

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.535.3(282.247.29)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53

Количественная оценка величины расходов в реках Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным измерения придонных течений

***Ефим Игоревич Гмыря^{1, 2},
Борис Валентинович Чубаренко²***

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия, gmuryaefim@mail.ru

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, chuboris@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается оценка скоростей течений и расходов на судоходных участках рек Нижняя Преголя и Дейма с помощью инструментальных измерений. Выполнены расчеты коэффициента пересчета, учитывающего разницу между течением, измеренными в придонном горизонте, и средним по створу течением. Значения таких коэффициентов (в пределах 1,1—2,5) получены в трех точках на рукаве Нижняя Преголя и двух точках на рукаве Дейма, створы в которых характеризуются разными максимальными глубинами и площадями поперечного сечения. Эти работы были проведены в разные сезоны (19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022). В первом приближении получены линейные интерполяционные зависимости величины коэффициента пересчета от максимальной глубины створа и площади створа, которые могут быть использованы для других речных створов.

Ключевые слова: скорость течения, расход рек, гидроствор, река Преголя, река Дейма, юго-восточная Балтика.

Благодарности: работа проведена при поддержке госзадания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2021-0012). Авторы благодарны коллегам за существенную помощь — Паке В. Т., Коржу А. О., Кондрашеву А. А., Граве А. Н. за аппаратное обеспечение, Закирову Р. Б. и Боскачеву Р. В. за данные промеров, а также Пинчуку В. С. за участие в измерениях.

Для цитирования: Гмыря Е. И., Чубаренко Б. В. Количественная оценка величины расходов в реках Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным измерения придонных течений // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 38—53. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.

Original article

**Quantification of discharges in the Downstream
Pregolya and Deyma rivers (the southeast Baltic)
according to near-bottom current measurement data**

Efim I. Gmyrya^{1, 2}, Boris V. Chubarenko²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, gmyryaefim@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, chuboris@mail.ru

Summary. The estimation of currents and discharges using instrumental measurements in the navigable sections of lowland rivers is possible only by the installation of instruments in the near-bottom horizon of the river to avoid to impede the movement of ships. Estimating the discharges based on such data, the conversion factors are needed that take into account the difference between the currents measured in the near-bottom horizon and the currents averaged along the cross-section. These data are needed to solve the problem – in what proportion will the flow of the Pregolya River (Kaliningrad Oblast, Russia) be divided between two mouth branches (Downstream Pregolya and Deyma). Instrumental measurements of currents were carried out at three hydraulic sections on the Downstream Pregolya branch and two hydraulic sections on the Deima Branch on May 19, 2021, November 11, 2021, and March 27, 2022. Two methods were used in parallel at the same time. The first one was the installation of an inclinometric currentmeter of bottom currents (registration frequency — 2 sec). It is supposed to be used in the future. The second one, rather time-consuming method was the measurement of the flow velocity with the SeaGuard probe (point ADCP) on three verticals at each section, 3—4 points per vertical, the exposure time is 20 seconds (8—9 casts) per point. The latter method made it possible to calculate the cross-sectional average velocity with sufficient accuracy, and, therefore, allowed us to calibrate the first method. As a result, the conversion factors (in a range of 1,1—2,5 depending on the hydraulic section) were determined, which made it possible to estimate the flow from the speed measured by the bottom currentmeter. Strictly speaking, the obtained conversion factors are correct only for the considered hydraulic sections. But, using the obtained data as a reference, linear interpolations were constructed between the conversion factor and (a) the maximum depth and (b) the area of the hydraulic section, which, in a first approximation, can be applied to other hydraulic sections.

Keywords: flow velocity, river discharge, hydraulic cross-section, Pregolya River, Deyma River, South-East Baltic.

Acknowledgments. The work was carried out with the support of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (theme No FMWE-2021-0012). The authors are grateful to colleagues for their valuable help — to Paka V. T., Korzh A. O., Kondrashev A. A., Grave A. N. for providing hardware for the instrumental measurements, Zakirov R. B. and Boskachev R. V. for the depth measurements data, as well as to Pinchuk V.S. for taking part in the measurements.

For citation: Gmyrya E. I., Chubarenko B. V. Quantitative assessment of discharges in the Downstream Pregolya and Deyma rivers (southeast Baltic) according to near-bottom current measurement data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(70):38—53 (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.

Введение

Основным водотоком Калининградской области является р. Преголя (рис. 1), которая в своем нижнем течении разделяется на два рукава — Нижнюю Преголю

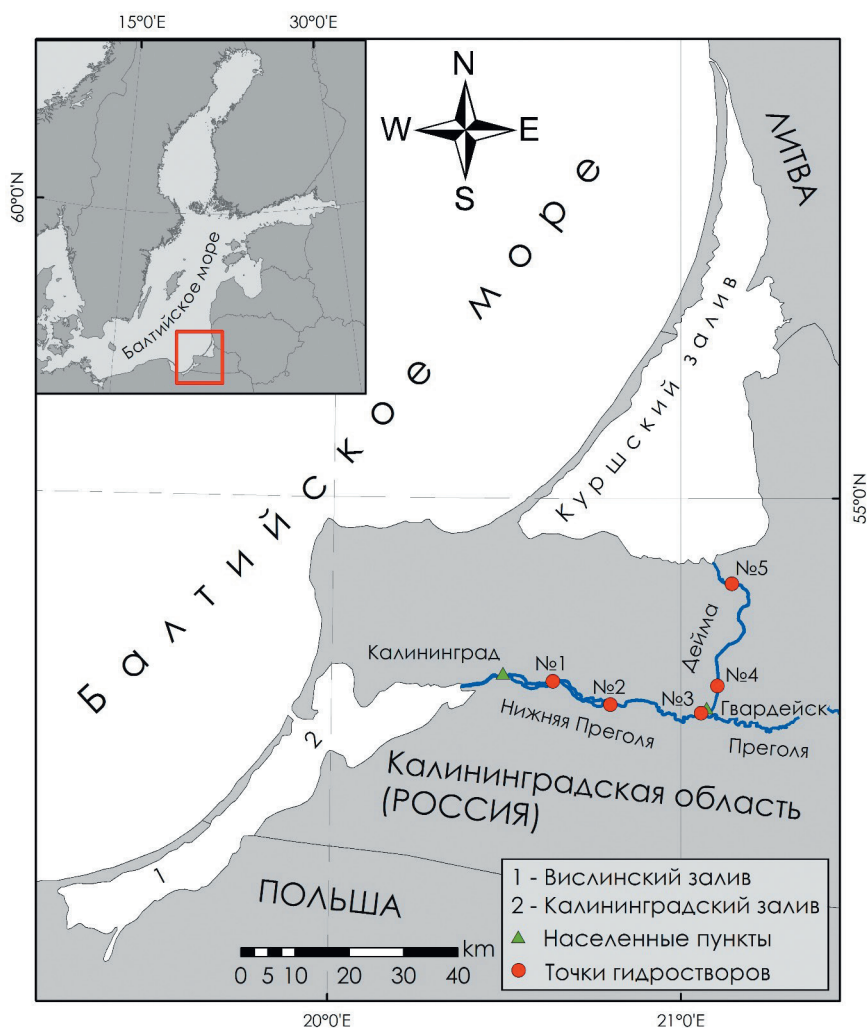


Рис. 1. Местоположение гидростворов на рукавах Нижняя Преголя и Дейма.

Fig. 1. Location of the hydrometric cross-sections in Downstream Pregolya and Deyma rivers.

и Дейму [1]. Речная система р. Преголи занимает фактически всю территорию области, поэтому она имеет потенциально большое рекреационное [2] и хозяйственное значение для региона. Также около 61 % питьевого водоснабжения Калининграда поставляется именно из р. Преголи [3].

Расходы рек являются одним из ключевых параметров для оценки поступления взвешенных наносов и загрязняющих веществ в прибрежную зону [4, 5], а также для изучения трендов водности рек и питания приемных водоемов. Получение первичных данных, необходимых для оценки величин расходов воды

в реках, возможно только при помощи непрерывных инструментальных измерений. Однако установка прибора, измеряющего показатели скорости и направления течения реки в поверхностном горизонте реки на длительный срок, представляет сложную задачу, поскольку, чтобы такой прибор не препятствовал движению плавсредств, необходимы специальные усилия по обеспечению его сохранности. Более оптимальным способом проведения измерений является установка оборудования в придонном горизонте [6] при условии отсутствия придонной укорененной растительности.

Ранее проводились [6] исследования расходов вод Нижней Преголи и Деймы при помощи инклинометрических измерителей скорости придонных течений (далее — инклинометры) [7]. Из-за придонной постановки измерителей течений данные скорости и направления течения реки будут отличаться от их действительных оценок вследствие неоднородности водного потока [8, 9]. Поэтому цель настоящей работы состояла в определении пересчетных коэффициентов, учитывающих разницу между измеренными в придонном горизонте течениями и течениями средними по створу. Результаты имеют значение для оценки расходов воды в рукавах Нижней Преголи и Деймы (юго-восточная Балтика) с использованием данных только придонных инклинометрических измерителей.

Объект исследования

Р. Преголя — крупнейшая река Калининградской области. Она образуется слиянием рек Инструч (длина 101 км, площадь водосбора 1250 км²) и Анграпа (длина 169 км, площадь водосбора 3957 км²) [10]. Реки Преголя и Дейма принадлежат к типу равнинных приморских рек со смешанным питанием и паводочным режимом в течение года. Скорости течения Нижней Преголи варьируются от 0,3 до 0,1 м/сек. Выше места разделения реки на рукава Дейму и Нижнюю Преголю они достигают 0,4 м/сек. Скорость течения Деймы также слаба, в устьевой части реки она составляет около 0,1 м/сек, в верхней части реки достигает 0,5 м/сек [11].

Р. Преголя разделяется на два рукава в г. Гвардейске [11, 12]. Рукав (длина 56 км), который течет на запад и впадает в Калининградский (Вислинский) залив (несет 60 % объема вод от общего стока) [11], будем называть Нижняя Преголя, согласно [11]. За 30 км до устья русло Нижней Преголи разделяется на два протока (Старая и Новая Преголя), которые вновь соединяются в г. Калининграде за 9 км до устья [13, 14]. Рукав Дейма (длина 37 км) течет на север, впадает в Куршский залив и отводит 40 % объема вод от их общего стока [11].

По причине малых уклонов (перепад высот от устья до Гвардейска при межженных уровнях [11] составляет 0,7 м) в Нижней Преголе во время ветров западных направлений течение разворачивается в обратную сторону, вследствие чего воды Калининградского залива поднимаются вверх по руслу реки [15].

Исходные материалы и методы исследований

Существуют разные способы измерения скорости течений в речном створе, и у каждого метода имеются свои преимущества. Наиболее современные методы

основаны на использовании доплеровских измерителей течений в режиме поверхностной буксировки профилографа от одного берега к другому с помощью системы натянутых поперек реки тросов [16] или установке горизонтальных акустических измерителей потока около одного из берегов [17—19]. По причине активного рекреационного судоходства по рекам Преголе и Дейме, было принято решение использовать точечный акустический измеритель потока и более традиционную методику «промерных вертикалей» [20, 21].

На рукавах р. Преголи (Нижняя Преголя и Дейма) были проведены три экспедиционных выезда (19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022) по измерению скорости течения рек при помощи двух приборов одновременно — инклинометрического измерителя скорости придонных течений [7] и точечного акустического измерителя скорости течений SeaGuard. Измерения проводились на пяти створах: № 1 — Родники, № 2 — Медовое, № 3 — Гвардейск, № 4 — Ратное, № 5 — Загородный (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики гидростворов на рукавах Нижняя Преголя и Дейма

Characteristics of the hydrometric cross-section
in Downstream Pregolya and Deyma rivers

№	Название	Координаты		Максимальная глубина, м	Площадь створа, м ²
		Широта	Долгота		
1	Родники	54,698	20,639	6,1	320
2	Медовое	54,658	20,798	3,4	210
3	Гвардейск	54,644	21,059	2,2	110
4	Ратное	54,689	21,103	3,8	130
5	Загородный	54,858	21,147	9,9	280

По прибытию на гидрометрический створ (далее — гидро створ, рис. 2 а) экспедиционное плавсредство выходило на центральную вертикаль для установки инклинометра. Работы проводились с малого плавсредства, устанавливаемого на каждой вертикали на два якоря (рис. 2 б). Скорость и направление течения регистрировались инклинометром с шагом 2 с (рис. 2 в, г) в течение всего времени работы на данном гидро створе (30—50 мин), которое было необходимо для измерения течения с помощью зонда SeaGuard на трех вертикалях (рис. 2 а) на фиксированных горизонтах (согласно МИ 1759-87 [21]). По завершению замеров на гидро створе инклинометр поднимался со дна русла реки.

Инклинометр [7] представляет собой физический «маятник» длиной 1 м, обладающий положительной плавучестью (рис. 2 б). Он оснащался грузом и устанавливался на 0,5—1 м от дна русла реки, т. е. вся информация, полученная с его помощью, относилась к придонному горизонту толщиной 1 м. Угол отклонения инклинометра от вертикали пересчитывался в скорость потока по показаниям акселерометра и магнитометра, которые записывались на встроенное устройство хранения памяти. Прибор калибровался по измерениям в проточном лотке [7].

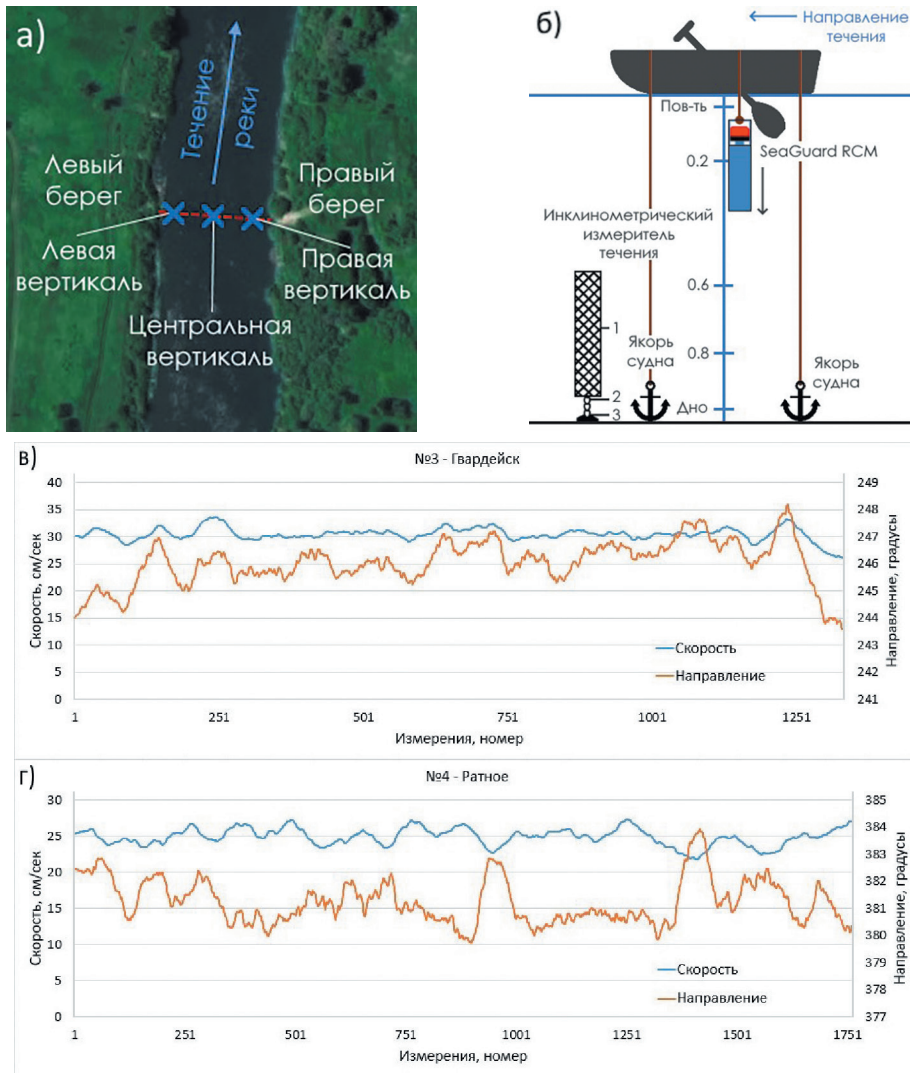


Рис. 2. Схема проведения измерений скорости речного потока. Расположение промерных вертикалей (а); схема измерения на центральной вертикали (б) с указанием горизонтов методики МИ 1759-87 (для измерения SeaGuard RCM) и составных частей инклинометра [7] (1 — чувствительная часть прибора, 2 — шарнирное крепление подвеса, 3 — груз); примеры записей инклинометра для гидропостов (в) № 3 (Гвардейск) и (г) № 4 (Ратное).

Fig. 2. Scheme of measuring the speed of the river flow. The location of the measuring verticals (a); scheme of measurement on the central vertical (б) with the horizons according to the MI 1759-87 method (for measuring SeaGuard RCM) and the parts of the inclinometer [7] (1 — sensitive part of the device, 2 — swivel hanger, 3 — load); examples of the records of the inclinometer for the transects: (в) № 3 (Gvardeysk) and (г) № 4 (Ratnoe).

Для оценки расхода реки на гидростворе (на момент измерений) использовалось среднее значение вдольрусловой¹ составляющей течений, зафиксированных инклинометром за период измерений на гидростворе:

$$Q = u \cdot S, \quad (1)$$

где Q — искомый расход воды ($\text{м}^3/\text{сек}$); u — среднее значение вдольрусловой скорости течения реки в гидростворе по показаниям инклинометра ($\text{м}/\text{сек}$) за промежуток измерений; S — площадь поперечного сечения гидроствора (м^2) по данным [22].

Одновременно на гидростворе (рис. 3) выполнялись измерения при помощи точечного акустического измерителя скорости течений SeaGuard в соответствии с методикой государственной системы обеспечения измерений (ГСИ) МИ 1759-87 [21], предназначенной для оценки расхода в заданном створе реки. На линии гидроствора выбирались 3 промерные вертикали (рис. 2 а), каждая из которых делилась на 5 горизонтов: поверхность реки, 20, 60 и 80 % глубины и дно реки (рис. 3). На каждом из вышеперечисленных горизонтов зонд SeaGuard удерживался по 3 мин и регистрировал показания скорости течения речного потока. Так как дискретность записи прибора составляет 20 с, на одном горизонте получалось 8—9 отсчетов значений скорости и направления течения, которые усреднялись. В качестве скорости течений всегда бралась вдольрусловая составляющая скорости.

Согласно МИ 1759-87, для оценки расхода необходимо иметь данные скорости течения реки по вертикалям на строго указанных горизонтах — поверхность реки, 20, 60 и 80 % глубины и дно реки (горизонт 10 см от дна). Из-за конструктивных особенностей (зонд SeaGuard дает значение придонной скорости в 0,55 м от дна) провести замеры на горизонте 10 см от дна не удалось, поэтому недостающие данные для придонного горизонта были экстраполированы по данным измерений на двух вышележащих горизонтах.

Так как исследуемое русло реки свободно ото льда и водной растительности, то средняя скорость на вертикали вычислялась по формуле (2) с использованием пятиточечного способа (МИ 1759-87):

$$v = 0,05 \cdot v_{\text{пов}} + 0,347 \cdot (v_{0,2} + v_{0,6}) + 0,173 \cdot v_{0,8} + 0,083 \cdot v_{\text{дно}}, \quad (2)$$

где v ($\text{м}/\text{сек}$) — средняя вдольрусловая скорость течения реки на вертикали, а $v_{\text{пов}}$, $v_{0,2}$, $v_{0,6}$, $v_{0,8}$ и $v_{\text{дно}}$ — скорости на соответствующих горизонтах.

Расчет расхода воды через гидроствор проводился при помощи линейно-детерминированной модели (формула (3) из МИ 1759-87):

$$Q = K \cdot v_1 \cdot f_0 + (v_1 + v_2) \cdot f_1/2 + (v_2 + v_3) \cdot f_2/2 + K \cdot v_3 \cdot f_3, \quad (3)$$

где f_i — площади отсеков потока (f_0, f_3 — отсеки, примыкающие к левому и правому берегам), v_{1-3} — средние вдольрусловые скорости на вертикалях, разделяющих отсеки. Коэффициент K для скоростей v_1 и v_3 на прибрежных скоростных вертикалях принимался равным 0,7 (МИ 1759-87) — как при пологом берегу с нулевой глубиной на урезе. Необходимые для использования в методике МИ 1759-87

¹ Под вдольрусловой составляющей течений понимается проекция вектора течения на азимут оси русла. При естественном течении реки она положительна, при обратном течении — отрицательна.

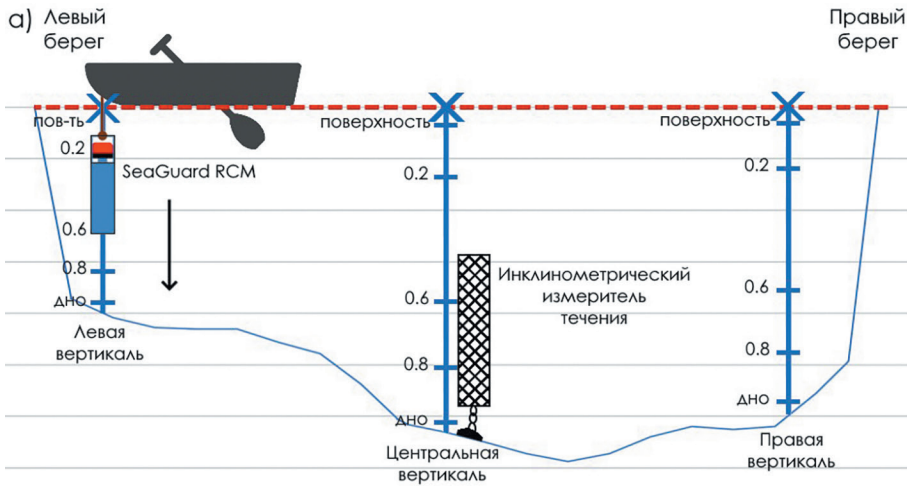


Рис. 3. Схема измерения скорости речного потока на поперечном сечении гидроствора.

Указано положение инклинометрического измерителя течений и вертикалей (МИ 1759-87), на которых проводились измерения зондом SeaGuard (красным выделено место расположения чувствительного элемента).

Fig. 3. Scheme of measuring the velocity of the river flow in the hydrometric cross-section.

The position of the inclinometric current meter, and the verticals (МИ 1759-87), which were measured with the SeaGuard probe, are indicated (the measuring element is highlighted in red).

площади 4-х отсеков поперечного сечения вычислялись на основе разбиения профиля на трапеции (2—7 трапеций на отсеке).

Таким образом, для каждого гидроствора были получены по две оценки расходов (формулы (1) и (3)) — по данным инклинометра (формула (1)) и методики МИ 1759-87, которые использовались для вычисления коэффициента пересчета R :

$$R = Q_{mi} / Q_{incl} \quad (4)$$

где R — коэффициент пересчета; Q_{mi} (м³/сек) — расход, полученный при помощи методики МИ 1759-87 с использованием измерений зондом SeaGuard, формула (3); Q_{incl} (м³/сек) — расход, полученный при помощи инклинометрического измерителя, формула (1).

В дальнейшем коэффициент пересчета должен использоваться при оценках расходов по скоростям, измеренным придонными измерителями.

Результаты расчетов

Результаты оценок средней скорости и расходов в гидрометрических створах, полученные по измерениям инклинометра и методикой МИ 1759-87 на гидростворах рукавов Нижней Преголи и Деймы 19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022, приводятся в табл. 2. Коэффициент пересчета вычислен с точностью до одного знака после запятой, учитывая невысокую точность измерения исходных характеристик.

Таблица 2

Результаты оценок средней скорости и расходов в гидрометрических створах, полученные по измерениям инклинометра и методикой МИ 1759-87 на гидростворах рукавов Нижняя Преголя и Дейма 19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022

The results of estimates of the average velocity and flow rates in the hydrometric cross-sections, obtained from inclinometer measurements and the MI 1759-87 method in the Downstream Pregolya and Deyma rivers on 05.19.2021, 11.11.2021 and 03.27.2022

Дата	№	Средняя скорость, МИ 1759-87 (см/сек)	Скорость, инклинометр (см/сек)	Расход, МИ 1759-87 (м³/сек)	Расход, инклинометр (м³/сек)	Коэф. пересчета R (б/р)
19.05.2021	1	7	4	24	12	2,0
	2	15	12	31	26	1,2
	3	24	53	27	59	0,5
	4	25	28	33	38	0,9
	5	13	7	35	19	1,8
11.11.2021	1	7	3	21	9	2,3
	2	1	1	3	1,5	2,0
	3	22	14	24	16	1,5
	4	13	9	16	12	1,3
	5	6	2	17	6	2,8
27.03.2022	1	14	7	42	24	1,8
	2	16	10	31	22	1,4
	3	30	29	31	32	1,0
	4	27	25	32	33	1,0
	5	17	5	41	14	2,9

Примечание. Пояснение выделения см. в тексте на с. 48.

Погрешность в определении скорости течений (вызванная естественными вариациями скорости) оценивалась через сопоставление величин скоростей, полученных при помощи инклинометра и зонда SeaGuard. На каждом гидростворе рассчитывались относительные отклонения показаний скорости от среднего значения между ними (табл. 3). Величина полученного относительного отклонения варьируется от 5 до 61 %, среднее отклонение — 29 % (табл. 3). Полученные таким образом оценки относительного отклонения могут быть использованы для характеристики относительной погрешности для всех результатов, полученных на основе измерений течений.

Обсуждение результатов

Результаты измерений (19.05.2021, 11.11.2021 и 27.03.2022 г., табл. 2) свидетельствуют о том, что расходы рек в рукавах Нижняя Преголя и Дейма, полученные при помощи инклинометра и зонда SeaGuard, сопоставимы.

Найденные при помощи МИ 1759-87 расходы (а также ширина русел) увеличиваются (табл. 2) в направлении от истока к устью как для Нижней Преголи, так и для Деймы, что соответствует естественному увеличению площади

Таблица 3

Скорости течения в точках установки инклинометра на гидростворах на рукавах Нижней Преголи и Деймы 19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022, измеренных при помощи инклинометра и зонда SeaGuard

The flow velocities at the inclinometer installation points in the hydrometric cross-sections in Downstream Pregolya and Deyma rivers on 19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022, measured using the inclinometer and the SeaGuard probe

Дата	№	Скорость, SeaGuard (см/сек)	Скорость, инклинометр (см/сек)	Средняя скорость (см/сек)	Относительное отклонение, %
19.05.2021	1	10	4	7	46
	2	16	12	14	14
	3	32	53	43	24
	4	26	28	27	5
	5	11	7	9	25
11.11.2021	1	8	3	5	48
	2	1	1	1	7
	3	26	14	20	29
	4	13	9	11	19
	5	8	2	5	56
27.03.2022	1	14	7	11	30
	2	20	10	15	33
	3	42	29	36	18
	4	31	25	28	12
	5	21	5	13	61

водосбора [8, 9]. Исключение составляет величина расхода в гидростворе № 1 в результате того, что русло Нижней Преголи разделяется на два рукава (Старая и Новая Преголя), вследствие чего часть объема воды уходит в другое русло.

В тоже время расходы, вычисленные по данным инклинометра на гидростворах рукава Дейма (№ 4 — Ратное, № 5 — Загородный) не соответствуют естественному увеличению расходов воды в реках по направлению к устью. Данные всех трех экспедиционных выездов свидетельствуют о том, что расход на нижнем гидростворе рукава Дейма (гидроствор № 5) меньше, чем расход в гидростворе № 4 (выше по течению). Это может быть объяснено большей глубиной русла реки в месте гидроствора № 5 (Загородный, 10 м) и, соответственно, возможными возвратными течениями в глубинных слоях, замедляющими придонные течения, которые фиксирует инклинометр.

Основываясь на традиционных представлениях о вертикальном профиле скорости течения в русле реки [8, 9] (рис. 4), следует ожидать, что измеренная инклинометром скорость должна быть меньше средней скорости, полученной при помощи зонда SeaGuard, так как скорость придонного горизонта реки меньше, чем скорость поверхностных горизонтов. Результаты, полученные 11.11.2021 и 27.03.2022, полностью это подтверждают. В результатах от 19.05.2021 данное предположение подтверждается измерениями на трех гидростворах (№ 1 — Родники, № 2 — Медовое, № 5 — Загородный). В гидростворах № 3 (Гвардейск) и № 4

(Ратное), в которых глубины составляют 2 и 4 м соответственно, оценки расходов дают сопоставимые значения. Единственный случай, когда различия оказались существенными, относится к измерению на гидростворе № 3 для 19.05.2021 г. (соответствующая строка в таблицах 2 и 3 выделена). Этот результат в дальнейшем не учитывался.

Исходя из классического вида вертикального профиля скорости [8, 9] (рис. 4) ожидается, что коэффициент пересчета R будет всегда больше или равен единице. В зависимости от глубины на гидростворе горизонт измерений инклинометра накрывает как придонные, так и срединные слои потока. Результаты свидетельствуют о наличии корреляции между максимальной глубиной гидроствора и отклонением полученного коэффициента пересчета от единицы (рис. 5). Для гидростворов № 1 (Родники) и № 5 (Загородный), где максимальная глубина русла реки составляет 6 и 10 м соответственно, коэффициенты пересчета наиболее далеки от единицы (табл. 2). Максимально приближенными к единице оказались коэффициенты пересчета (табл. 2) для гидростворов № 3 (Гвардейск) и № 4 (Ратное), где максимальная глубина русла реки составляет 2 и 4 м соответственно.

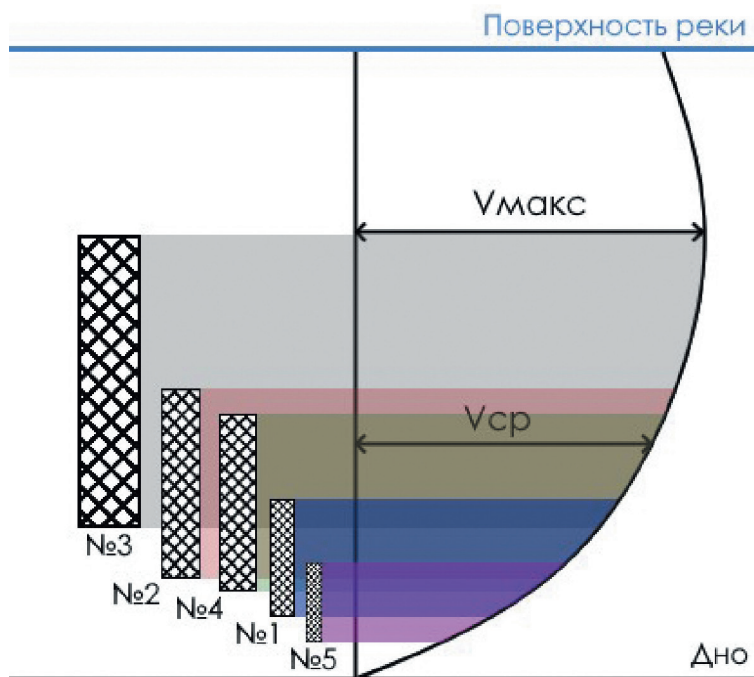


Рис. 4. Локализация слоя измерения скорости инклинометром для каждого измерительного створа (обозначены номерами) в пропорции к идеальной эпюре вертикального распределения скорости потока [8].

Fig. 4. The location of the inclinometer measuring layer at each measurement transect (numbered) in the proportion to the diagram of the vertical velocities profile in the river flow [8].

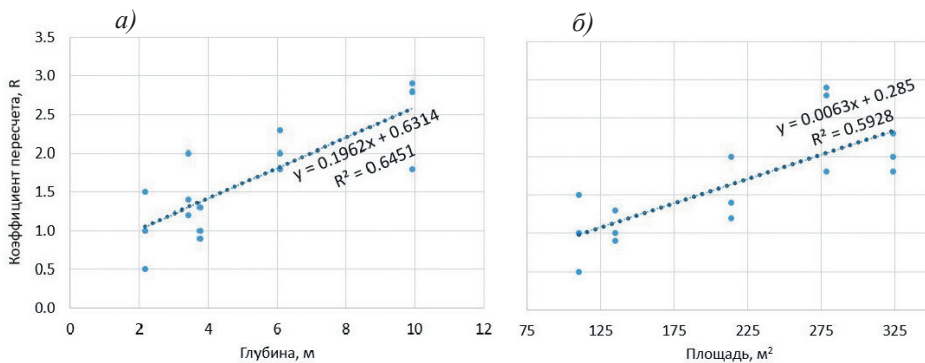


Рис. 5. Интерполяционные зависимости коэффициента пересчета R в зависимости от максимальной глубины (а) и от площади поперечного сечения гидроствора (б).

Fig. 5. The interpolation of the conversion factor R in dependence of the maximum depth (а) and the cross-sectional area of the hydraulic section (б).

По данным коэффициента пересчета на каждом гидростворе был найден средний коэффициент пересчета для всех трех экспедиционных выездов (табл. 4), который с учетом разброса от 5 до 61 % (среднее отклонение — 29 %), может быть использован для оценки расходов воды в данных створах рукавов Нижняя Преголя и Дейма при естественном направлении потока в речном русле в периоды отсутствия экстремального стока.

Таблица 4

Усредненные коэффициенты пересчета R по данным трех экспедиционных выездов
19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022

Average conversion factors R based on the data of three expedition trips
19.05.2021, 11.11.2021, 27.03.2022

№	Название створа	19.05.2021	11.11.2021	27.03.2022	Среднее по всем измерениям
1	Родники	2,0	2,3	1,8	2,0
2	Медовое	1,2	2,0	1,4	1,5
3	Гвардейск	—	1,5	1,0	1,3
4	Ратное	0,9	1,3	1,0	1,1
5	Загородный	1,8	2,8	2,9	2,5

Полученные данные позволили построить линейные интерполяционные зависимости (рис. 5) между коэффициентом пересчета и максимальной глубиной и площадью гидроствора, согласно которым коэффициент R ожидаемо возрастает с увеличением глубины и площади.

Ошибки построенных регрессионных зависимостей составляют 0,41 для зависимости от глубины и 0,44 для зависимости от площади сечения, что в относительных величинах соответствует примерно 70 % от величины стандартного

отклонения от среднего для всего множества коэффициентов R (свидетельствует об удовлетворительной точности предложенных регрессионных зависимостей).

Заключение

Результаты подтвердили потенциальную возможность расчета расходов рек Калининградской области по скоростям течений, полученных при помощи инклинометрических измерителей скорости течения, устанавливаемых в придонных горизонтах. Впервые были рассчитаны соответствующие коэффициенты пересчета, учитывающие разницу между измеренными в придонном горизонте течениями и течениями средними по створу.

Коэффициенты пересчета для количественной оценки величин расходов в руслах Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным инклинометрических измерителей составляют: гидроствор № 1 (Родники) — 2,0; № 2 (Медовое) — 1,5; № 3 (Гвардейск) — 1,3; № 4 (Ратное) — 1,1; № 5 (Загородный) — 2,5. Использование этих коэффициентов пересчета дает приближенную оценку расходов с относительной погрешностью от 5 до 60 %.

В первом приближении получены линейные интерполяционные зависимости (абсолютная погрешность $\pm 0,41 \div 0,44$) коэффициентов пересчета от максимальной глубины и площади гидроствора, которые могут использоваться для других речных створов.

Для снижения погрешности оценок необходимо дальнейшее пополнение базы данных для скоростей речного потока, измеренных в придонном горизонте и по всему поперечному профилю.

Список источников

1. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6) // The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World. R. Kosyan (ed.) Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
2. Ямковая М. В. Индикаторная оценка туристической деятельности на примере Калининградской области // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. Вып. 21. С. 185—191.
3. ВОДОКАНАЛ: Государственное предприятие Калининградской области: Система водоснабжения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/>. Дата обращения: 12.07.2022.
4. Шмакова М. В., Кондратьев С. А. Транспортирующая способность речного потока // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. Вып. 56. С. 176—187.
5. Чалов Р. С. Руслые процессы (руслоедение): учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2016. 565 с.
6. Боскачев Р. В., Чубаренко Б. В., Кондрашов А. А., Корж А. О. Инструментальные инклинометрические измерения течения в реках Преголя и Дейма в период 10.12—26.12.2019 // Процессы в геосредах. 2020. № 3(25). С. 747—754.
7. Пака В. Т., Набатов В. Н., Кондрашов А. А. и др. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 2. С. 220—229.
8. Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 463 с.

9. Тихонова И. О., Кручинина Н. Е., Десятов А. В. Механизм течения рек // Экологический мониторинг водных объектов. М.: ИНФРА-М, 2017. С. 24—28.
10. Нечай И. Я., Силич М. В., Яблонская Т. Гидрография территории бассейна залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н. Н. Лазаренко, А. Маевского. Л.: Гидрометиздат, 1971. С. 10—13.
11. Маркова Л. Л., Нечай И. Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи // Тр. ГОИН. 1960. Вып. 49. С. 118—187.
12. Боскачев Р. В., Чубаренко Б. В. Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика) // Гидрометеорология и экология. 2022. Вып. 69. С. 644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР: Литовская ССР и Калининградская область РСФСР / Под ред. В. Е. Водограцкого. Т. 4, вып. 3. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 508 с.
14. Наумов В. А., Маркова Л. В. Гидрологические и климатические ряды: Статистический анализ для Калининградской области и соседних регионов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 109 с.
15. Чубаренко Б. В., Боскачев Р. В. Возможность перетока вод в системе «Калининградский залив — река Преголя — Куршский залив» // Процессы в геосредах. 2018. № 2(15). С. 911—919.
16. Bolognesi A., Gottardi G., Maglionico M. Discharge measurements in a small ungauged river: comparison between conventional current-meter and tracer dilution methods // River Flow 2006: Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics / R. M. L. Ferreira, E. C. T. L. Alves, J. G. A. B. Leal and A.H. Cardoso (eds.). Taylor&Francis, London, 2006. P. 1835—1842.
17. Le Coz J., Pierrefeu G., Paquier A. Evaluation of river discharges monitored by a fixed side looking Doppler profiler // Water Resources Research. 2008. V. 44, № 4. W00D09. doi: 10.1029/2008WR006967.
18. Nihei Y., Kimizu A. A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation // Water Resources Research. 2008. V. 44, № 4. W00D20. doi: 10.1029/2008WR006970.
19. Houtink A. J. F., Buschman F. A., Vermeulen B. Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river // Water resources research. 2009. V. 45, № 11. W11406. doi: 10.1029/2009WR007791.
20. Gunawan B., Sterling M., Tang X., Knight D. W. Measuring and modelling flow structures in a small river // River Flow 2010: Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics / A. Dittrich, Ka. Koll, J. Aberle, P. Geisenhainer (eds). Bundesanstalt für Wasserbau, 2010. P. 179—186.
21. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость—площадь»: МИ 1759-87: утв. 11.06.86. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1986. 86 с.
22. Chubarenko B., Boskachev R. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea // Baltica. 2021. V. 34, № 1. P. 81—94. doi: 10.5200/baltica.2021.1.7.

References

1. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World. R. Kosyan (ed.) Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
2. Yamkovaya M. V. Indicator assessment of tourism activities on the example of the Kaliningrad Oblast. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2011;(21):185—191. (In Russ.).
3. VODOKANAL: State enterprise of the Kaliningrad region: Water supply system. Available at: <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/> (accessed 07.12.2022). (In Russ.).
4. Shmakova M. V., Kondratiev S. A. Transporting capacity of the river flow. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019;(56):176—187. (In Russ.).

5. Chalov R.S. *Ruslovyye protsessy (ruslovedeniye): uchebnoye posobiye = Channel processes (channel science): study guide*. Moscow: INFRA-M, 2016: 565 p. (In Russ.).
6. Boskachev R.V., Chubarenko B.V., Kondrashov A.A., Korzh A.O. Instrumental inclinometric measurements of flows of the Pregolya and Deima rivers during a period 10.12—26.12.2019. *Protsessy v geosredakh = Processes in Geomedia*. 2020;3(25):747—754. (In Russ.).
7. Paka V. T., Nabatov V. N., Kondrashov A. A. et al. On the improvement of the tilting current meter. *Okeanologicheskie issledovaniya = Journal of Oceanological Research*. 2019;47(2):220—229. (In Russ.).
8. Davydov L. K., Dmitrieva A. A., Konkina N. G. *Obshchaya gidrologiya = General Hydrology*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973: 463 p. (In Russ.).
9. Tikhonova I. O., Kruchinina N. E., Desyatov A. V. *Mechanism techenia rek. Ecologicheskii monitoring vodnykh objektov = The mechanism of river flow. Ecological Monitoring of Water Objects*. Moscow: INFRA-M, 2017: 24—28 p. (In Russ.).
10. Nechay. I. Ya., Silich M. V., Yablonskaya T. *Hydrografia territorii basseina zaliva. Gidrometeorologicheskii rezhim Vislinskogo zaliva = Hydrography of the lagoon basin. Hydrometeorological Regime of the Vistula Lagoon*. N. N. Lazarenko, A. Maevsky (eds.). Leningrad: Gidrometizdat, 1971: 10—13 p. (In Russ.).
11. Markova L. L., Nechay I. Ya. Hydrological outline of the mouth areas of the Neman and Pregolya rivers. *Trudy GOIN = Proc. GOIN*. 1960;(49):118—187 p. (In Russ.).
12. Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic). *Gidrometeorologia i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674.
13. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Litovskaya SSR i Kaliningradskaya oblast' RSFSR = Surface Water Resources of the USSR: Lithuanian SSR and Kaliningrad Oblast of the RSFSR*. V.E. Vodogretsky (ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969;4(3): 508 p. (In Russ.).
14. Naumov V. A., Markova L. V. *Gidrologicheskiye i klimaticheskiye ryady: Statisticheskii analiz dlya Kaliningradskoy oblasti i sosednikh regionov = Hydrological and climatic series: Statistical analysis for the Kaliningrad region and neighboring regions*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013: 109 p. (In Russ.).
15. Chubarenko B. V., Boskachev R. V. Possibility of water overflow in the system “Vistula Lagoon-Pregolya River-Curonian Lagoon”. *Protsessy v geosredakh = Processes in Geomedia*. 2018;(2):911—919. (In Russ.).
16. Bolognesi A., Gottardi G., Maglionico M. Discharge measurements in a small ungauged river: comparison between conventional current-meter and tracer dilution methods. *River Flow 2006. Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*. R. M. L. Ferreira, E. C. T. L. Alves, J. G. A. B. Leal and A. H. Cardoso (eds.). Taylor&Francis, London. 2006: 1835—1842.
17. Le Coz J., Pierrefeu G., Paquier A. Evaluation of river discharges monitored by a fixed side looking Doppler profiler. *Water Resources Research*. 2008;44(4):W00D09. doi: 10.1029/2008WR006967.
18. Nihei Y., Kimizu A. A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. *Water Resources Research*. 2008;44(4):W00D20. doi: 10.1029/2008WR006970.
19. Hoitink A. J. F., Buschman F. A., Vermeulen B. Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river. *Water resources research*. 2009;45(11):W11406. doi: 10.1029/2009WR007791.
20. Gunawan B., Sterling M., Tang X., Knight D. W. Measuring and modelling flow structures in a small river. *River Flow 2010. Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*. A. Dittrich, Ka. Koll, J. Aberle, P. Geisenhainer (eds). Bundesanstalt für Wasserbau, 2010: 179—186.
21. State system for ensuring the uniformity of measurements. Water flow in rivers and canals. *Raskhod vody na rekakh i kanalakh. Metodika vypolneniya izmereniy metodom «skorost' — ploshchad'»*: MI 1759-87. Method for performing measurements using the “speed — area” method: MI 1759-87: approved. 06.11.86. M.: USSR state committee for standards, 1986: 86 p. (In Russ.).
22. Chubarenko, B., Boskachev, R. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea. *Baltica*. 2021;34(1):81—94. doi 10.5200/baltica.2021.1.7.

Информация об авторах

Ефим Игоревич Гмыря, студент, Балтийский Федеральный университет им. Иммануила Канта, gmyryaefim@mail.ru.

Борис Валентинович Чубаренко, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прибрежных систем, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, chuboris@mail.ru.

Information about authors

Efim I. Gmyrya, student, Immanuel Kant Baltic Federal University, gmyryaefim@mail.ru.

Boris V. Chubarenko, PhD (Phys. and Math. Sci.), Head of the Laboratory of Coastal Systems Study, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, chuboris@mail.ru

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.07.2022

Принята к печати после доработки 12.11.2022

The article was received on 20.07.2022

The article was accepted after revision on 12.11.2022