



УДК 556.048(28)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.87>

Оценка погрешности определения максимальных расходов воды на реках Двинско-Печорского бассейнового округа

С. Ю. Почепко, А. Э. Сумачев*

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Л. С. Банщикова

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены характеристики весеннего половодья за 1950–2020 гг. рек бассейнов Северной Двины, Онеги, Мезени и Белого моря. Произведена оценка стационарности максимальных расходов воды и слоев стока весеннего половодья по среднему значению и по дисперсии. Уточнены районные параметры, необходимые для определения максимальных расходов воды весеннего половодья по редуccionной формуле при отсутствии данных гидрологических наблюдений. Произведено районирование территории посредством иерархической кластеризации. По данным наблюдений последних лет актуализировано значение показателя степени редуccionии, величина коэффициента вариации, коэффициента дружности весеннего половодья, параметра, учитывающего неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды, отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту корреляции для выделенных подрайонов. Произведено картирование среднего многолетнего слоя стока весеннего половодья. Оценена погрешность определения максимальных расходов воды на зависимом и независимом материале, проанализирована зависимость величины относительной ошибки от размеров водосбора, величины обеспеченности, количества гидрологических постов в подрайоне. Произведена оценка погрешности определения максимальных расходов воды при использовании устаревших значений районных параметров и различных способов получения нормы слоя стока. Выработаны практические рекомендации по использованию редуccionной формулы.

Ключевые слова: весеннее половодье, максимальные расходы воды, редуccionная формула, слой стока половодья, гидрологические расчеты.

Для цитирования: Почепко С. Ю., Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Оценка погрешности определения максимальных расходов воды на реках Двинско-Печорского бассейнового округа // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 54. С. 87–104. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.87>

Estimation of the Error in Determining the Maximum Water Flow Rates on the Rivers of the Dvinsko-Pechorsky Basin District

S. Yu. Pochepko, A. E. Sumachev*

St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation

L. S. Banshchikova

State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The aim of the study is to develop practical recommendations for determining maximum water discharges in the absence of hydrological observation data using the reduction formula recommended by regulatory documents. The initial data are the maximum water discharge and spring flood runoff layers for 1950–2020 for the rivers of the Northern Dvina, Onega, Mezen, and White Sea basins. The initial data series were assessed for stationarity in terms of mean value and variance according to Student's and Fisher's criteria. The territory was divided into regions using hierarchical cluster analysis. The regional parameters used in the reduction formula were refined based on observations from recent years. The current values of the reduction formula parameters were obtained. Mapping of the average long-term values of spring flood runoff layers has been done. The error in determining maximum water discharge on dependent and independent material has been determined. The dependence of the error on the size of the catchment area, the number of hydrological stations in the sub-region, and other parameters has been assessed. A comparison of the error when using refined and outdated values of the reduction formula parameters and different approaches to determining the layers of spring flood runoff was made. Based on the analysis of the results, a conclusion about the most effective approaches to determining the parameters of the reduction formula for the studied area was made.

Keywords: spring flood, maximum water discharge, reduction formula, flood flow layer, hydrological calculations.

For citation: Pochepko S.Yu., Sumachev A.E., Banshchikova L.S. Estimation of the Error in Determining the Maximum Water Flow Rates on the Rivers of the Dvinsko-Pechorsky Basin District. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 54, pp. 87–104. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.54.87> (in Russian)

Введение

Сток рек является важнейшей гидрологической характеристикой. Для большинства рек Российской Федерации характерно весеннее половодье, во время которого формируются максимальные расходы воды за год. При этом отмечается серьезное влияние климатических изменений на сток рек [Understanding ... , 2014; Changing ... , 2017; Climate ... , 2023]. В [Changing ... , 2019] говорится, что региональные тенденции изменения стока воды в Европе сильно варьируют от увеличения на 11 % до уменьшения на 23 %.

Максимальные расходы воды заданной обеспеченности являются основной расчетной характеристикой как при учете условий формирования стока, так и при решении различных водохозяйственных задач, проектировании гидротехнических сооружений, мостовых переходов веток газопроводов и многих других. При наличии данных гидрологических измерений в проектном створе расходы воды заданной обеспеченности определяются с использованием регламентируемых нормативными документами теоретических

распределений²⁰. Однако гидрометеорологическими наблюдениями охвачена лишь малая часть рек, при этом число гидрологических постов, качество и состав наблюдений снижаются²¹. В случае отсутствия данных гидрологических наблюдений максимальные расходы воды заданной обеспеченности определяются согласно СП 529.1325800.2023 по редуccionной формуле:

$$Q_{\max, P} = \frac{K_0 h_p \mu_p A}{(A + A_1)^n} \delta \delta_1 \delta_2, \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент, характеризующий дружность весеннего половодья; h_p – расчетный слой суммарного весеннего стока без срезки грунтового питания, мм, ежегодной вероятности превышения P , %; μ_p – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды; δ , δ_1 , δ_2 – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно проточных озер, залесенности и заболоченности речных водосборов на максимальные расходы воды; A – площадь исследуемой реки до расчетного створа, км²; A_1 – дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редуccionции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км²; n – районный показатель степени редуccionии.

В состав формулы (1) входит ряд параметров, определяемых по рек-аналогам или картам в пределах гидрологически однородного района, при этом в настоящее время подобных обобщений крайне мало. К примеру, в работе [Шевцов, 2016] для рек бассейна Средней и Нижней Печоры были получены региональные зависимости и параметры. Однако чаще исследователи обращаются к использованию значений районных параметров, приведенных в недействующих в настоящее время нормативных документах [Бельдиман, 2021; Оценка ... , 2021], или методам, позволяющим получать значения максимальных расходов воды без рек-аналогов [Лобанов, Никитин, 2006].

В конце прошлого века разработка и издание федеральных нормативных документов в области проектирования и строительства сопровождалась практически одновременной подготовкой рекомендательных документов, где приводились обобщенные во времени и по районам различные параметры, без которых использование приведенных в официальных нормативных документах формул было невозможно. Последние подобные обобщения были выполнены во второй половине 1970-х гг. и изданы как приложения к СНиП 2.01.14-83²², т. е. данные наблюдений последних 40–50 лет в них не учитываются [Рождественский, Лобанова, 2011]. Использование этих параметров может влиять на погрешность определения максимальных расходов воды, при этом отметим, что сама допустимая погрешность определения макси-

²⁰ Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП 529.1325800.2023. М. : Минстрой России, 2023. 103 с.

²¹ Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2020 году. СПб. : Росгидромет, 2021. 56 с. ; Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2022 году. СПб. : Росгидромет, 2023. 66 с.

²² Строительные нормы и правила. Определение расчетных гидрологических характеристик СНиП 2.01.14-83. М. : Стройиздат, 1985. 36 с.

максимальных расходов воды в СП 529.1325800.2023 не регламентируется. В [Виноградов, Догановский, Обязов, 2019] показано, что даже при наличии данных гидрометеорологических наблюдений погрешность определения максимальных расходов воды может достигать 25 и более процентов. При этом погрешность уменьшается при увеличении числа лет наблюдений и при использовании районных коэффициентов асимметрии, которые в случае их определения по одному посту характеризуются относительно высокой погрешностью. В случае же отсутствия данных наблюдений погрешность определения максимальных расходов воды возрастает и может достигать 30–300 % [Шевцов, 2016; Бельдиман, 2021].

Зарубежный опыт определения максимальных расходов воды неоднозначен. Самым простым и достаточно распространенным методом определения максимальных расходов воды при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений является так называемое рациональное уравнение, согласно которому пиковый максимальный расход равен произведению площади водосбора на интенсивность осадков и коэффициент стока. Последний зависит от типа почв и уклона водосбора и определяется по таблице. Для получения максимальных расходов воды разной обеспеченности используются интенсивности разных обеспеченностей (чаще 10, 4, 2 и 1 %), которые определяются по кривым [Tau, Afshar, 2014]. В данном случае, однако, речь идет, скорее, о максимальных расходах воды дождевых паводков, применительно к условиям исследуемой области следовало бы исходить из величины снегозапасов (или интенсивности их таяния), а не интенсивности выпадения осадков. Другим распространенным в мире методом является TR-55, разработанный Службой охраны природных ресурсов Министерства сельского хозяйства США в 1975 г. и описанный в [Cronshey, 1986]. Данный метод требует небольшого числа входных параметров, среди которых осадки, потери стока на инфильтрацию, максимальный потенциал удержания воды почвой, коэффициент стока. Таким образом, характер стока в основном определяется типом почв, соответственно, при выделении в рамках водосбора подводосборов ошибка определения расходов уменьшается. В [Jacobson, 2019] показано, что рассчитанные по данному методу максимальные расходы воды для некоторых водосборных бассейнов Новой Зеландии превышают реальные на 150–350 %. Сравнение различных подходов к моделированию максимального стока проводится в [Roehr, Kong, 2010].

Цель настоящего исследования – выработка практических рекомендаций по использованию редукционной формулы расчета максимальных расходов воды на реках Двинско-Печорского бассейнового округа. Для достижения цели исследования были решены следующие задачи:

- 1) оценка стационарности и однородности основных характеристик весеннего половодья;
- 2) актуализация районных значений параметров редукционной формулы;
- 3) оценка и сравнение погрешностей определения различными способами максимальных расходов воды заданной обеспеченности при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений и выработка практических рекомендаций по использованию редукционной формулы.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели исследования и решения задач рассмотрены гидрологические характеристики весеннего половодья за период с 1950 по 2020 г. по 25 гидрологическим постам, которые посредством иерархического кластерного анализа были распределены по четырем подрайонам (табл. 1, рис. 1). Основным критерием однородности служил линейный коэффициент корреляции между максимальными расходами воды, а также близость географического положения. Гидрологические посты, максимальные расходы на которых имеют высокий коэффициент корреляции между собой, объединялись в один подрайон.

Таблица 1

Характеристики гидрологических постов

№	Гидрологический пост	А, км ²	Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %
Подрайон 1					
1	р. Вымь – с. Весляна	19 100	<1	11	88
2	р. Нижняя Тойма – д. Метил	1510	<1	1	98
3	р. Пинега – с. Кулогоры	36 700	<1	6	90
4	р. Покшеньга – пос. Сылога	2780	<1	6	92
5	р. Кулой – д. Кулой	3040	2	10	87
6	р. Мезень – д. Макариб	6450	<1	7	90
7	р. Мезень – д. Малонисогорская	56 400	<1	6	90
Подрайон 2					
8	р. Яренга – с. Тохта	4970	<1	2	97
9	р. Виледь – д. Инаевская	4990	<1	2	96
10	р. Пинега – д. Согры	3120	<1	2	95
Подрайон 3					
11	р. Волошка – д. Тороповская	7040	1	8	86
12	р. Кена – д. Коровий двор	5550	5	14	79
13	р. Северная Двина – д. Абрамково	220 000	1	2	90
14	р. Северная Двина – д. Звоз	285 000	1	15	86
15	р. Северная Двина – с. Усть-Пинега	348 000	1	18	82
16	р. Вага – д. Филиевская	13 200	<1	3	92
17	р. Пежма – д. Шелюбинское	1310	0	1	88
18	р. Кулой – д. Хребтовская	1740	<1	8	83
19	р. Вель – д. Баламутовская	4840	<1	2	95
20	р. Устья – с. Бестужево	7210	<1	3	95
21	р. Устья – с. Шангалы	9730	<1	2	95
22	р. Ледь – д. Зеленинская	2240	<1	3	95
Подрайон 4					
23	р. Солза – Сухие пороги	1190	3	20	76
24	р. Мудьюга – д. Патракевская	305	1	17	82
25	р. Кепина – гм.ст.Кепино	1240	1	7	91

Для расчета максимальных расходов воды при отсутствии данных гидрологических наблюдений в целевом створе необходимы сведения о слоях стока весеннего половодья и максимальных расходах воды на действующих гидрологических постах в гидрологически однородном районе²³.

²³ Почепко С. Ю., Сумачев А. Э. База данных характеристик стока весеннего половодья рек Двинско-Печерского бассейнового округа (CSF). Свид-во о гос. регистрации базы данных № 2024621756.

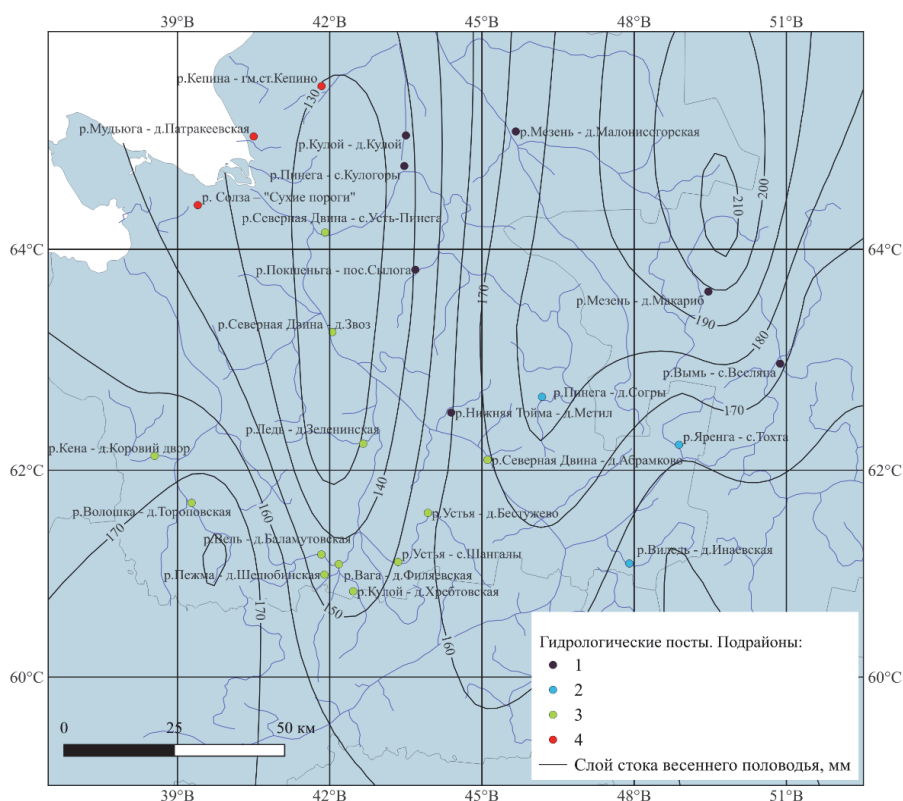


Рис. 1. Норма слоя стока весеннего половодья

Для анализа стационарности слоев стока весеннего половодья и максимальных модулей стока выбранный период наблюдений был разделен на базовый, включавший в себя 1950–1990 гг., и контрольный, в который вошли 1991–2020 гг.²⁴ Проверка рядов на стационарность по среднему значению и по дисперсии осуществлялась с использованием критериев Стьюдента и Фишера соответственно. Расчеты велись при уровне значимости 5 %. Значимость линейного тренда оценивалась по величине коэффициента корреляции. При заданном уровне значимости тренд признавался незначимым, если его значение было ниже критического $R_{крит}$, которое определялось по формуле:

$$R_{крит} = \frac{2}{\sqrt{n+2}}, \quad (2)$$

где n – объем выборки [Малинин, 2008].

В случаях, когда рассматриваются гидрологические характеристики на множестве гидрологических постов, тренды, оцененные за какой-либо месяц, могут оказаться статистически незначимыми (т. е. отклонение выборочного значения коэффициента корреляции от нуля лежит в пределах статистиче-

²⁴ Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. ВМО-№1203. ВМО, 2017. 32 с.

ской погрешности его определения), уменьшение погрешности определения выборочных значений коэффициентов корреляции возможно в случае осреднения их значений по группе рек с похожими условиями формирования стока. Целесообразным является осреднение преимущественно незначимых коэффициентов корреляции. В случаях отсутствия линейных трендов среднее по группе рек значение коэффициента корреляции должно быть равно нулю. Для проверки гипотезы о равенстве среднего значения заданному числу применяется одновыборочный тест Стьюдента [Малинин, 2008]. Для реализации данного подхода рассчитывались средние по группе рек коэффициенты корреляции R_{cp} линейных трендов максимальных расходов воды, которые в случае отсутствия трендов должны быть равны нулю (так как разнонаправленные тенденции, обусловленные погрешностями статистических расчетов, взаимно компенсируются), и среднеквадратическое отклонение коэффициентов корреляции от среднего районного значения σ_R . Эмпирическое значение t статистики рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{R_{cp} - m}{\frac{\sigma_R}{\sqrt{n}}}, \quad (3)$$

где m – теоретическое значение среднего коэффициента корреляции, которое при отсутствии трендов равно нулю.

При вычислении обеспеченных значений максимальных расходов воды и слоев стока весеннего половодья для каждого из рассматриваемых гидрологических постов строились эмпирические кривые обеспеченностей. Они аппроксимировались рекомендуемыми СП 529.1325800.2023 аналитическими кривой Крицкого – Менкеля, параметры для которой подбирались с помощью метода наибольшего правдоподобия, или кривой Пирсона III типа при отрицательных значениях коэффициента асимметрии. Расчет параметров, использующихся в редуccionной формуле, производился по формулам и в соответствии с методическими рекомендациями²⁵.

Определение параметров распределения слоев стока весеннего половодья и коэффициентов дружности весеннего половодья согласно СП 529.1325800.2023 можно производить по соответствующим картам или по рекам-аналогам. Подбор реки-аналога может быть затруднен, так как выбор реки-аналога, основанный только на близких по величинам площадях водосборов, коэффициентах залесенности, озерности и заболоченности, может привести к значительным ошибкам. В связи с этим в настоящей работе в качестве параметров распределения слоев стока весеннего половодья, таких как C_v и C_s/C_v , коэффициентов дружности и коэффициентов μ_R %, принимались их осредненные в пределах подрайонов значения. Коэффициенты дружности весеннего половодья рассчитывались обратным способом из редуccionной формулы. Данный коэффициент позволяет учесть факторы, влияющие на формирование стока, но не входящие в состав редуccionной формулы,

²⁵ Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб. : Нестор-История, 2009. 193 с.

например: рельеф, уклон, шероховатость поверхности, развитость речной сети, форму водосбора и зависящие от них скорость стекания и время добегания.

Согласно СП 529.1325800.2023 норму слоя стока весеннего половодья допустимо определять по районным картам или путем осреднения по рекам-аналогам. В данном исследовании во избежание ошибок, связанных с некорректным подбором рек-аналогов, вместо осредненного по рекам-аналогам значения использовалась средняя для подрайона норма стока. Также по центрам тяжести водосборов площадями от 2000 до 50 000 км² была построена районная карта нормы слоя стока весеннего половодья. Интерполяция и построение изолиний с сечением 10 мм производились методом Kriging в программе Surfer 15. Сравнение погрешностей определения максимальных расходов воды при использовании этих двух методов позволит установить более надежный способ определения нормы стока весеннего половодья.

Оценка погрешности формулы (1) осуществлялась в два этапа. Сначала были рассчитаны максимальные расходы всех исследуемых рек, для чего использовались полученные районные параметры и снятая с построенной карты норма стока. Для оценки возможности использования районных параметров, приведенных в СНиП 2.01.14-83, максимальные расходы воды также были определены с использованием взятого из СНиП 2.01.14-83 районного значения показателя степени редукции.

Также оценка погрешности расчета максимальных расходов воды по редукционной формуле осуществлялась на независимом материале. Для этого в исследуемом районе было выбрано еще два гидрологических поста с различными площадями: р. Подюга – д. Велико-Николаевская и р. Пинега – д. Засурье с площадями 1030 и 17 100 км² соответственно. Посредством классификации каждый из них был отнесен к одному из четырех подрайонов. При определении максимальных расходов воды этих рек в качестве нормы стока принималось снятое с построенной карты значение, а также осредненное по подрайону значение.

Результаты исследований

Оценка стационарности характеристик весеннего половодья

Анализ стационарности слоев стока весеннего половодья показал, что на 92 % анализируемых гидрологических постов слой стока стационарен как по среднему значению, так и по дисперсии. Несмотря на то что для отдельных рек коэффициент корреляции линейного тренда отличается от нуля, при 5%-ном уровне значимости данные тенденции остаются статистически незначимыми, а среднее районное значение коэффициента корреляции стремится к нулю (табл. 2), что свидетельствует о стационарности этой характеристики для всего района и позволяет строить карту, приведенную на рис. 1.

Таблица 2

Средние многолетние гидрологические характеристики

№	Гидрологический пост	Коэффициент корреляции линейного тренда для слоев стока весеннего половодья	Норма слоя стока весеннего половодья, мм	Максимальный модуль стока, л/(с·км ²)
Подрайон 1				
1	р. Вымь – с. Весляна	0,14	166	109
2	р. Нижняя Тойма – д. Метил	0,04	205	166
3	р. Пинега – с. Кулогоры	0,10	177	106
4	р. Покшеньга – пос. Сылога	0,18	137	98
5	р. Кулой – д. Кулой	0,11	124	88
6	р. Мезень – д. Макариб	0,14	217	150
7	р. Мезень – д. Малонисогорская	0,04	201	103
Подрайон 2				
8	р. Яренга – с. Тохта	0,11	166	116
9	р. Виледь – д. Инаевская	–0,01	149	96
10	р. Пинега – д. Согры	0,02	182	125
Подрайон 3				
11	р. Волошка – д. Тороповская	–0,15	182	110
12	р. Кена – д. Коровий двор	0,08	162	55
13	р. Северная Двина – д. Абрамково	0,03	168	54
14	р. Северная Двина – д. Звоз	–0,12	175	55
15	р. Северная Двина – с. Усть-Пинега	0,01	179	60
16	р. Вага – д. Филяевская	–0,10	150	100
17	р. Пежда – д. Шелюбинское	–0,09	149	121
18	р. Кулой – д. Хребтовская	–0,23	154	80
19	р. Вель – д. Баламутовская	–0,07	162	133
20	р. Устья – с. Бестужево	0,04	161	109
21	р. Устья – с. Шангалы	0,02	166	113
22	р. Ледь – д. Зеленинская	0,10	121	82
Подрайон 4				
23	р. Солза – Сухие пороги	–0,11	165	109
24	р. Мудьюга – д. Патракеевская	0,09	279	286
25	р. Кепина – гм. ст. Кепино	–0,14	71	48
Среднее по району		0,01	167	107

Среднее многолетнее районное значение слоя стока за период весеннего половодья составляет 167 мм, районное стандартное отклонение равно 38 мм. Значительно отличающиеся от районных значения слоя стока характерны для рек Кепины и Мудьюги (см. табл. 2). Соседствующее расположение водосборных бассейнов этих рек и их небольшие размеры позволяют предположить, что между бассейнами существует водообмен, объясняющийся особенностями геологического строения водосборов (именно в пределах их водосборов лежат Кепинское и другие алмазные поля).

Максимальные расходы воды за период весеннего половодья, которые в большинстве случаев совпадают с максимальными за год расходами, так же, как и слой стока, характеризуются стационарностью. Коэффициент корреляции линейного тренда как для каждого отдельного поста, так и для района остается статистически незначимым.

Оценка погрешности редукционной формулы при использовании уточненных и устаревших значений параметров

В ходе уточнения районных параметров для определения районного показателя степени редукции была получена приведенная на рис. 2 зависимость, построенная по данным всех рассматриваемых 25 гидрологических постов. Значением районного показателя является коэффициент при X , взятый без учета знака. Анализ зависимости также показал, что снижения редукции в зоне малых площадей не наблюдается. Таким образом, параметр n был принят равным 0,14; $A_1 = 1$.

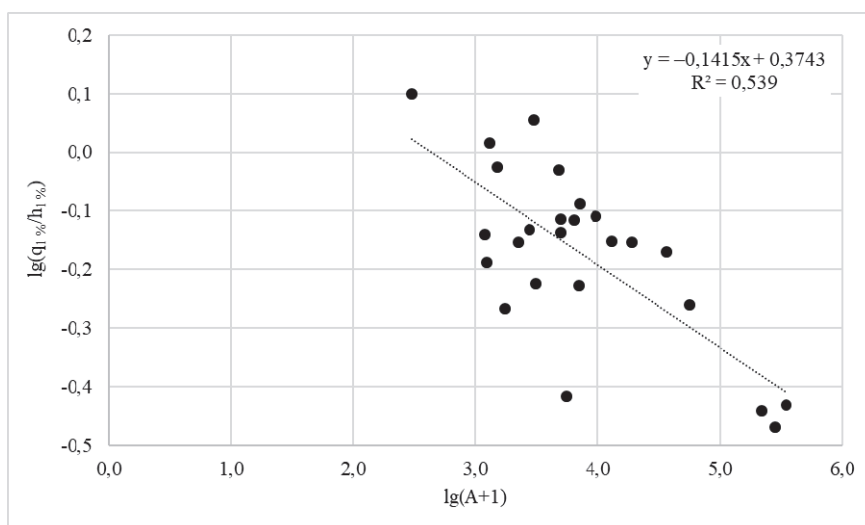


Рис. 2. Районная редукционная зависимость максимального стока весеннего половодья: q_1 % – модуль стока обеспеченностью 1 %, л/с·км²; h_1 % – слой стока половодья обеспеченностью 1 %, мм

Норма слоя стока, используемая при оценке погрешности расчета максимальных расходов воды по редукционной формуле, снималась с карты (см. рис. 1).

В табл. 3, 4 приведены осредненные по подрайонам значения параметров, используемых для определения максимальных расходов воды по редукционной формуле.

Таблица 3

Осредненные по подрайонам параметры, используемые в расчетах

Параметр	Подрайон 1	Подрайон 2	Подрайон 3	Подрайон 4
C_v	0,27	0,25	0,26	0,28
C_s/C_v	1,3	0,0	1,5	1,4
K_0	0,0093	0,0063	0,0073	0,0089
h_0	175	166	161	172

Таблица 4

Значения коэффициента μ_r % для выделенных подрайонов

R, %	Подрайон 1	Подрайон 2	Подрайон 3	Подрайон 4
0,01	1,11	1,02	1,03	0,974
0,1	1,06	1,0	1,02	1,02
0,5	1,02	1,0	1,01	1,0
1	1,0	1,0	1,0	1,0
5	0,955	1,0	0,978	0,982
10	0,931	1,0	0,963	0,974
20	0,902	0,994	0,940	0,957
25	0,893	0,993	0,932	0,951

В табл. 5 приводятся величины относительных ошибок расчета максимальных расходов воды обеспеченностью 1 %. Для большей части рек относительная ошибка расчета не превышает 20 %, средняя по району относительная ошибка составляет 24 %. Систематические ошибки в расчетах отсутствуют, так как полученные по редукционной формуле максимальные расходы были как завышены, так и занижены относительно расходов воды, полученных по аналитическим кривым. Наибольшие относительные ошибки, 150 и 55 %, были получены для таких рек, как Кепина и Мудьюга соответственно, причем для первой абсолютная ошибка была отрицательная, а для второй положительная.

Таблица 5

Относительные ошибки определения максимальных расходов воды

№	Гидрологический пост	Относительная ошибка определения максимальных расходов воды, %		
		Р 1 %	Р 25 %	Р 1 % при использовании приведенных в СНиП 2.01.14-83 районных параметров
Подрайон 1				
1	р. Вымь – с. Весляна	8	13	10
2	р. Нижняя Тойма – д. Метил	9	10	14
3	р. Пинега – с. Кулогоры	10	1	5
4	р. Покшеньга – пос. Сылога	32	20	36
5	р. Кулой – д. Кулой	51	17	50
6	р. Мезень – д. Макариб	10	6	11
7	р. Мезень – д. Малонисогорская	19	4	13
Среднее по подрайону		20	10	20
Подрайон 2				
8	р. Яренга – с. Тохта	12	4	12
9	р. Виледь – д. Инаевская	21	14	21
10	р. Пинега – д. Согры	20	7	22
Среднее по подрайону		18	8	18
Подрайон 3				
11	р. Волошка – д. Тороповская	0	5	2
12	р. Кена – д. Коровий двор	10	3	13
13	р. Северная Двина – д. Абрамково	34	25	24
14	р. Северная Двина – д. Звоз	4	6	5

№	Гидрологический пост	Относительная ошибка определения максимальных расходов воды, %		
		Р 1 %	Р 25 %	Р 1 % при использовании приведенных в СНиП 2.01.14-83 районных параметров
15	р. Северная Двина – с. Усть-Пинега	8	15	16
16	р. Вага – д. Филяевская	20	10	19
17	р. Пежма – д. Шелюбинское	17	10	11
18	р. Кулой – д. Хребтовская	25	32	32
19	р. Вель – д. Баламутовская	25	13	23
20	р. Устья – с. Бестужево	12	7	10
21	р. Устья – с. Шангалы	9	6	8
22	р. Ледь – д. Зеленинская	14	11	21
Среднее по подрайону		15	12	15
Подрайон 4				
23	р. Солза – Сухие пороги	23	16	25
24	р. Мудьюга – д. Патракеевская	55	54	54
25	р. Кепина – гм.ст.Кепино	150	156	146
Среднее по подрайону		76	75	75
Среднее по району		24	19	24

Средние районные относительные ошибки определения максимальных расходов воды сильно отличаются для разных подрайонов. Наименьшую среднюю относительную ошибку имеет подрайон с наибольшим количеством гидрологических постов. Отсюда можно сделать вывод, что расчеты, при которых осреднение проводилось по большему количеству гидрологических постов, будут более точные, а следовательно, при использовании рек-аналогов, рекомендованных СП 529.1325800.2023, нужно опираться на как можно большее количество рек-аналогов.

Для максимальных расходов воды других обеспеченностей можно отметить, что однозначной зависимости между величиной расхода и обеспеченностью не выявлено. Примерно в 25 % случаев по мере роста обеспеченности относительная ошибка увеличивалась, для некоторых гидрологических постов была получена нелинейная зависимость между величиной ошибки и обеспеченностью. Тем не менее для большинства рек по мере роста обеспеченности наблюдалось уменьшение величины относительной ошибки. Так, при определении максимального расхода воды обеспеченностью 25 % значительно увеличилось количество рек, относительная ошибка для которых не превышала 20 %, а средняя по району ошибка составила 19 % (см. табл. 5). Таким образом, в большинстве случаев с уменьшением обеспеченности падает и точность полученных расходов воды.

Также не было замечено связи между величинами относительных ошибок и площадями водосборов исследуемых рек. Несмотря на то что редуционная формула рекомендована для водосборов рек с площадями не более 20 000 км², для пяти гидрологических постов, площади водосборов которых превышали это значение, были получены удовлетворительные результаты

расчетов, при этом в четырех из пяти случаях рассчитанный расход превышал расход, полученный по аналитической кривой, хотя аналогичного систематического завышения не наблюдалось для средних и малых рек. Отсюда можно сделать вывод, что использование редуccionной формулы для больших рек допустимо, хотя более целесообразно в подобных случаях подбирать створы-аналоги, в качестве которых могут быть использованы гидрологические посты, расположенные выше и ниже по течению относительно исследуемого участка реки.

Кроме того, были рассчитаны относительные погрешности определения максимального расхода обеспеченностью 1 % с использованием приведенного в СНиП 2.01.14-83 районного показателя степени редуccion. Согласно СНиП 2.01.14-83 он равен 0,17, что достаточно сильно отличается от полученного с учетом наблюдений последних лет значения. Было установлено, что даже незначительные изменения в величине этого показателя при неизменных остальных сильно влияют на величины определяемых расходов воды.

Относительные ошибки расчета максимальных расходов воды для большинства рек не претерпели значительных изменений, при этом для одних гидрологических постов ошибки немного выросли, а для других, наоборот, уменьшились. Однако средняя по району ошибка не изменилась и составила те же 24 %, что и при использовании уточненного районного показателя степени редуccion. Стабильность величины относительной ошибки связана с наличием в формуле коэффициента дружности весеннего половодья, который нивелирует изменения в величине районного показателя степени редуccion. Так, при использовании устаревшего значения параметра n коэффициент дружности весеннего половодья равен: для первого подрайона – 0,012; для второго – 0,0079; для третьего – 0,095; для четвертого – 0,0107. Коэффициент дружности весеннего половодья изменился в среднем на 20 % относительно того, который приведен в табл. 3.

То же самое можно отметить для максимальных расходов воды обеспеченностью 25 %, где, кроме районного показателя степени редуccion, используется также устаревшее значение коэффициента μ_p %.

Для приведенных расчетов использовались интерполированные по построенной карте (см. рис. 1) значения нормы слоя стока весеннего половодья, однако можно предположить, что при использовании прилагаемой к СНиП 2.01.14-83 карты, построенной для территории всей России, а потому менее подробной, точность расчетов снизится, что может быть также нивелировано уточнением величины коэффициента дружности весеннего половодья. Таким образом, уточнение районного показателя степени редуccion и иных параметров редуccionной формулы (за исключение коэффициента дружности весеннего половодья) на точность расчетов влияние не оказывает (т. е. при условии уточнения коэффициента дружности весеннего половодья возможно использование устаревшие значения иных параметров).

Оценка погрешности редукционной формулы на независимом материале

При оценке погрешности редукционной формулы на независимом материале с использованием снятого с построенной карты значения нормы стока было получено, что относительная ошибка определения максимальных расходов воды не превышает 23 % (табл. 6). Из таблицы видно, что для р. Подюги рассчитанные максимальные расходы в большей степени, чем для р. Пинеги, соответствуют снятым с аналитических кривых обеспеченностей. Можно предположить, что это связано с использованием осредненных в пределах подрайонов параметров, в первую очередь коэффициента дружности весеннего половодья. Это доказывает, что осреднение по большему числу гидрологических постов приводит к более надежным результатам.

Таблица 6

Результаты расчета максимальных расходов воды для контрольных рек
с использованием карты нормы стока весеннего половодья

P, %	р. Подюга – д. Велико-Николаевская Площадь водосбора – 1030 км ² Подрайон 3				р. Пинега – д. Засурье Площадь водосбора – 17 100 км ² Подрайон 2			
	Q, м ³ /с	Q _{редук.} , м ³ /с	Абсолют. ошибка, м ³ /с	Относит. ошибка, %	Q, м ³ /с	Q _{редук.} , м ³ /с	Абсолют. ошибка, м ³ /с	Относит. ошибка, %
0,01	436	346	–90,3	21	4501	3457	–1040	23
0,1	368	310	–58,1	16	4004	3143	–861	22
0,5	316	279	–37,5	12	3620	2930	–690	19
1	294	262	–31,7	11	3426	2825	–601	18
5	237	223	–13,6	6	2961	2527	–434	15
10	210	203	–7,00	3	2722	2374	–348	13
20	178	179	1,34	1	2451	2172	–279	11
25	167	171	3,87	2	2350	2098	–252	11

Примечание. Q – расход воды, определенный по кривой обеспеченности; Q_{редук.} – расход воды, рассчитанный по редукционной формуле.

Оценка погрешности определения максимальных расходов при использовании среднего для подрайона значения нормы стока показала, что относительные ошибки вычисления максимальных расходов воды возросли (табл. 7), что особенно заметно для р. Пинеги, районное значение нормы стока для которой было получено по трем, а не как для р. Подюги 12 створам.

Таблица 7

Результаты расчета максимальных расходов воды для контрольных рек
с использованием районного значения нормы стока весеннего половодья

P, %	р. Подюга – д. Велико-Николаевская				р. Пинега – д. Засурье			
	Q, м ³ /с	Q _{редук.} , м ³ /с	Абсолют. ошибка, м ³ /с	Относит. ошибка, %	Q, м ³ /с	Q _{редук.} , м ³ /с	Абсолют. ошибка, м ³ /с	Относит. ошибка, %
0,01	436	337	–99,2	23	4501	3149	–1352	30
0,1	368	302	–66,1	18	4004	2862	–1142	29
0,5	316	271	–44,6	14	3620	2669	–951	26
1	294	256	–38,4	13	3426	2573	–853	25
5	237	218	–19,4	8	2961	2301	–660	22
10	210	198	–12,2	6	2722	2162	–560	21
20	178	175	–3,26	2	2451	1978	–473	19
25	167	166	–0,51	0	2350	1911	–439	19

Увеличение относительной ошибки определения максимальных расходов при использовании осредненной по подрайону нормы слоя стока позволяет сделать вывод о том, что создание и использование карты нормы слоя стока более предпочтительны. Для настоящего района было разработано web-приложение, позволяющее выполнять расчеты максимального расхода воды при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений²⁶.

Выводы

Выводы настоящего исследования по применению редуccionной формулы сводятся к следующему:

1. Редуccionная формула позволяет определять максимальные расходы воды обеспеченностью 1 % при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений с погрешностью порядка 24 %, которая при увеличении обеспеченности как правило, снижается.

2. Уточнение параметров редуccionной формулы является обязательным с точки зрения действующих строительных правил, однако при условии стационарности нормы стока и максимальных расходов воды не приводит к существенному изменению погрешности определения максимальных расходов воды.

3. Наиболее значимым параметром редуccionной формулы является коэффициент дружности весеннего половодья, который нивелирует изменчивость всех иных параметров. В связи с возможным (в настоящей работе показана стационарность нормы стока) нарушением стационарности нормы стока для иных районов следует в обязательном порядке уточнять коэффициент дружности весеннего половодья, в противном случае ошибки могут принимать недопустимые значения.

4. Норму стока весеннего половодья следует определять путем пространственной интерполяции по картам, построенным с учетом наблюдений последних лет для соответствующего района исследования. Осреднение нормы стока по подрайонам приводит к увеличению погрешности определения максимальных расходов воды на 7 %. Использование рек-аналогов, особенно малого их числа, без учета районной изменчивости и построения карт норм стока, может приводить к существенным ошибкам в связи с неверным их подбором.

5. Для уменьшения погрешности определения максимальных расходов воды при отсутствии данных необходимо использовать как можно больше результатов гидрометеорологических наблюдений по постам внутри гидрологически однородного района, а при необходимости проводить полевые исследования.

²⁶ Расчет максимальных расходов воды. Карта изолиний нормы слоя стока за период весеннего половодья, мм. URL: <https://hydrocalc.onrender.com/> (дата обращения: 02.12.2025).

Список литературы

- Бельдиман И. Н. Оценка погрешности расчетов максимального стока малых рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, № 1. С. 59–71. <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.1.59>
- Виноградов А. Ю., Догановский А. М., Обязов В. А. Существующие проблемы гидрологических расчетов. Ч. 1 // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1, № 1. С. 143–159. <https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.004>
- Лобанов В. А., Никитин В. Н. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 60–69.
- Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб. : ГГМУ, 2008. 408 с.
- Оценка возможности использования СП 33-101-2003 для расчетов максимального стока на примере воднобалансовой станции Междуречье / А. Ю. Виноградов [и др.] // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, № 3. С. 259–274. <https://doi.org/10.34753/HS.2021.3.3.259>
- Рождественский А. В., Лобанова А. Г. Современная проблема инженерных гидрологических расчетов по обобщению гидрологической информации в России и пути ее решения // Метеорология и гидрология. 2011. № 7. С. 81–95.
- Шевцов Р. О. Расчет максимальных расходов воды неизученных рек бассейна Средней и Нижней Печоры // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы XII общерос. конф. изыскат. организаций. Москва, 7–9 дек. 2016 г. М. : Геомаркетинг, 2016. С. 232–239.
- Changing climate both increases and decreases European river floods / G. Blöschl, J. Hall, A. Viglione [et al.] // Nature. 2019. Vol. 573 (7772). P. 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Changing climate shifts timing of European floods / G. Blöschl, J. Hall, J. Parajka [et al.] // Science. 2017. Vol. 357 (6351). P. 588–590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- Climate Change Impact on the Annual and Maximum Runoff of Russian Rivers: Diagnosis and Projections / A. N. Gelfan, N. L. Frolova, D. V. Magritskii [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. Vol. 59, N 2. P. S153–S169. <https://doi.org/10.1134/S0001433823140074>
- Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.
- Jacobson M. Validation of the SCS TR-55 method on Whangarei District Watersheds and Soil Types. USQ Project, 2019.
- Roehr D., Kong Y. Stormwater runoff reduction achieved by green roofs: Comparing SWMM method to TR-55 method // Low Impact Development International Conference (LID). 2010. P. 1012–1021. [https://doi.org/10.1061/41099\(367\)88](https://doi.org/10.1061/41099(367)88)
- Tay H. N., Afshar N. R. Evaluation of runoff coefficient Samarahan Basin // International engineering conference, energy and environment (ENCON 2014). 2014. Vol: Conference Proceeding. P. 137–144. https://doi.org/10.3850/978-981-09-4587-9_P19
- Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment / J. Hall, B. Arheimer, M. Borga [et al.] // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2014. Vol. 18. P. 2735–2772. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-15525-2013>

References

- Beldiman I.N. Otsenka pogreshnosti raschetov maksimalnogo stoka malykh rek [Estimation of the error in calculating the maximum flow of small rivers]. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya* [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena], 2021, vol. 3, no. 1, pp. 59-71. (in Russian)
- Vinogradov A.Yu., Doganovsky A.M., Obyazov V.A. Sushchestvuyushchie problemy gidrologicheskikh raschetov. Chast 1 [Existing issues of hydrology calculations. Part 1]. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya* [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena], 2019, vol. 1, no. 1, pp. 143-159. (in Russian)
- Lobanov V.A., Nikitin V.N. Regionalnye modeli opredeleniya kharakteristik maksimal'nogo stoka v zavisimosti ot gidrograficheskikh faktorov [Regional models for determination of design

maximum runoff versus hydrographic factors of watersheds]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2006, vol. 11, pp. 60-69. (in Russian)

Malinin V.N. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii [Statistical Methods for Analyzing Hydrometeorological Information]. St. Petersburg, RSHU Publ., 2008, 408 p. (in Russian)

Vinogradov A.Yu., Shakirov A.F. et al. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya SP 33-101-2003 dlya raschetov maksimal'nogo stoka na primere vodnobalansovoi stantsii Mezhdurech'e [Possibility of using SP 33-101-2003 for calculation of the maximum runoff on the example of the water balance station Mezhdureche]. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya* [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena], 2021, vol. 3, no. 3, pp. 259-274. (in Russian)

Rozhdestvenskij A.V., Lobanova A.G. Sovremennaya problema inzhenernykh gidrologicheskikh raschetov po obobshcheniyu gidrologicheskoi informatsii v Rossii i puti ee resheniya [Current problem of engineering hydrological calculations on generalisation of hydrological information in Russia and ways of its solution]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2011, vol. 7, no. 36, pp. 81-95. (in Russian)

Shevtsov R.O. Raschet maksimal'nykh raskhodov vody neizuchennykh rek basseina Srednei i Nizhnei Pechory [Calculation of maximum water discharges of unexplored rivers of the Middle and Lower Pechora basin]. *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskanij v stroitelstve v Rossijskoj Federacii* [Prospects for Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation]. Materials of the XII All-Russian Conference of Surveying Organisations, Moscow, 7-9 December, 2016. Moscow, 2016, pp. 232-239. (in Russian)

Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 2019, vol. 573(7772), pp. 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.

Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 2017, vol. 357(6351), pp. 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>

Gelfan A. N., Frolova N. L., Magritskii D. V. et al. Climate Change Impact on the Annual and Maximum Runoff of Russian Rivers: Diagnosis and Projections. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, suppl. 2, pp. S153–S169. <https://doi.org/10.1134/S0001433823140074>

Cronshey R. *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.

Jacobson M. *Validation of the SCS TR-55 method on Whangarei District Watersheds and Soil Types*. USQ Project, 2019.

Roehr D., Kong Y. Stormwater runoff reduction achieved by green roofs: Comparing SWMM method to TR-55 method. *Low Impact Development International Conference (LID)*, 2010, pp. 1012-1021. [https://doi.org/10.1061/41099\(367\)88](https://doi.org/10.1061/41099(367)88)

Tay H.N., Afshar N.R. Evaluation of runoff coefficient Samarahan Basin. *International engineering conference, energy and environment (ENCON 2014)*, 2014, vol: Conference Proceeding, pp. 137-144. https://doi.org/10.3850/978-981-09-4587-9_P19.

Hall J., Arheimer B., Borga M. et al. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014, vol. 18, pp. 2735-2772. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-15525-2013>

Сведения об авторах

Почепко София Юрьевна

студент

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, г. Санкт-Петербург,

Университетская наб., 7–9

e-mail: pochepkosofia@gmail.com

Сумачев Александр Эдуардович

кандидат технических наук,

старший преподаватель

Information about the authors

Pochepko Sofia Yurevna

Student

Saint Petersburg State University

7-9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg,

199034, Russian Federation

e-mail: pochepkosofia@gmail.com

Sumachev Aleksandr Eduardovich

Candidate of Engineering Sciences,

Senior Lecturer

*Санкт-Петербургский государственный
университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7-9
e-mail: a.sumachev@spbu.ru*

*Saint Petersburg State University
7-9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg,
199034, Russian Federation
e-mail: a.sumachev@spbu.ru*

Банищикова Любовь Святославовна
*кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Государственный гидрологический институт
Россия, 199004, г. Санкт-Петербург,
2-я линия В. О., 23
e-mail: BanshchikovaLS@yandex.ru*

Banshchikova Lyubov Svyatoslavovna
*Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
State Hydrological Institute
23, 2nd Line V. O., Saint Petersburg, 199004,
Russian Federation
e-mail: BanshchikovaLS@yandex.ru*

Код специальности: **1.6.16**

Статья поступила в редакцию **14.10.2025**; одобрена после рецензирования **02.12.2025**; принята к публикации **04.12.2025**

The article was submitted **October, 14, 2025**; approved after reviewing **December, 02, 2025**; accepted for publication **December, 04, 2025**