

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

УДК 556.535.8:628.3.03:627.5(571.150)



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗНОГО СТОКА КОНСЕРВАТИВНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ НА УЧАСТКЕ РЕКИ ЧАРЫШ

В.Ю. Филимонов¹, А.В. Кудишин², О.В. Ловцкая³, А.В. Дьяченко⁴, К.В. Марусин⁵

^{1,2,3,4,5}Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН); 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

¹vyfilimonov@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

²avkudishin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5613-5778

³lov@iwep.ru; ORCID: 0000-0002-3942-1350

⁴dychenko@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-4178-8415

⁵kat@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-1565-8326

Аннотация. Целью работы является применение методики определения полного массового расхода консервативного загрязнителя и эффективной величины числа Пекле при различных сценариях диффузного загрязнения. На основе гидродинамической модели участка реки Чарыш произведен расчет прямой и обратной задачи определения полного массового расхода консервативного загрязнителя при различных сценариях диффузного загрязнения. Расчет обратной задачи выполнен с использованием методов нелинейной глобальной оптимизации и Монте-Карло на основе полиномиального представления распределения полного массового расхода. Установлено удовлетворительное согласие восстановленных и исходных распределений, при этом получена оценка эффективной величины числа Пекле. Выяснено, что значение эффективной величины числа Пекле находится в интервале его реального изменения.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект № 0306-2021-0002 «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Ключевые слова: диффузное загрязнение, расход загрязнителя, обратная задача, глобальная оптимизация, метод Монте-Карло

Формат цитирования: Филимонов В.Ю., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Моделирование диффузного стока консервативных загрязнителей на участке реки Чарыш // Прироообустроство. 2025. № 5. С. 99-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

Original article

MODELING OF DIFFUSE RUNOFF OF CONSERVATIVE POLLUTANTS IN THE CHARYSH RIVER SECTION

В.Ю. Филимонов¹, А.В. Кудишин², О.В. Ловцкая³, А.В. Дьяченко⁴, К.В. Марусин⁵

^{1,2,3,4,5}Институт водных и экологических проблем, Сибирский отделение Российской академии наук (ИВЭП СО РАН); 1 Molodezhnaya str., Barnaul, 656038, Russia

¹vyfilimonov@rambler.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

²avkudishin@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5613-5778

³lov@iwep.ru; ORCID: 0000-0002-3942-1350

⁴dychenko@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-4178-8415

⁵kat@iwep.ru; ORCID: 0000-0003-1565-8326

Abstract. Based on the hydrodynamic model of the Charysh River section, the calculation of the direct and inverse problem of determining the total mass flow rate of a conservative pollutant under various scenarios of diffuse pollution was carried out. The calculation of the inverse problem was performed using nonlinear global optimization and Monte Carlo methods based on a polynomial representation of the distribution of the total mass flow rate. A satisfactory agreement between the reconstructed and initial distributions was established, and an estimate of the effective value of the Peclet number was obtained. It was found that the value of the effective Peclet number is within the range of its real change.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS ((project No 0306-2021-0002) “Studying the mechanisms of natural and anthropogenic changes

in the quantity and quality of Siberian water resources using hydrological models and information technologies").

Keywords: diffuse pollution, pollutant flow rate, inverse problem, global optimization, Monte Carlo method

Citation format: Filimonov V.Yu., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V. Modeling of diffuse runoff of conservative pollutants in the Charysh River section // Prirodoobustroystvo. 2025. № 5. P. 99-105. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-99-105>

Введение. Диффузный сток загрязнителей, поступающих в русла рек с обширных водосборных территорий, является серьезной экологической проблемой, поскольку в данном случае процесс загрязнения не контролируется и не регулируется [1-3]. Согласно этой точке зрения возникает необходимость экологического мониторинга процессов стока, который должен быть неразрывно связан с математическим моделированием.

Для количественного анализа степени диффузного загрязнения используются данные о распределении концентрации того или иного растворенного загрязнителя на исследуемом участке водотока, которые могут быть получены в результате натурных измерений [4-7]. Однако это не дает возможности определения расходных характеристик стока – таких, как удельный и полный массовый расход загрязнителя на исследуемом участке, которые определяют сток. Для решения указанной задачи используются математические методы, связанные с решением обратных задач для уравнения адвекции-диффузии [8-11].

В приведенных исследованиях решается математическая задача восстановления распределения удельного массового расхода при заданной величине числа Пекле (в данном случае – отношение характерного времени диффузии ко времени добрегания между створами на исследуемом участке). Однако априорное значение продольной дисперсии (через которую определяется число Пекле) определяется большим количеством различных полуэмпирических формул [12-15]. При этом, как следует, например, из работы [12], расчетное значение этой величины может на порядки отличаться от найденного экспериментально. Наиболее разумным выходом в данной ситуации является определение эффективного значения указанной величины непосредственно из данных натурных измерений на исследуемом участке на основе реальной русловой модели.

Цель исследований: применение методики определения полного массового расхода консервативного загрязнителя и эффективной величины числа Пекле при различных сценариях диффузного загрязнения. В основу расчета

положена гидродинамическая модель участка реки Чарыш (РФ, Алтайский край). При расчете использовались метод нелинейной глобальной оптимизации и метод Монте-Карло.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – участок реки Чарыш в ее нижнем течении от гидрологического поста Белоглазово до гидрологического поста свх. Чарышский у с. Усть-Калманки (рис. 1а). Протяженность участка по руслу составляет 93,5 км, по долине реки – 64,8 км. Компьютерная 1DH-модель разработана на базе программного комплекса НЕС-RAS5.0 [16] для прогноза половодий и паводков. В рамках используемого 1DH-приближения рельеф пойменно-руслового комплекса описывается набором поперечных сечений (створов), рассредоточенных по длине участка. Модель состоит из 34 поперечных профилей. В общем случае линия профиля не является прямой, ее русловой сегмент расположен по нормали к направлению течения в русле (рис. 1б). Протяженность створов составляет от 0,6 до 6 км. Данные о высотных отметках рельефа по линиям створов в русловой части взяты из результатов гидрографических работ ИВЭП СО РАН, выполненных в 2018 г. (рис. 1в).

На рисунке 2 приведены соответствующие распределения скоростей течения, полученные при использовании гидродинамической модели [16].

Результаты и их обсуждение. Прямая задача. Для решения прямой задачи использовалось одномерное уравнение адвекции-диффузии в обезразмеренной форме [17]:

$$\frac{d\theta}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{d\theta}{dz} \right) = \tilde{\varphi}(z); \quad \theta(0) = 0; \quad \theta(1) = \theta_1. \quad (1)$$

Здесь введены в рассмотрение обезразмеренные величины:

$$z = x / L; \quad \theta = (c - c_A) / c_A; \quad \alpha = VL / E;$$

$$\tilde{\varphi}(z) = L\varphi(z) / Qc_A,$$

где α – число Пекле; x – координата вдоль русла, м; L – длина рассматриваемого участка, м; c – концентрация, кг/м³; c_A – концентрация на верхнем створе участка, кг/м³; V – скорость течения, м/с; E – коэффициент продольной дисперсии загрязнителя, м²/с; Q – расход воды, м³/с; $\varphi(z)$ – удельный массовый расход загрязнителя, кг/м × с.

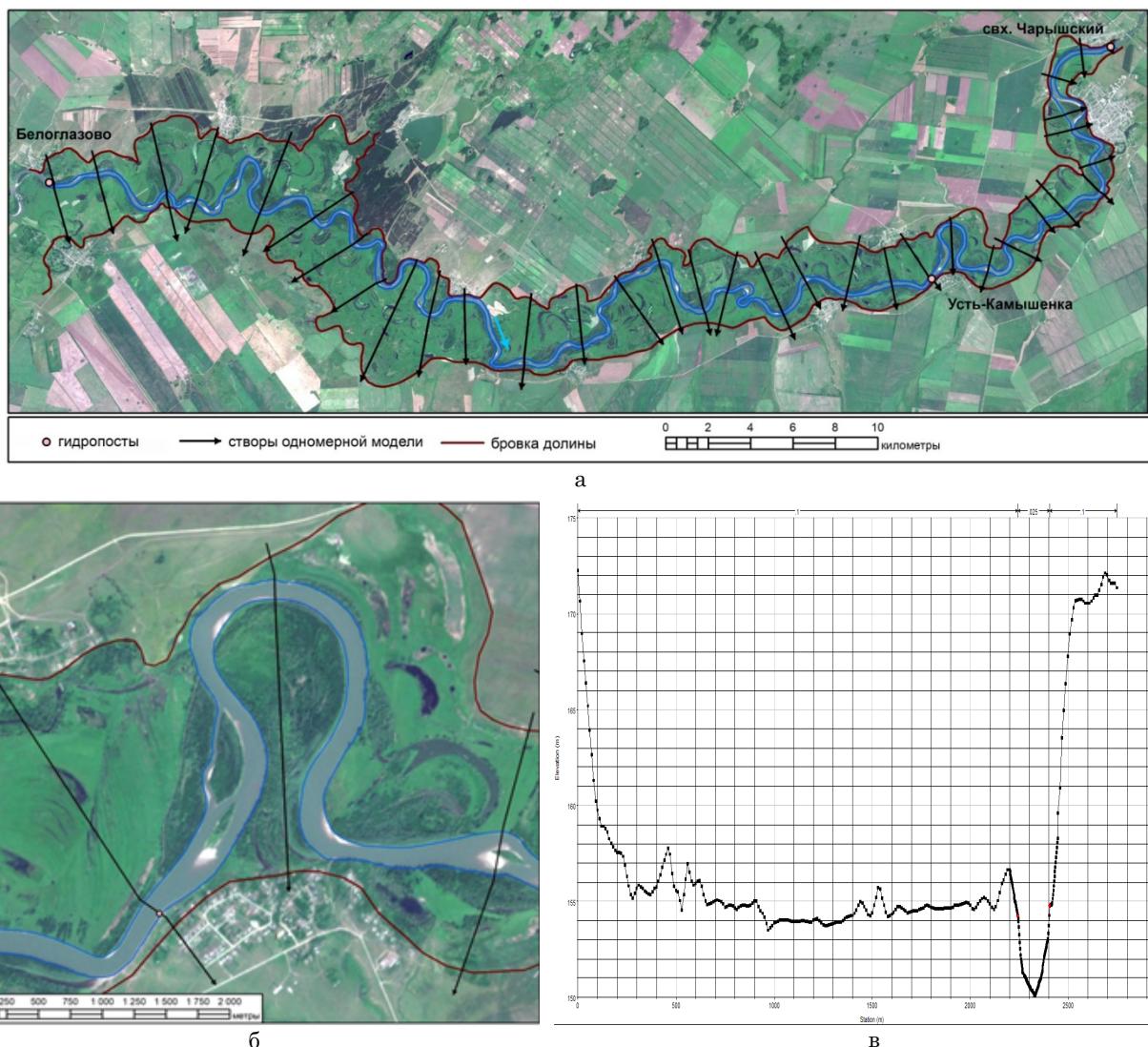


Рис. 1. Река Чарыш на участке Белоглазово – Усть-Калманка и ее представление в одномерной (1D) компьютерной модели гидродинамики руслового потока:

а) общий вид; б) створы одномерной модели в районе с. Усть-Камышенка;

в) представление в HEC-RAS поперечного профиля русла и поймы в створе гидропоста Усть-Камышенка

Fig. 1. The Charysh River in the Beloglazovo – Ust-Kalmanka section and its representation in a one-dimensional (1D) computer model of channel flow hydrodynamics:

а) general view; б) cross-sections of the one-dimensional model in the area the Ust-Kamyshenka village; в) presentation in HEC-RAS of the cross-section of the channel and floodplain in the site of the Ust-Kamyshenka

Расчет прямой задачи (1) производился при различных сценариях загрязнения, которые определяются тестовыми функциями:

$$\tilde{\varphi}(z) = 0.2e^z + 0.2z^4; \quad (2)$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0.2 + 0.2e^{-\left(\frac{z-0.3}{0.1}\right)^2} + 0.45e^{-\left(\frac{z-0.7}{0.3}\right)^2}. \quad (3)$$

Наряду с удельным массовым расходом был введен в рассмотрение полный массовый расход, определяющий количество загрязнителя, поступающего в русло за единицу времени на интервале от 0 до z :

$$\tilde{\Phi}(z) = \int_0^z \tilde{\varphi}(z) dz. \quad (4)$$

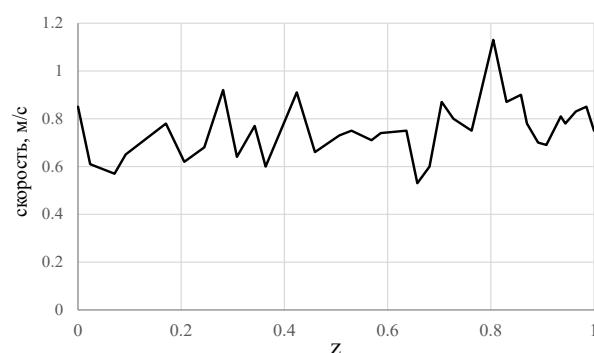


Рис. 2. Распределение скоростей течения на исследуемом интервале при величине расхода $Q = 274 \text{ м}^3/\text{s}$

Fig. 2. Distribution of flow rates in the studied interval at a water discharge value $Q=274 \text{ m}^3/\text{s}$

Результаты расчета прямой задачи (1) для тестовых функций (2), (3) с учетом величины скорости течения (рис. 2) представлены на рисунке 3.

Обратная задача. Целью решения обратной задачи являлось восстановление полного массового расхода (4) как функции координаты и нахождения эффективного значения числа Пекле $\alpha_{\text{эфф}}$ по известному распределению $\theta(z)$. В соответствии с работой [17] решение краевой задачи (1) можно представить в виде:

$$\theta(z, \alpha_{\text{эфф}}) = \frac{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1} \left(\theta_1 + \alpha_{\text{эфф}} e^{\alpha_{\text{эфф}} z} \int_0^1 \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha_{\text{эфф}} \xi} d\xi \right) - \alpha_{\text{эфф}} e^{\alpha_{\text{эфф}} z} \int_0^z \tilde{\Phi}(\xi) e^{-\alpha_{\text{эфф}} \xi} d\xi. \quad (5)$$

Здесь $\alpha_{\text{эфф}}$ – эффективное значение числа Пекле на исследуемом интервале. Для решения обратной задачи зависимость $\tilde{\Phi}(\xi)$ представлялась в виде полинома:

$$\tilde{\Phi}(\xi) = \sum_{n=1}^m a_n \xi^n. \quad (6)$$

Тогда решение (5) может быть получено аналитически и представлено в виде разложения по набору функций $H_n(z, \alpha)$:

$$\theta(z, \alpha_{\text{эфф}}) = H_0(z, \alpha_{\text{эфф}}) + \sum_{n=1}^m a_n H_n(z, \alpha_{\text{эфф}}), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} H_0(z, \alpha_{\text{эфф}}) &= \theta_1 \frac{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}; \quad H_1(z, \alpha_{\text{эфф}}) = z - \frac{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}; \\ H(z, \alpha_{\text{эфф}}) &= \left[z + \frac{2}{\alpha_{\text{эфф}}} z - \left(1 + \frac{2}{\alpha_{\text{эфф}}} \right) \frac{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1} \right]; \\ H(z, \alpha_{\text{эфф}}) &= \left[z + \frac{3z}{\alpha_{\text{эфф}}} + \frac{6z}{\alpha_{\text{эфф}}^2} - \left(1 + \frac{3}{\alpha_{\text{эфф}}} + \frac{6}{\alpha_{\text{эфф}}^2} \right) \frac{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1}{e^{\alpha_{\text{эфф}} z} - 1} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

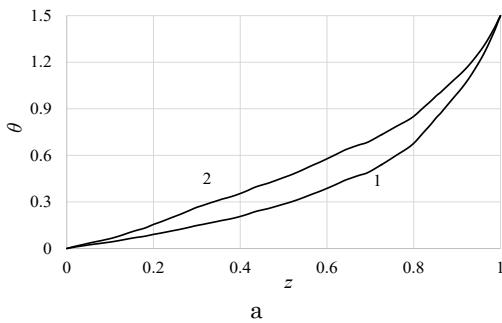


Рис. 3. Распределение концентрации загрязнителя (а) и полного массового расхода (4) (б) для исследуемого участка реки Чарыш:

1 – функция (2); 2 – функция (3).

Расчетное значение коэффициента продольной дисперсии $E = 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, величина концентрации загрязнителя в нижнем створе $\theta_1 = 1,5$

Fig.3 Distributions of pollutant concentration (a) and total mass flow rate (4) (b) for the studied section of the Charysh River.

1 – function (2), 2 – function (3).

The calculated value of the longitudinal dispersion coefficient $E=10^4 \text{ m}^2/\text{s}$, the value of pollutant concentration in the lower section $\theta_1=1.5$

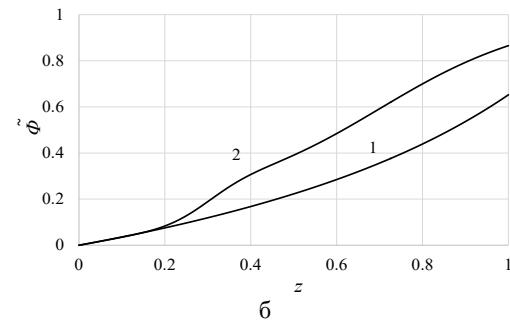
Для расчета зависимости $\tilde{\Phi}(z)$ решалась обратная задача определения неизвестного параметра $\alpha_{\text{эфф}}$ и коэффициентов a_n полинома (6). Параметры модели a_n определялись из условия минимизации функционала:

$$S = \sum_{i=1}^k (\theta(z_i, \omega) - \theta_i)^2 \rightarrow \min_{\omega}, \quad (9)$$

где $\theta(z_i, \omega)$ – расчетное значение концентрации на основе формулы (7); θ_i – известное (измеренное) значение концентрации; ω – вектор параметров $(\alpha_{\text{эфф}}, a_1 \dots a_m)$, минимизирующий функционал S .

Суммирование в формуле (9) проводится по числу расчетных точек, число которых равно k . Неизвестные параметры определялись из представления (6), (7) с использованием методов глобальной оптимизации [18, 19]. Для учета возможных случайных отклонений от измеренных значений концентрации (рандомизация) был реализован метод Монте-Карло.

Рандомизация проводилась следующим образом. Для каждой точки $\theta_i(z_i)$ точного решения в интервале $\Delta \theta_i = \pm 0,05$ с помощью генератора случайных чисел задавалось значение концентрации. Применение метода Монте-Карло основывалось на рассмотрении $N = 1000$ различных реализаций случайного разброса точек в заданном интервале и вычислении средних значений соответствующих параметров $\alpha_{\text{эфф}}$, a_n [20]. Расчет показывает, что полином третьей степени (6) дает наиболее точные результаты. Более высокие степени полинома приводят к неустойчивым и физически нереализуемым значениям параметров $\alpha_{\text{эфф}}, \tilde{\Phi}(1)$.



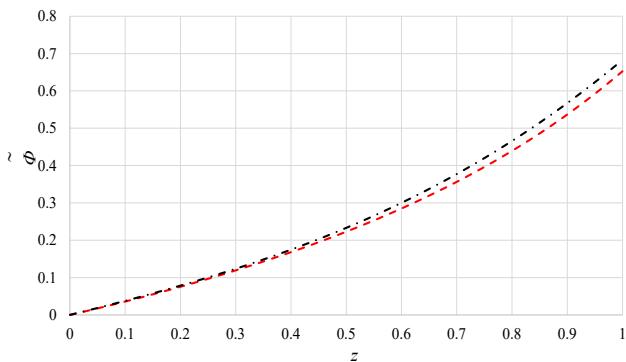


Рис. 4. Распределение полного массового расхода загрязнителя для функции (2): красная кривая – точное решение (рис. 3); черная кривая – решение обратной задачи (9) для полинома третьей степени с использованием метода Монте-Карло

Fig. 4. Distribution of the total mass flow rate of the pollutant for function (2)

The red curve is the exact solution (Fig. 3); the black curve is the solution of the inverse problem (9) for a third-degree polynomial using the Monte Carlo method

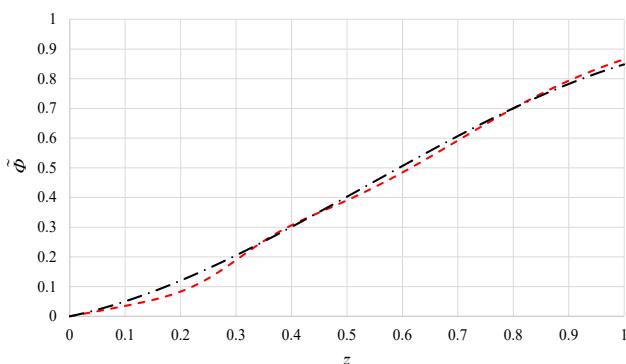


Рис. 5. Распределение полного массового расхода загрязнителя для функции (3): красная кривая – точное решение (рис. 5); черная кривая – решение обратной задачи (9) для полинома третьей степени с использованием метода Монте-Карло

Fig. 5. Distribution of the total mass flow rate of the pollutant for function (3)

The red curve is the exact solution (Fig. 5); the black curve is the solution of the inverse problem (9) for a third-degree polynomial using the Monte-Carlo method

Выводы

1. На основе стационарного уравнения адвекции-диффузии произведено решение прямой задачи для диффузного стока загрязнителя на всем исследуемом интервале реки Чарыш с использованием гидродинамической модели русла. Расчет производился для двух различных сценариев загрязнения (тестовых функций) при

На рисунках 4, 5 приведены результаты расчета обратной задачи для рассмотренных сценариев загрязнения (2), (3).

Как следует из приведенных рисунков, решение обратной задачи восстановления распределения полного массового расхода (6) с использованием рандомизации данных дает хорошее согласие с точным решением для рассмотренных сценариев диффузного загрязнения.

На рисунке 6 представлены распределения числа Пекле и его найденные эффективные значения, полученные в результате решения обратной задачи для рассмотренных тестовых функций.

Как следует из рисунка 6, найденные эффективные значения числа Пекле находятся в интервале реальных значений его изменения.

Таким образом, предложенный метод дает возможность получения разумных значений величин данного параметра.

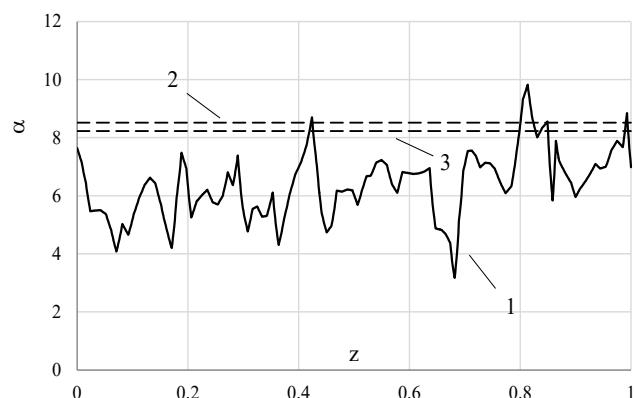


Рис. 6. Распределение значений числа Пекле на исследуемом интервале:

1 – результат моделирования;
2 – эффективное значение числа Пекле для тестовой функции (2);
3 – эффективное значение числа Пекле для тестовой функции (3)

Fig. 6. Distribution of Peclet number values on the studied interval:

1 – simulation result,
2 – effective Peclet number value for test function (2),
3 – effective Peclet number value for test function (3)

заданном значении коэффициента продольной дисперсии.

2. На основе решения прямой задачи с использованием метода глобальной оптимизации и метода Монте-Карло проведено восстановление распределения полного массового расхода загрязнителя и величины числа Пекле. Расчет показал хорошее соответствие восста-

новленного распределения и точного решения задачи.

3. Восстановленные значения эффективного числа Пекле находятся внутри интервала

Список использованных источников

1. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: Российская академия наук. 2020. 512 с.
2. Коронкевич Н.И. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек / Н.И. Коронкевич, С.В. Долгов // Вода и экология, проблемы и решения. 2017. № 4 (72). С. 103-110. EDN: YPORPC
3. Раткович Л.Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / Л.Д. Раткович, В.Н. Маркин, И.В. Глазунова, С.А. Соколова // Природообустройство. 2016. № 3. С. 64-75. EDN: WJLCPP
4. Chueh Yi, Fan C., Huang Y. Copper concentration simulation in a river by SWAT-WASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111613.
5. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. <https://doi.org/10.3390/su15108389>
6. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742-15750. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
7. Ren J., Hao J., Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // Environmental science and pollution research. 2021. V. 28. P. 2904-2913. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>
8. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // Water Resources Research. 2005. V. 41(7). P. 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
9. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // Journal of Computational Physics. 2002. V. 470. 111609. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2002.111609>
10. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Environment Research. 2007. V. 79(10). P. 2032-2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
11. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. V. 25(2). P. 279-308. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
12. Kashefpoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels // Water Research. 2002. V. 36(6). P. 1596-1608. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00351-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7)
13. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D. Molino, B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depthaveraged concentration // Water. 2018. V. 10(4). P. 478. <https://doi.org/10.3390/w10040478>

реальных значений его изменения на исследуемом интервале, что позволяет рассматривать найденную величину как разумную оценку.

References

1. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions / Collective monograph under the guidance of V.I. Danilov-Daniyan. M.: Russian Academy of Sciences, 2020. 512 p.
2. Koronkevich N.I., Dolgov S.V. The runoff from a watershed as a source of diffuse river pollution // Water and Ecology: Problems and Solutions. 2017. No (72). P. 103-110. EDN: YPORPC
3. Ratkovich L.D., Markin V.N., Glazunova I.V., Sokolova S.A. Factors of influence of diffuse pollution on water bodies / L.D. Ratkovich, V.N. Markin, I.V. Glazunova, S.A. Sokolova // Prirodoobustrojstvo. 2016. No 3. P. 64-75. EDN: WJLCPP
4. Chueh Yi, Fan C., Huang Y. Copper concentration simulation in a river by SWAT-WASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111613.
5. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. <https://doi.org/10.3390/su15108389>
6. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742-15750. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016>
7. Ren J., Hao J., Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China // Environmental science and pollution research. 2021. V. 28. P. 2904-2913. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3>
8. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach // Water Resources Research. 2005. V. 41(7). P. 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004wr003754>
9. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations // Journal of Computational Physics. 2002. V. 470. 111609. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2002.111609>
10. Chen Y., Lin L.S., Viadero R.C., Gang D.D. Nonpoint Source Pollution // Water Environment Research. 2007. V. 79(10). P. 2032-2048. <https://doi.org/10.2175/106143007X218656>
11. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. V. 25(2). P. 279-308. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396>
12. Kashefpoura S.M., Falconer R.A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels // Water Research. 2002. V. 36(6). P. 1596-1608. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00351-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00351-7)
13. Pannone M., Mirauda D., Vincenzo A.D. Molino, B. Longitudinal dispersion in straight open channels: Anomalous breakthrough curves and first-order analytical solution for the depthaveraged concentration // Water. 2018. V. 10(4). P. 478. <https://doi.org/10.3390/w10040478>

14. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooghean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2021. V. 15 (1). P. 1298-1320. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043>
15. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers // Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE2006). Philadelphia, USA.
16. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). 2016. 962 pp.
17. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2023. V. 11(4). P. 14-28. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>
18. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. New York: Springer. 2006. 651 p.
19. Global Optimization Toolbox. User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.
20. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // Computers & Mathematics with Applications. 2010. V. 60(4). P. 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>
14. Goliatt L., Sulaiman S.O., Khedher K.M., Farooghean A.A., Yaseen Z.M. Estimation of natural streams longitudinal dispersion coefficient using hybrid evolutionary machine learning model // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2021. V. 15 (1). P. 1298-1320. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1972043>
15. Gualtieri C., Ciaravino G., Doria G.P. Analysis of longitudinal dispersion equations in streams and rivers // Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE2006). Philadelphia, USA.
16. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). 2016. 962 pp.
17. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plain rivers // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2023. V. 11(4). P. 14-28. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28>
18. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. New York: Springer. 2006. 651 p.
19. Global Optimization Toolbox. User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020. 877 p.
20. Strijov V., Weber G.W. Nonlinear regression model generation using hyperparameter optimization // Computers & Mathematics with Applications. 2010. V. 60(4). P. 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.03.021>

Об авторах

Валерий Юрьевич Филимонов, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>; vyfilimonov@rambler.ru

Алексей Васильевич Кудишин, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-5613-5778. avkudishin@yandex.ru

Ольга Вольфовна Ловцкая, старший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-3942-1350. lov@iwep.ru

Александр Владимирович Дьяченко, научный сотрудник; ORCID: 0000-0003-4178-8415; dychenko@iwep.ru

Константин Валерьевич Марусин, ORCID: 0000-0003-1565-8326; kat@iwep.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Филимонов В.Ю., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за plagiat

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Статья поступила в редакцию / The article was received at the editorial office on 19.02.2025

Одобрена после рецензирования / Accepted after peer review on 13.10.2025

Принята к публикации после доработки / Approved for publication on 13.10.2025

Information about authors

Valery Yu. Filimonov, DSc (Phys-Math), chief researcher; ORCID: 0000-0003-0229-7058. vyfilimonov@rambler.ru

Alexey V. Kudishin, CSc (Phys-Math), senior researcher of; ORCID: 0000-0002-5613-5778. avkudishin@yandex.ru

Olga V. Lovtskaya, senior researcher of; ORCID: 0000-0002-3942-1350. lov@iwep.ru

Alexander V. Dyachenko, researcher; ORCID: 0000-0003-4178-8415, dychenko@iwep.ru

Konstantin V. Marusin, researcher; ORCID: 0000-0003-1565-8326; kat@iwep.ru

Filimonov V.Yu., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript, they have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.