пещер в прибрежной зоне.

Кроме того, грунтовые воды могут оказывать влияние на процессы солифлюкции, которые возникают при высоком уровне воды в почве. В этом случае грунт начинает размягчаться и перемещаться, что может привести к образованию ям и углублений на поверхности земли.

Наконец, грунтовые воды могут также оказывать влияние на процессы образования карстовых явлений, таких как пещеры и подземные реки. Когда грунтовые воды протекают через пористые и карстовые грунты, они могут создавать подземные полости и расселины, которые со временем могут привести к образованию пещер и подземных рек [2].

В целом, гидролитосферные процессы являются важным фактором, который следует учитывать при анализе и предсказании эрозионных процессов. Рассматриваемые гидролитосферные зависят не только от времени, но и от пространственных координат.

Рассмотрим описание гидролитосферных процессов с переменными коэффициентами перетекания. Математические модели таких процессов описываются уравнениями в частных производных.

Результаты исследований и их обсуждение. Иногда, проходя по береговой зоне горных рек и ручьев, мы встречаем небольшие участки поверхности с влажным грунтом и достаточно обильной растительностью в засушливые погодные периоды, а иногда встречаются небольшие ручейки. Это свидетельствует о том, что имеются и водоносные пласты, у которых, в рассматриваемых областях, коэффициенты перетекания достаточно большие. Осуществляется водообмен пласта с грунтом. В связи с этим рассмотрим ниже систему, состоящую из водоносного горизонта и грунтовых вод. В соответствии с [1], запишем уравнения, описывающие рассматриваемый гидролитосферный процесс, в безнапорном, однородном пласте (грунтовых водах), без учета инфильтрации:

$$\frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = k_{1,x} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$k_{1,x} = \bar{K}_x \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,y} = \bar{K}_y \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,z} = \bar{K}_z \cdot h_{cp} / \mu,$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z.$$

где: x, y, z – пространственные координаты; τ – время; h_1 – напор в горизонте грунтовых вод;

$k_{1,x}, k_{1,y}, k_{1,z}$ – коэффициенты уровнепроводности по соответствующим координатам в $m^2/сут$;

$\bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{K}_z$ – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам;

h_{cp} – средний уровень грунтовых вод; μ – коэффициент грунтовой водоотдачи;

L_x, L_y, L_z – заданные значения.

Математическая модель, описывающая процессы в водоносных горизонтах, имеет вид [2]:

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_z,$$

где: $k_{2,x}, k_{2,y}, k_{2,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам; H_2 – напор в водоносном горизонте; η_2 – упругоёмкость.

К рассматриваемым уравнениям (1),(2) добавляются граничные и начальные условия

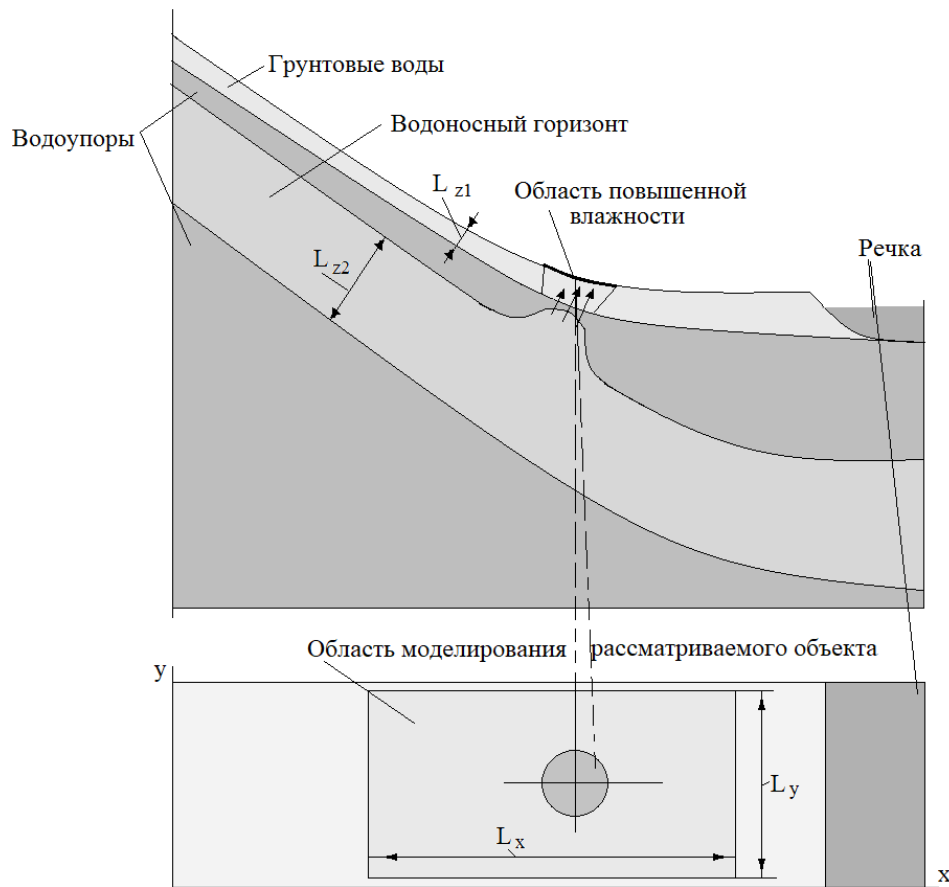


Рисунок 1 – Схема расположения грунтовых вод и водоносного пласта
Figure 1 – The layout of groundwater and aquifer

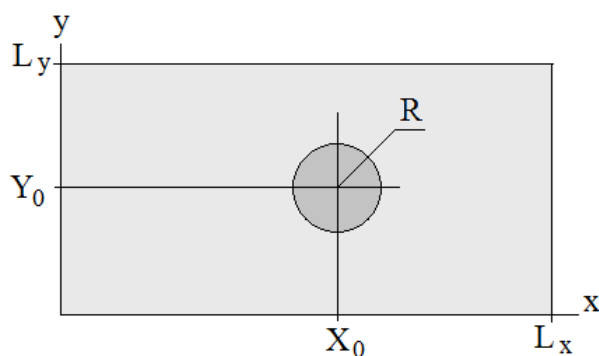


Рисунок 2 – Область моделирования гидrolитосферных процессов
Figure 2 – The field of modeling of hydrolithospheric processes

Рассмотрим пример моделирования гидrolитосферных процессов участка береговой зоны (см. рис. 1). Математическая модель, описывающая гидrolитосферные процессы, записывается в виде (1), (2). При описании рассматриваемого процесса используем плоско-пространственные математические модели (грунтовые воды и гидrolитосферные процессы рассматриваемого пласта описываются пространственными моделями, а процессы в водоупорах описываются плоскими моделями [1]). Граничные условия для уравнений (1), (2) имеют вид:

Грунтовые воды – водоносный горизонт

Поскольку значение коэффициента перетекания меняется, то граничные условия записываются в виде:

$$\begin{aligned} 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, \\ b_{1,t} &= b_1, \\ \text{If } ((x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2)^{0.5} \leq R \text{ then } b_{1,t} &= b_{1,k}, \\ h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) &= h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_{1,t} \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau, \\ H_2(x, y, 0, \tau) &= H_2(x, y, 0, \tau) - b_{1,t} \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau. \end{aligned}$$

Боковые грани.

$$\begin{aligned} h_1(0, y, z, \tau) &= h_{1,0}, H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0}, \\ \partial h_1(L_x, y, z, \tau) / \partial x &= 0; \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0. \\ \partial h_1(x, 0, z, \tau) / \partial y &= 0; \partial H_2(x, 0, z, \tau) / \partial y = 0. \\ \partial h_1(x, L_y, z, \tau) / \partial y &= 0; \partial H_2(x, L_y, z, \tau) / \partial y = 0, \\ \partial H_2(x, y, Z_2, \tau) / \partial z &= 0. \end{aligned}$$

Используя приведенную выше математическую модель объекта управления, запишем дискретную модель:

Грунтовые воды

$$\begin{aligned} \frac{\Delta h_{1,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} &= k_{1,x} \frac{h_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \\ &+ k_{1,y} \frac{h_{1,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \\ &+ k_{1,z} \frac{h_{1,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot h_{1,\eta,\gamma,\xi} + h_{1,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_1)^2}; \\ 2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z_1} - 1. \end{aligned}$$

Водоносный горизонт

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H_{2,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} &= \frac{1}{\eta_2} (k_{2,x} \frac{H_{2,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \\ &+ k_{2,y} \frac{H_{2,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \\ &+ k_{2,z} \frac{H_{2,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_2)^2}); \\ 2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z_2} - 1. \end{aligned}$$

где: N_x, N_y – число точек дискретизации по координатам x и y соответственно;
 N_{zi} – число точек дискретизации i -го пласта по координате z ($i=1...4$).
 Запишем дискретные модели граничных условий [1]:

Грунтовые воды – водоносный горизонт

$$1 < x < N_x, 1 < y < N_y,$$

$$b_{1,t} = b_1,$$

$$\text{If } (((\eta - 1) \cdot \Delta x - X_0)^2 + ((\gamma - 1) \cdot \Delta y - Y_0)^2)^{0.5} \leq R \text{ then } b_{1,t} = b_{1,k},$$

$$h_{1,\eta,\gamma,N_{z1}} = h_{1,\eta,\gamma,N_{z1}} + b_{1,t} \cdot (H_{2,\eta,\gamma,1} - h_{1,\eta,\gamma,N_{z1}}) \cdot \Delta \tau,$$

$$H_{2,\eta,\gamma,1} = H_{2,\eta,\gamma,1} - b_{1,t} \cdot (H_{2,\eta,\gamma,1} - h_{1,\eta,\gamma,N_{z1}}) \cdot \Delta \tau$$

Нижняя граница водоносного горизонта

$$H_{4,\eta,\gamma,N_{z4}} = H_{4,\eta,\gamma,N_{z4}-1}, \quad 2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1.$$

Боковые грани

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_{1,0}, H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0},$$

$$\partial h_1(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0; \quad \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0.$$

$$\partial h_1(x, 0, z, \tau) / \partial y = 0; \quad \partial H_2(x, 0, z, \tau) / \partial y = 0.$$

$$\partial h_1(x, L_y, z, \tau) / \partial y = 0; \quad \partial H_2(x, L_y, z, \tau) / \partial y = 0,$$

$$\partial H_2(x, y, Z_2, \tau) / \partial z = 0.$$

$$h_{1,1,\gamma,\xi} = h_{1,0}, H_{2,1,\gamma,\xi} = h_{2,0},$$

$$h_{1,N_x,\gamma,\xi} = h_{1,N_x-1,\gamma,\xi}, H_{2,N_x,\gamma,\xi} = H_{2,N_x-1,\gamma,\xi},$$

$$h_{1,\eta,1,\xi} = h_{1,\eta,2,\xi}, H_{2,\eta,1,\xi} = H_{2,\eta,2,\xi},$$

$$h_{1,\eta,N_y,\xi} = h_{1,\eta,N_y-1,\xi}, H_{2,\eta,N_y,\xi} = H_{2,\eta,N_y-1,\xi},$$

$$H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}} = H_{2,\eta,\gamma,N_{z2}-1}$$

$$1 < \eta < N_x, \quad 1 < \gamma < N_y, \quad 1 < \xi < N_{zi}, (i = 1, 2),$$

где: $h_{1,0,\xi}, H_{1,0}$ – начальное состояние невозмущенных пластов (грунтовых вод и водоносного горизонта);

$b_1, b_{1,k}$ - параметры перетекания.

Геометрические параметры моделируемой области приведены в табл. 1 (значения параметров заданы в системе СИ)

Таблица 1 – Значения геометрических параметров объекта
Table 1 – The values of the geometric parameters of the object

	Обозначения	Размер, м.
Длина моделируемой области	L_x	150
Ширина моделируемой области	L_y	100
Толщина грунта	L_{z1}	3

Высота грунтовых вод		1 м.
Толщина пласта	L_{z_2}	25
Радиус области повышенной влажности	R	1.1

Численные значения физических параметров, используемые при моделировании объекта управления ((см. табл. 2) упругость пласта – η ; коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам – k_x, k_y, k_z ; коэффициент перетекания – b_1 и $b_{1,t}$) (значения параметров приведены в системе «СИ»).

Таблица 2 – Значения физических параметров объекта
Table 2 – Values of the physical parameters of the object

Грунтовые воды	Пласт
$k_{x1}=3.92/86400$; $k_{y1}=3.92/86400$; $k_{z1}=2.52/86400$;	$k_{x2}=0.31/86400$; $k_{y2}=0.30/86400$; $k_{z2}=0.21/86400$; $\eta_2=0.0003$; $b_1=0.000021/86400$; $b_{1,t}=0.0021/86400$.

При моделировании гидrolитосферного процесса было выбрано следующее число точек дискретизации по пространственным координатам:

$$x \rightarrow \eta = 1..N_x; y \rightarrow \gamma = 1..N_y; z_i \rightarrow \xi = 1..N_z, i=1,2,$$

$$N_x = 76; N_y = 51; N_z = 9.$$

Шаги дискретизации по пространственным координатам соответственно равны:

$$\Delta x = L_x / (N_x - 1); \Delta y = L_y / (N_y - 1); \Delta z_1 = L_{z1} / (N_z - 1); \Delta z_2 = L_{z2} / (N_z - 1).$$

Координаты расположения области повышенной влажности:

$$X_0 = 75 \text{ м.}; Y_0 = 50 \text{ м.},$$

Начальное состояние гидrolитосферного процесса задано в виде:

$$h_{1,0}(x, y, z, 0) = 0.3 \cdot z, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_{z1},$$

$$H_{2,0}(x, y, z, 0) = 55 - 10 \cdot x / L_x, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_{z2},$$

По результатам моделирования построены графики, приведенные на рис. 3.

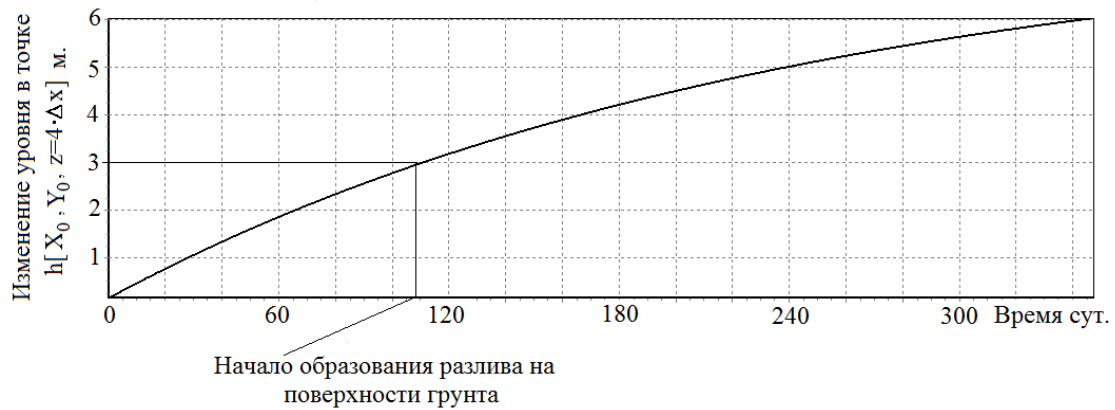


Рисунок 3 – График изменения уровня на поверхности грунта
Figure 3 – Graph of the level change on the ground surface

Объем воды, поступающий в область повышенной влажности, за время Δt вычисляется из следующего алгоритма:

```

 $\Delta Q = 0;$ 
for  $x = 2$  do  $N_x - 1$ 
  for  $y = 2$  do  $N_y - 1$  do begin
    If  $(((\eta - 1) \cdot \Delta x - X_0)^2 + ((\gamma - 1) \cdot \Delta y - Y_0)^2)^{0.5} \leq R$  then ,
       $\Delta Q = \Delta Q + b_{1,t} \cdot (H_{2,\eta,\gamma,1} - h_{1,\eta,\gamma,N_{z1}}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta \tau.$ 
    end;
  
```

Заключение. Структурные особенности гидролистоферы в данном регионе оказывают значительное воздействие на процессы водной эрозии. В республике Кабардино-Балкария одним из наиболее распространенных примеров является эрозия береговых линий, что может привести к размыву побережья и образованию опасных углублений и обвалов. Один из недавних случаев, произошедший в мае – июне 2023 года в городе Прохладном Кабардино-Балкарии в районе Центрального парка, может послужить хорошим примером таких явлений.



Рисунок 4 – Водная эрозия русла р. Малка

Figure 4 – Water erosion of the Malka riverbed riverbed



Рисунок 5 – Обвал береговой зоны русла р. Малка

Figure 5 – Collapse of the coastal zone of the Malka



Рисунок 6 – Глубокая береговая эрозия
Figure 6 – Deep coastal erosion



Рисунок 7 – Береговое укрепление, разрушенное в результате размыва берега р. Малка
Figure 7 – Coastal fortification destroyed as a result of erosion of the Malka River bank

Для предотвращения чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушительными эрозионно-русовыми процессами, необходимы исследования, направленные на прогнозирование и оценку воздействия эрозии на окружающую среду. Это необходимо для разработки эффективных стратегий управления. Такие стратегии должны основываться на системном анализе и математическом моделировании. Применение современных методов исследования позволит осуществлять планируемые действия, минимизируя риски и улучшая управление водными бассейнами [5].

На сегодняшний день проводятся дальнейшие исследования в области системного анализа почвенной эрозии русловых систем. Исследования в области эрозионных процессов в городах и поселках даёт основу для разработки рекомендаций по предотвращению эрозии русел рек с учётом географического положения и геолого-геоморфологических особенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Першин И. М., Малков А. В., Першин М. И. Математические модели гидролитосферных процессов // Недропользование XXI век. 2018. № 3. С. 56–65.
2. Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И. Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8 (157).
3. Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К., Першин И. М., Першин М. И. Математическая модель гидролитосферных процессов // Приборостроение. 2017. № 9.
4. Першин И. М., Кузьмин Н. Н., Малков А. В. Формирование целевых функций в задачах управления гидролитосферными процессами // 5-я Российская мультиконференция по проблемам управления. 2012. С. 622–632.
5. Витиска Н. И., Георгиева М. А. Применение компьютерного моделирования в вопросах изучения эрозии почв и русел рек // В сборнике: Информационные технологии в экологии, образовании и бизнесе. Материалы конференции. 2021. С. 192–197.
6. Боровков В. С., Брянская Ю. В., Остякова А. В. Экспериментальные исследования динамического взаимодействия модельных русловых форм с потоком // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 2. С. 133–137.

REFERENCES

1. Pershin IM, Malkov AV, Pershin MI. Matematicheskie modeli gidrolitosfernykh protsessov. Nedropol'zovanie XXI vek. 2018;3:56-65. (In Russ.).
2. Pershin IM, Veselov GE, Pershin MI. Sintez raspredelennykh sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami mestorozhdenii mineral'nykh vod. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2014;8(157). (In Russ.).
3. Bystrov SV, Grigor'ev VV, Mansurova OK, Pershin IM, Pershin MI. Matematicheskaya model' gidrolitosfernykh protsessov. Priborostroyeniye. 2017;9. (In Russ.).
4. Pershin IM, Kuz'min NN, Malkov AV. Formirovaniye tselevykh funktsii v zadachakh upravleniya gidrolitosfernymi protsessami. 5-ya Rossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya. 2012. P. 622-632. (In Russ.).
5. Vitiska NI, Georgieva MA. Primeneniye komp'yuternogo modelirovaniya v voprosakh izucheniya ehrozii pochv i rusel rek. V sbornike: Informatsionnye tekhnologii v ehkologii, obrazovanii i biznese. Materialy konferentsii. 2021. P. 192-197. (In Russ.).
6. Borovkov VS, Bryanskaya YuV, Ostyakova AV. Ehksperimental'nye issledovaniya dinamicheskogo vzaimodeistviya model'nykh usloviykh form s potokom. Vodnye resursy. 2018;45(2):133-137. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Марьяна Альбековна Георгиева – аспирант 3 года обучения, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, +79674177490, maryana.g@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Maryana A. Georgieva – 3rd year Postgraduate Student of the Southern Federal University, Taganrog, Russia, +79674177490, maryana.g@list.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the author declares no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию: 27.09.2023;
одобрена после рецензирования: 05.11.2023;
принята к публикации: 10.12.2023.*

*The article was submitted: 27.09.2023;
approved after reviewing: 05.11.2023;
accepted for publication: 10.12.2023.*