

УДК 519.6;519.71

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-133-142

EDN: WWJSAG

Математическое моделирование взаимовлияния атмосферных осадков и гидrolитосферных процессов на наклонные поверхности

М. А. Георгиева^{✉1, 2}, И. М. Першин²

¹Южный федеральный университет

347922, Россия, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корпус «И»

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Аннотация. В статье представлена математическая модель, описывающая взаимовлияние атмосферных осадков и гидrolитосферных процессов на наклонные поверхности. Модель учитывает ключевые факторы, влияющие на формирование поверхностного и подземного стока, эрозию почвы и изменение рельефа. Результаты моделирования демонстрируют зависимость интенсивности эрозионных процессов от характеристик осадков и геоморфологических параметров склонов. Полученные результаты могут быть применены для прогнозирования эрозионных процессов и разработки эффективных мер по защите почвы.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидrolитосферные процессы, системный анализ, атмосферные осадки, эрозионные процессы

Поступила 10.12.2024, одобрена после рецензирования 29.01.2025, принята к публикации 05.02.2025

Для цитирования. Георгиева М. А., Першин И. М. Математическое моделирование взаимовлияния атмосферных осадков и гидrolитосферных процессов на наклонные поверхности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 1. С. 133–142. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-133-142

MSC: 86-10

Original article

Mathematical modeling of mutual influence of atmospheric precipitation and hydrolithospheric processes on inclined surfaces

M.A. Georgieva^{✉ 1, 2}, I.M. Pershin²

¹Southern Federal University

347922, Russia, Taganrog, 2 Chekhov street, building “I”

²Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street

Abstract. This paper presents a mathematical model describing interaction of atmospheric precipitation and hydrolithospheric processes on sloping surfaces. The model takes into account the key factors influencing formation of surface and subsurface runoff, soil erosion and relief change. The modeling results demonstrate dependence of intensity of erosion processes on precipitation features and geomorphological parameters of slopes. The results obtained can be applied for prediction of erosion processes and development of effective soil protection measures.

Keywords: mathematical modeling, hydrolithospheric processes, system analysis, atmospheric precipitation, erosion processes

For citation. Georgieva M.A., Pershin I.M. Mathematical modeling of mutual influence of atmospheric precipitation and hydrolithospheric processes on inclined surfaces. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 1. Pp. 133–142. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-1-133-142

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионные процессы на склоновых территориях представляют собой сложный геоморфологический процесс, значительно влияющий на состояние окружающей среды и сельскохозяйственное производство. Интенсивность эрозии определяется взаимодействием множества факторов, главными из которых являются характеристики атмосферных осадков и геоморфологические параметры склонов. Традиционные методы оценки эрозии часто оказываются недостаточно точными и не позволяют учитывать все сложности этого процесса.

В связи с этим широкое применение находит математическое моделирование, позволяющее учитывать множество факторов и прогнозировать изменения эрозионных процессов при различных условиях. Модель учитывает ключевые факторы, влияющие на формирование поверхностного и подземного стока, эрозию почвы и изменение рельефа.

Рассмотрим моделирование гидролитосферных процессов при выпадении осадков на ровную плоскую поверхность (рис. 1, а) и на наклонную плоскую поверхность (рис. 1, б)

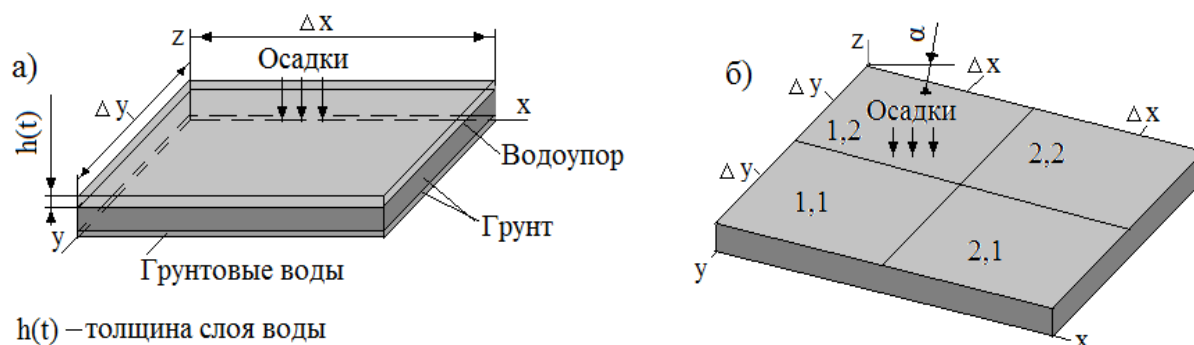


Рис. 1. Схемы выпадения осадков

Fig. 1. Precipitation patterns

Разделим наклонную поверхность на секции. Положим, что число таких секций по координатам x и y задано в виде:

$$1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y.$$

Рассмотрим моделирование гидролитосферных процессов при выпадении осадков на наклонную поверхность, показанную на рисунке 2. При этом рассмотрим вариант, когда каждая секция имеет свои углы наклонов по пространственным координатам x и y ($\alpha_{\eta,\gamma}$ и $\beta_{\eta,\gamma}$) относительно ровной плоской поверхности (рис. 2).

Разделим наклонную плоскость на секции (η, γ секции показаны на рис. 2). При наклоне поверхности водяной поток со скоростью $V_{\eta,\gamma}$ перетекает на соседние секции (скорость потока может изменяться в зависимости от углов наклона ($\alpha_{\eta,\gamma}$ и $\beta_{\eta,\gamma}$)).

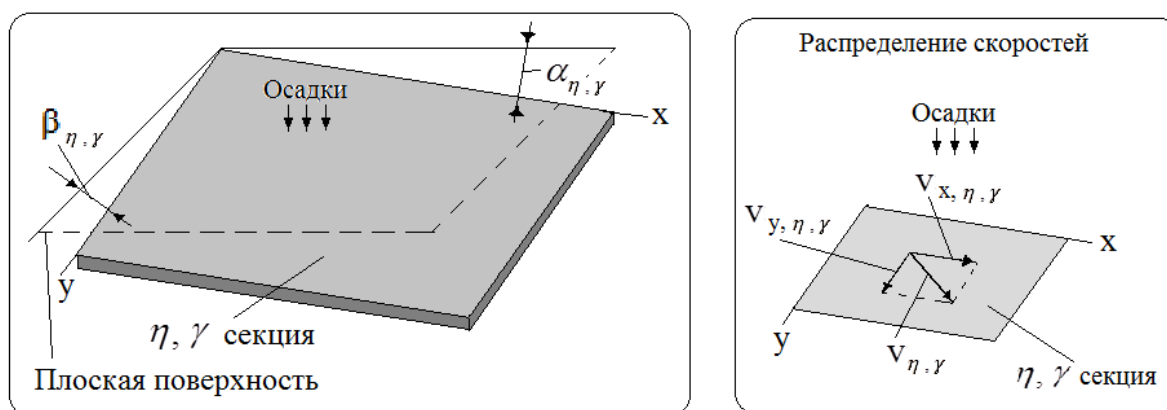


Рис. 2. Схема выпадения осадков и распределения скоростей потока

Fig. 2. Precipitation pattern and flow velocity distribution

За время Δt коэффициент перетекания по осям x и y составит:

$$\begin{aligned} k_{px, \eta, \gamma} &= (\Delta x / v_{x, \eta, \gamma}(\alpha_{\eta, \gamma})) \cdot \Delta \tau, \quad (k_{px, \eta, \gamma} \leq 1), \\ k_{py, \eta, \gamma} &= (\Delta y / v_{y, \eta, \gamma}(\beta_{\eta, \gamma})) \cdot \Delta \tau, \quad (k_{py, \eta, \gamma} \leq 1). \end{aligned} \quad (1)$$

Методика моделирования процессов при выпадении осадков на наклонную поверхность (рис. 2) распадается на следующие этапы.

Полагая в начальный момент $\tau=0$,

$$h_{b, \eta, \gamma} = 0; \quad 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y.$$

Запишем для текущего времени $\tau=\tau+\Delta t$ алгоритм вычисления среднего уровня слоя воды:

1. Средний уровень слоя воды в квадрате $\Delta x \cdot \Delta y$ при интенсивности потока I , с учетом углов наклона рассматриваемого квадрата по пространственным координатам, без учета перетекания, за время Δt определяется из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} h_{b, \eta, \gamma} &= h_{b, \eta, \gamma} + I \cdot (\Delta x \cdot \cos(\alpha_{\eta, \gamma}) \cdot \Delta y \cdot \cos(\beta_{\eta, \gamma})) \cdot \Delta \tau / (\Delta x \cdot \Delta y) = \\ &= I \cdot \cos(\alpha_{\eta, \gamma}) \cdot \cos(\beta_{\eta, \gamma}) \cdot \Delta \tau, \quad 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y. \end{aligned} \quad (2)$$

Перетекание уровня слоя воды по координатам x, y за время Δt составит:

$$\begin{aligned} h_{вrx, \eta, \gamma} &= I \cdot \cos(\alpha_{\eta, \gamma}) \cdot \Delta \tau \cdot k_{p, \eta, \gamma}, \quad 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y, \\ h_{вру, \eta, \gamma} &= I \cdot \cos(\alpha_{\eta, \gamma}) \cdot \Delta \tau \cdot k_{p, \eta, \gamma}, \quad 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y. \end{aligned} \quad (3)$$

2. Средний уровень слоя воды в (η, γ) секциях, с учетом перетекания по координатам x, y ($h_{вrx, \eta, \gamma}$, $h_{вру, \eta, \gamma}$), за время Δt определяется из соотношений:

$$\begin{aligned} h_{b, \eta, \gamma} &= I \cdot \cos(\alpha_{\eta, \gamma}) \cdot \Delta \tau - h_{вrx, \eta, \gamma} - h_{вру, \eta, \gamma}, \\ \text{if } h_{b, \eta, \gamma} < 0 &\text{ then } h_{b, \eta, \gamma} = 0, \\ 1 < \eta < N_x; \quad 1 < \gamma < N_y. \end{aligned} \quad (4)$$

3. Рассмотрим случай, когда перетекание осуществляется из верхних секций в секции, которые расположены «ниже». Определим средний уровень слоя воды в «нижних» секциях $h_{в,\eta,\gamma}$:

$$h_{в,\eta,\gamma} = h_{вр,\eta,\gamma} + h_{врх,\eta-1,\gamma} + h_{врy,\eta,\gamma-1},$$

$$2 < \eta < N_x; 2 < \gamma < N_y. \quad (5)$$

4. В рассматриваемый алгоритм следует добавить граничные условия, описывающие изменение уровня в граничных секциях:

$$\begin{aligned} \eta &= 1, 1 < \gamma < N_y; \\ \eta &= N_x, 1 < \gamma < N_y; \\ \gamma &= 1, 1 < \eta < N_x; \\ \gamma &= N_y, 1 < \eta < N_x. \end{aligned} \quad (6)$$

Предложим, что процессы, происходящие на границах 1 и 2 (рис. 3), не влияют на процессы в рассматриваемой области (водяные потоки не попадают на рассматриваемую поверхность). Дискретная модель, описывающая процессы на рассматриваемой границе, записывается в виде:

$$\begin{aligned} h_{в,\eta,\gamma} &= h_{в,\eta,\gamma}, \\ \eta &= 1, 1 < \gamma < N_y; \\ \gamma &= 1, 1 \leq \eta \leq N_x. \end{aligned} \quad (7)$$

Если осуществляется взаимодействие процессов, происходящих на границах 1, 2, то эти взаимодействия следует учесть в рассматриваемом алгоритме.

Процессы, происходящие на границах 3 и 4 в рассматриваемом примере, учтены в п. 2.

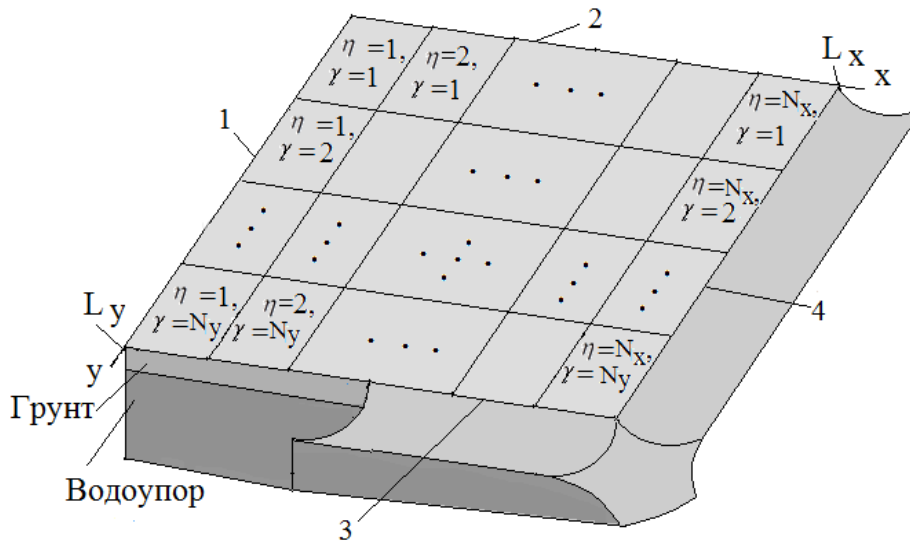


Рис. 3. Схема моделирования гидролитосферных процессов

Fig. 3. Scheme of modeling hydrolithospheric processes

Рассмотрим пример моделирования гидролитосферных процессов для объекта, схема которого приведена на рисунке 3.

1. Будем полагать, что не осуществляется перетекание потока в грунтовые воды. Значения геометрических параметров рассматриваемого объекта приведены ниже.

Таблица 1. Значения геометрических параметров объекта

Table 1. Values of geometric parameters of the object

	Обозначения	Размер, м
Длина моделируемой области	L_x	120
Ширина моделируемой области	L_y	140

Углы наклона по координатам x и y и скорости перетекания соответственно равны:

$$\alpha_{\eta\gamma} = \pi/7 \text{ рад.}, \beta_{\eta\gamma} = \pi/8 \text{ рад.}; v_{x,\eta\gamma} = 0.004 \text{ м/сек.}, v_{y,\eta\gamma} = 0.002 \text{ м/сек.}$$

На рисунках 4, 5 приведены графики изменения среднего уровня слоя воды в зависимости от продолжительности выпадения осадков.

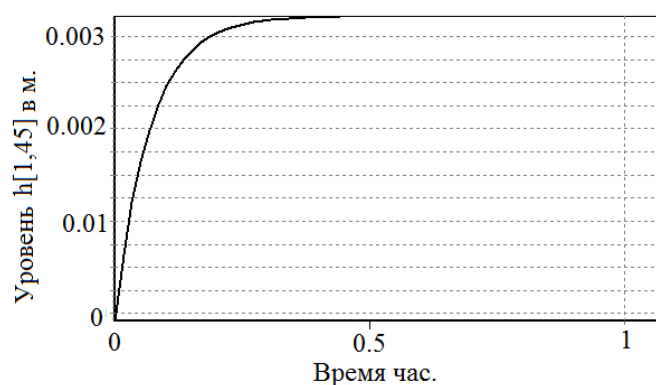


Рис. 4. Средний уровень изменения слоя воды в точке [1,45]

Fig. 4. Average level of change of water layer at point [1.45]

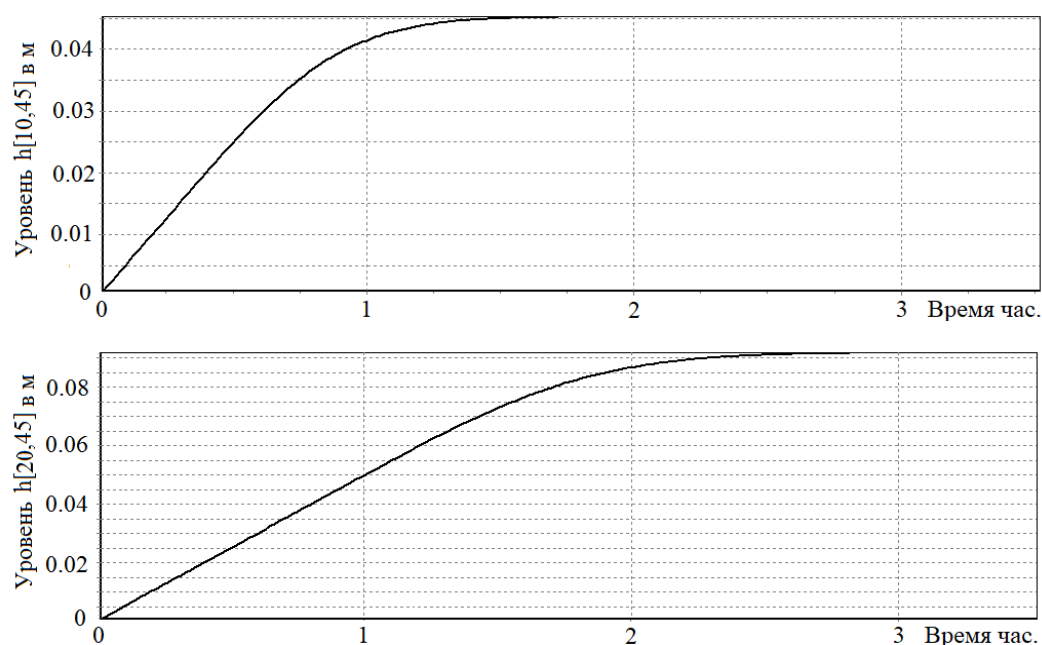


Рис. 5. Средний уровень изменения слоя воды в точках [10,45] и [20,45]

Fig. 5. Average level of change of water layer at points: [10.45] and [20.45]

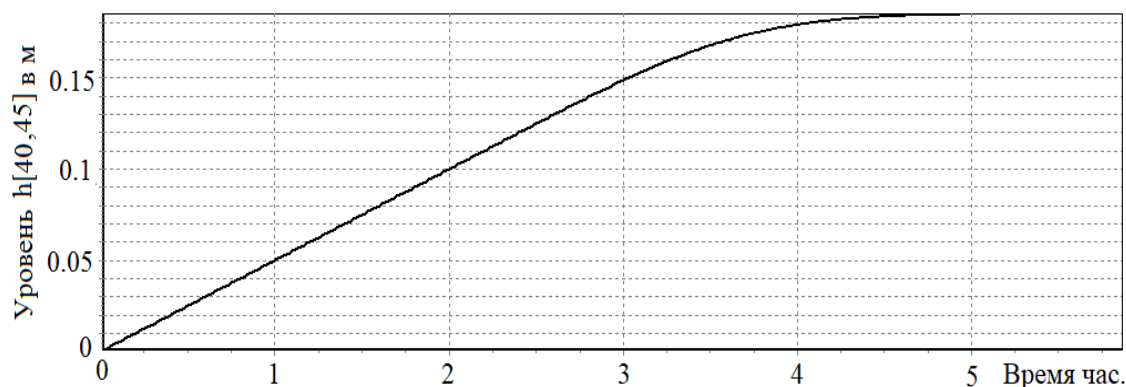


Рис. 6. Средний уровень изменения слоя воды в точке [40,45]

Fig. 6. Average level of change of water layer at point [40,45]

2. Будем полагать, что осуществляется перетекание потока в грунтовые воды.

Геометрические параметры моделируемой области приведены в таблице 1. Полагая, что через поверхностный слой осуществляется перетекание воды в грунт (коэффициент перетекания b_n), математическая модель рассматриваемого процесса записывается в виде:

$$\begin{aligned} h_b(x, y, L_{z_1}, \tau) &= h_g(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_n \cdot (h_1(x, y, 0, \tau) - h_g(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau, \\ h_1(x, y, 0, \tau) &= h_1(x, y, 0, \tau) - b_n \cdot (h_1(x, y, 0, \tau) - h_g(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau. \end{aligned} \quad (8)$$

В соответствии с [1–3] запишем уравнения, описывающие гидролитосферный процесс в слое грунта:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= k_{1,x} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \cdot \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}, \\ k_{1,x} &= \bar{K}_x \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,y} = \bar{K}_y \cdot h_{cp} / \mu, \quad k_{1,z} = \bar{K}_z \cdot h_{cp} / \mu, \\ 0 &< x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z. \end{aligned} \quad (9)$$

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 $\text{м}^2/\text{сут}$; $\bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{K}_z$ – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам; h_{cp} – средний уровень грунтовых вод; μ – коэффициент грунтовой водоотдачи; L_x, L_y, L_z – заданные значения (см. табл. 1 и 2).

Таблица 2 / Table 2

Толщина грунта	L_z	0.4
Высота грунтовых вод		0.0 м

Численные значения физических параметров при моделировании рассмотренных выше процессов приведены в таблице 3.

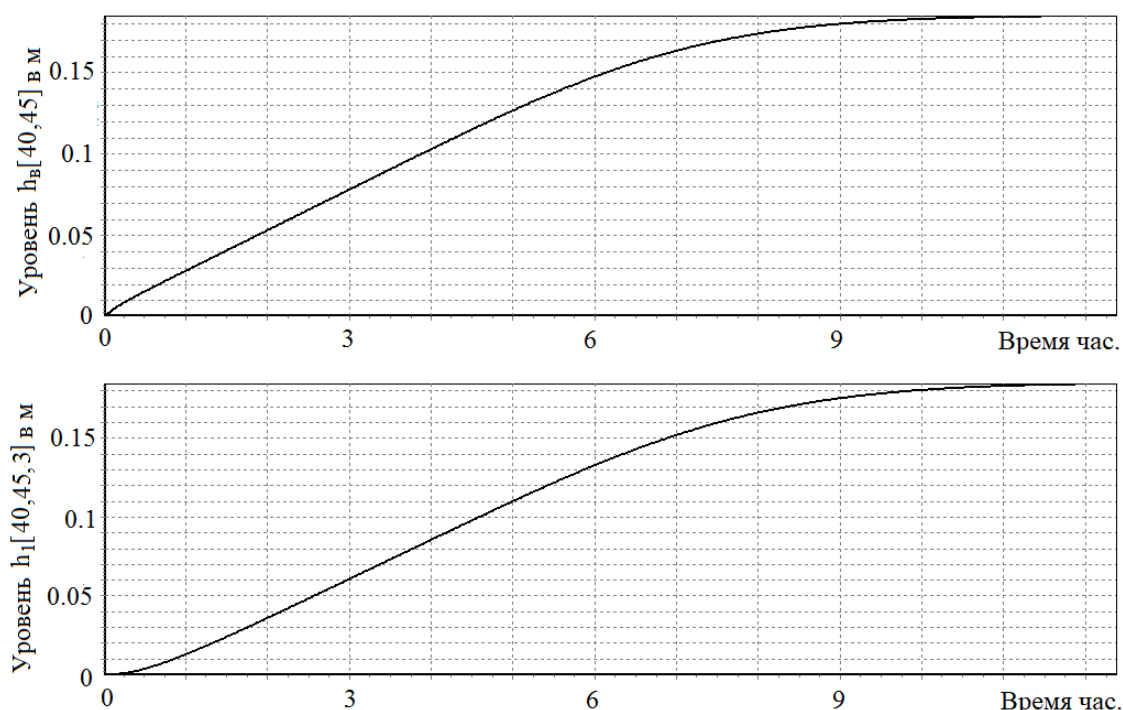
Таблица 3. Значения физических параметров грунтовых вод**Table 3.** Values of physical parameters of groundwater

Грунтовые воды
$k_{x1}=3.92/86400$ $k_{y1}=3.92/86400$ $k_{z1}=2.52/86400$ $b_n=0.006,$

где k_x, k_y, k_z – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам;

b_n – коэффициент перетекания (значения параметров приведены в системе «СИ»).

Число точек дискретизации пространственной координаты z и шаг дискретизации были заданы в виде: $N_z = 9$; $dz = L_z/(N_z-1)$ (остальные параметры, используемые при моделировании рассматриваемого процесса, приведены в п. 1).

**Рис. 7.** Графики изменения уровня в выбранных точках**Fig. 7.** Graphs of level changes at selected points

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемая методика моделирования гидrolитосферных процессов при выпадении осадков в зоне формирования эрозионных процессов позволяет прогнозировать развитие рассматриваемых процессов и определить перечень мероприятий, препятствующих негативному развитию процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering –

Power Supply of Mining Companies, Saint-Petersburg, 23–24 march 2017. Saint-Petersburg, 2017. 87(3). P. 032029. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032029

2. *Георгиева М. А.* Системный анализ эрозивно-русовых процессов // Современная наука и инновации. 2023. № 4. С. 32–40. DOI: 10.37493/2307-910X.2023.4.4

3. *Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И.* Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 7(168). С. 126–138.

4. *Drovosekova T.I., Pershin I.M.* Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiye Mineralnye Vody (Caucasus Mineral Springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, Saint Petersburg, may 25–27, 2016. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Pp. 215–217. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519732

5. *Георгиева М. А.* Разработка алгоритма управления эрозийными процессами в русовой подсистеме горных и предгорных ландшафтов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 1–2. С. 23–26. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.01-2.05

6. *Першин И. М., Малков А. В., Криштал В. А.* Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. 2013. № 1(1). С. 17–23.

7. *Першин И. М., Помеляйко И. С.* Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза курорта Кисловодск // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3(36). С. 74–80.

8. *Першин И. М., Веселов Г. Е., Першин М. И.* Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. Таганрог, 5–9 октября 2015 года. Таганрог: Южный федеральный университет, 2015. С. 106–117.

9. *Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V. [et al.]* Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, St. Petersburg, 30 October 2019 – 01 November 2019. St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Pp. 77–80. DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973323

10. *Малков А. В., Першин И. М.* Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы Кавказских Минеральных Вод // Школа кавказского гостеприимства: перспективы развития и кадровое обеспечение: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Пятигорск, 20–21 апреля 2018 года. Том II. Пятигорск: Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. С. 19–24.

11. *Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A.* Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, January 26–28, 2021. Moscow, 2021. Pp. 975–978. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396273

12. *Малков А. В., Першин И. М.* Системный анализ гидролитосферных процессов: учебное пособие. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. 96 с.

REFERENCES

1. *Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems. Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering –

Power Supply of Mining Companies, Saint-Petersburg, 23–24 march 2017. Saint-Petersburg, 2017. 87(3). P. 032029. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032029

2. Georgieva M.A. Systems analysis of erosion-channel processes. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovation]. 2023. No. 4. Pp. 32–40. DOI: 10.37493/2307-910X.2023.4.4. (In Russian)

3. Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I. Approximation models of transfer functions of distributed objects. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of SFedU. Technical sciences]. 2015. No. 7(168). Pp. 126–138. (In Russian)

4. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiy Mineralnye Vody (Caucasus Mineral Springs). Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, Saint Petersburg, may 25–27, 2016. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Pp. 215–217. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519732

5. Georgieva M.A. Development of an algorithm for controlling erosion processes in the channel subsystem of mountain and foothill landscapes. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy teorii i praktiki. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences]. 2022. No. 1–2. Pp. 23–26. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.01-2.05. (In Russian)

6. Pershin I.M., Malkov A.V., Krishtal V.A. Construction of a control system for the parameters of operation of a mineral water extraction system in the Caucasian Mineral Waters region. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern Science and Innovations]. 2013. No. 1(1). Pp. 17–23. (In Russian)

7. Pershin I.M., Pomelyayko I.S. System analysis of the ecological state of the hypergenesis zone of the Kislovodsk resort. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasian Federal University]. 2013. No. 3(36). Pp. 74–80. (In Russian)

8. Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I. Methods of approximation of transfer functions of distributed objects. *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: sbornik nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. Taganrog, 05–09 oktyabrya 2015 goda* [System synthesis and applied synergetics: Collection of scientific papers of the VII All-Russian scientific conference. Taganrog, October 5–9, 2015]. Taganrog: Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2015. Pp. 106–117. (In Russian)

9. Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V. et al. Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes. Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, St. Petersburg, 30 October 2019 – 01 November 2019. St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Pp. 77–80. DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973323

10. Malkov A.V., Pershin I.M. Problems of environmental safety of the hydromineral base of the Caucasian Mineral Waters. *Shkola kavkazskogo gostepriimstva: perspektivy razvitiya i kadrovoye obespecheniye: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pyatigorsk, 20–21 aprelya 2018 goda* [School of Caucasian hospitality: development prospects and staffing: materials of the All-Russian scientific and practical conference. Pyatigorsk, April 20–21, 2018]. Vol. II. Pyatigorsk: Severo-Kavkazskiy federal'nyy universitet, 2018. Pp. 19–24. (In Russian)

11. Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters. Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, January 26–28, 2021. Moscow, 2021. Pp. 975–978. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396273

12. Malkov A.V., Pershin I.M. *Sistemnyy analiz gidrolitosfernykh protsessov* [Systems analysis of hydrolithospheric processes]: Textbook. Stavropol: Severo-Kavkazskiy federal'nyy universitet, 2015. 96 p. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Георгиева Марьяна Альбековна, аспирант института компьютерных технологий и информационной безопасности, кафедра синергетики и процессов управления им. профессора А. А. Колесникова, Южный федеральный университет;

347922, Россия, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корпус «И»;

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и информационной безопасности, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова;

360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173;

maryana.g@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2134-6719>, SPIN-код: 8765-7500

Першин Иван Митрофанович, д-р тех. наук, профессор кафедры синергетики и процессов управления им. профессора А. А. Колесникова института компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет;

347922, Россия, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корпус «И»;

ivmp@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7618-1173>, SPIN-код: 2734-5711

Information about the authors

Mariana A. Georgieva, Postgraduate Student, Institute of Computer Technologies and Information Security, Department of Synergetics and Control Processes named after Prof. Anatoly Arkadievich Kolesnikov, Southern Federal University;

347922, Russia, Taganrog, 2 Chekhov street, building “I”;

Senior Lecturer, Department of Computer Technologies and Information Security, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov;

360004, Russia, Nalchik, 173 Chernyshevsky street;

maryana.g@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2134-6719>, SPIN-code: 8765-7500

Ivan M. Pershin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Synergetics and Control Processes named after Prof. Kolesnikov Anatoly Arkadievich, Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University;

347922, Russia, Taganrog, 2 Chekhov street, building “I”;

ivmp@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7618-1173>, SPIN-code: 2734-5711