

УДК 556.5

## ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ РАСХОДОВ И УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕКИ ДНЕПР НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

*А. А. Волчек, Д. А. Шпока*

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, volchak@tut.by

### **Аннотация**

В статье представлены результаты анализа хронологического хода расходов и уровней воды, а также их взаимосвязь р. Днепр на территории Беларуси, по гидрологическим постам: г. Орша, г. Могилев, г. Жлобин, г. Речица.

**Ключевые слова:** уровень воды, расход, весеннее половодье, параметры уровня, гидрологический створ.

### **ASSESSMENT OF RELATIONSHIP OF DISCHARGES AND WATER LEVELS OF THE DNEPR RIVER IN THE TERRITORY OF BELARUS**

*A .A. Volchak, D. A. Shpoka*

### **Abstract**

The article presents the results of the analysis of the chronological course of flow rates and water levels, as well as their interrelation of the river. Dnieper on the territory of Belarus, at hydrological posts: Orsha, Mogilev, Zhlobin, Rechitsa.

**Keywords:** water level, discharge, spring flood, level parameters, hydrological section.

**Введение.** Современное потепление климата и постоянно возрастающие антропогенные нагрузки вносят существенные изменения в естественный ход функционирования водных объектов, что требует детальных исследований для выявления основных закономерностей с целью минимизации негативных последствий и рационального использования водных ресурсов.

В настоящее время выполнены детальные исследования изменения расходов воды рек Беларуси, вызванные современным потеплением климата и антропогенными воздействиями [1–8], менее исследованы изменения уровней воды [9 – 11], а по вопросам изменения взаимосвязи расходов и уровней воды имеются лишь единичные работы.

Одной из главных характеристик любой реки является расход, определение которого весьма трудоемкая операция. Поэтому на практике обычно устанавливают зависимость уровней воды от расходов, которые являются достаточно устойчивыми. В дальнейшем измеряют уровни и по ним вычисляют расходы воды.

Целью настоящего исследования является оценка влияния климатических факторов и антропогенных воздействий на устойчивость взаимосвязей расходов и уровней воды для различных фаз водного режима на примере р. Днепр в пределах территории Беларуси.

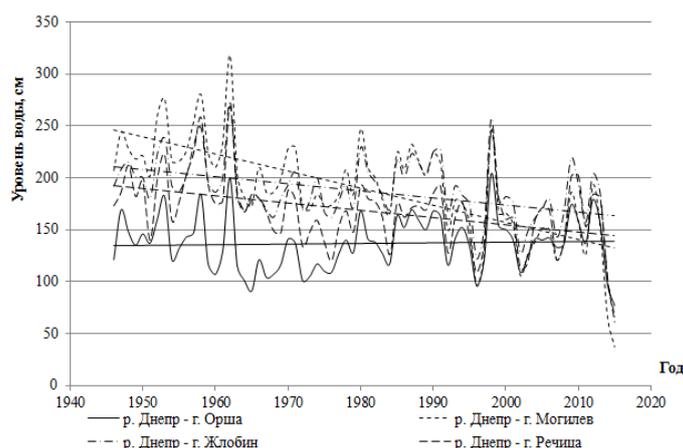
**Материалы и методы.** Объектом исследований выбрана река Днепр, которая является одной из основных рек Беларуси с площадью водосбора 118,4 км<sup>2</sup> и длиной 689 км в пределах страны.

В ходе исследования использовались данные средних годовых, максимальных весеннего половодья, минимальных периода открытого русла, минимальных зимних расходов и соответствующих уровней воды в створах: г. Орша, г. Могилев, г. Жлобин, г. Речица с площадями водосбора  $A=18000 \text{ км}^2$ ,  $A=20800 \text{ км}^2$ ,  $A=30300 \text{ км}^2$  и  $A=58200 \text{ км}^2$  соответственно.

В основу исследований положены статистические методы, которые позволяют дать качественные и количественные параметры изменения стока. При статистическом анализе временных рядов использованы следующие методики: для выявления тенденций изменений расходов и уровней воды использовались хронологические графики колебаний, линейные тренды [12–14].

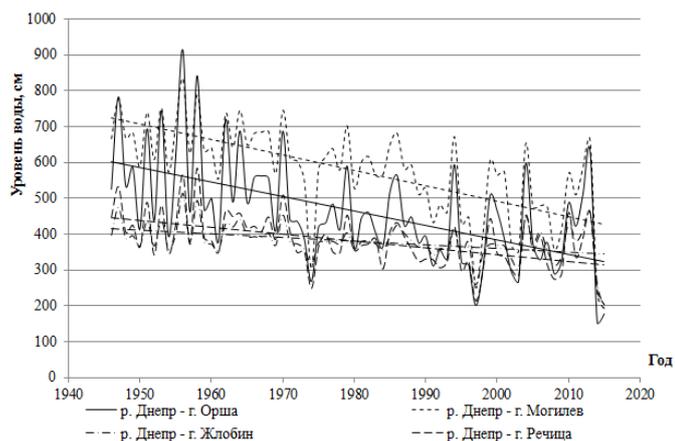
Для оценки взаимосвязи расходов и уровней воды исследовалась устойчивость связей  $H=f(Q)$ , где  $H$  – уровень воды, см,  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ . При этом оценивалось также влияние антропогенного воздействия и современного потепления климата. Для этого анализировались интервалы осреднения исходных временных рядов: с 1946 по 2015 гг. (весь период наблюдений); с 1946 по 1987 гг. (до начала современного потепления климата); с 1988 по 2015 гг. (период потепления). Проверялись две гипотезы: одна о равенстве выборочных средних (с помощью критерия Стьюдента), а вторая о идентичности колебаний (с помощью критерия Фишера).

**Результаты и обсуждения.** Анализ среднегодовых уровней воды р. Днепр в расчетных створах показал, что практически по всем рассматриваемым гидрологическим постам наблюдается снижение уровня воды, кроме г. Орша, где за весь исследуемый период уровень воды остается стабильным (рисунок 1). Это связано с минимальными антропогенными воздействиями выше рассматриваемого створа, меньшими климатическими изменениями по сравнению с другими рассматриваемыми створами.



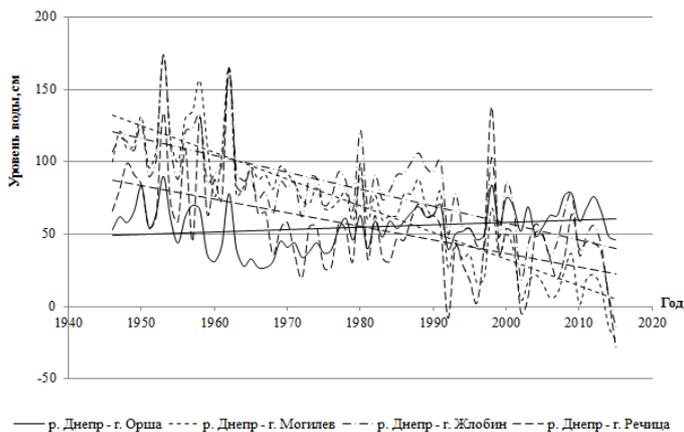
**Рисунок 1** – Многолетний ход средних годовых уровней воды на р. Днепр

Что касается максимальных уровней воды весеннего половодья, здесь как и для Беларуси в целом падение расходов воды вызывает устойчивое снижение уровней, исключение составляет уровень воды в створе г. Речица в интервале 1988–2015 гг., имеет место постоянство уровней (рисунок 2).



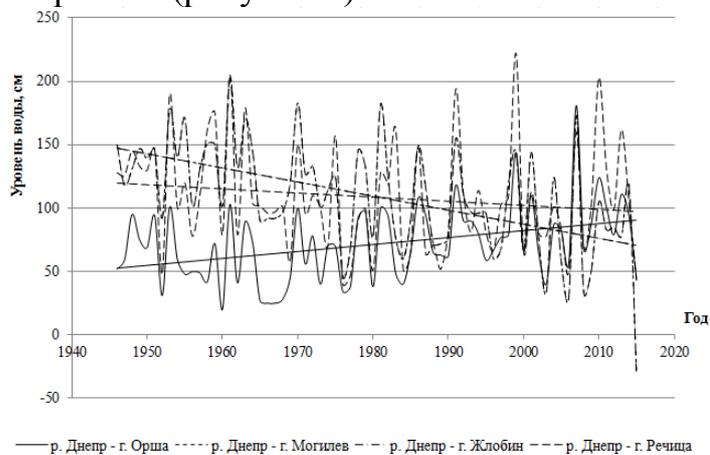
**Рисунок 2** – Многолетний ход максимальных уровней воды весеннего половодья на р. Днепр

Для минимальных уровней воды периода открытого русла реки наблюдается повсеместное снижение, кроме гидрологического поста в г. Орша за периоды 1946 по 2015 гг. и 1988 по 2015 гг., 1,5 см/10 лет и 1,8 см/10 лет соответственно, где наблюдается незначительная тенденция к повышению (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Многолетний ход минимальных уровней воды периода открытого русла на р. Днепр

Частые зимние оттепели привели к росту уровней воды в зимний период для рассматриваемых интервалов (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Многолетний ход минимальных уровней воды зимнего периода на р. Днепр

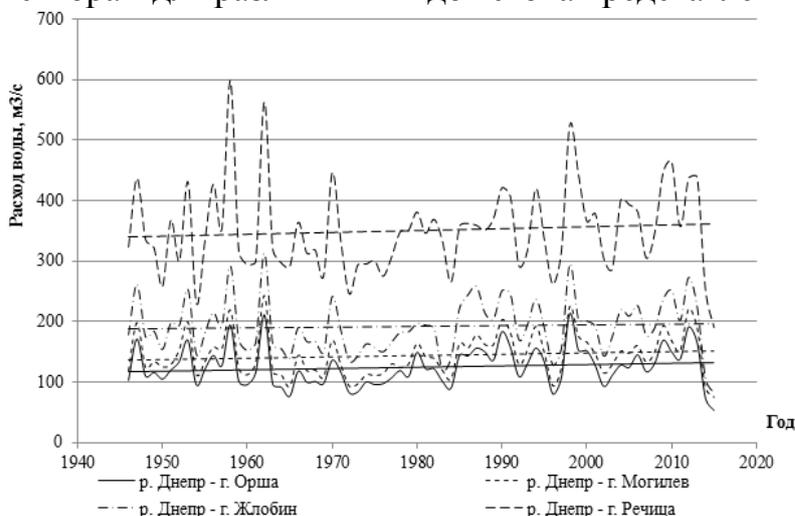
Статистическая значимость уравнений трендов хронологического хода уровней и расходов воды представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Коэффициенты корреляции трендов хронологического хода расходов и уровней воды р. Днепр

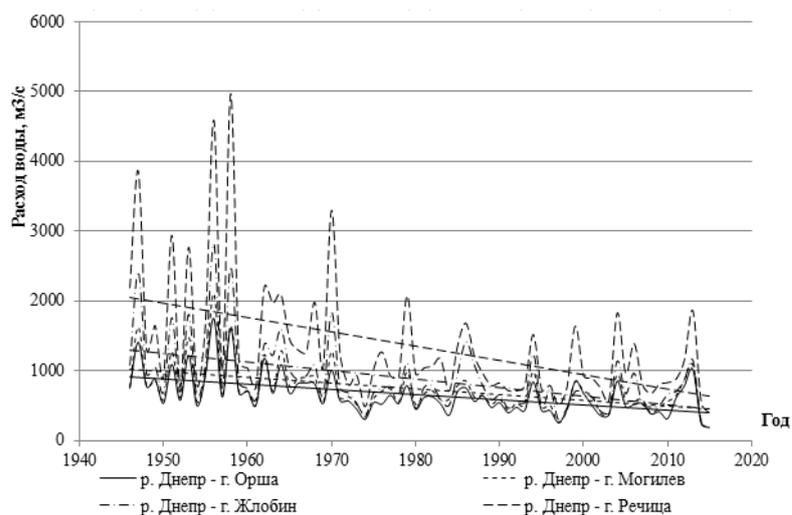
Гидрологический пост	Период осреднения	Уровень воды			Расход воды		
		1946-2015	1946-1987	1988-2015	1946-2015	1946-1987	1988-2015
г. Орша	Средние годовые	0,04	-0,11	-0,20	0,14	-0,11	-0,19
г. Могилев		<b>-0,69</b>	<b>-0,41</b>	<b>-0,57</b>	0,14	-0,13	-0,18
г. Жлобин		<b>-0,42</b>	-0,22	<b>-0,45</b>	0,06	-0,10	-0,19
г. Речица		<b>-0,41</b>	<b>-0,44</b>	-0,23	0,08	-0,11	-0,07
г. Орша	Максимальные уровни весеннего половодья	<b>-0,55</b>	<b>-0,43</b>	-0,03	<b>-0,51</b>	<b>-0,46</b>	-0,03
г. Могилев		<b>-0,66</b>	<b>-0,41</b>	-0,21	<b>-0,48</b>	<b>-0,39</b>	0,001
г. Жлобин		<b>-0,41</b>	-0,30	-0,10	<b>-0,49</b>	<b>-0,38</b>	-0,03
г. Речица		<b>-0,52</b>	<b>-0,38</b>	0,01	<b>-0,47</b>	<b>-0,37</b>	0,08
г. Орша	Минимальные уровни периода открытого русла	0,21	-0,25	0,13	<b>0,38</b>	0,11	-0,13
г. Могилев		<b>-0,89</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,78</b>	<b>0,32</b>	-0,17	0,03
г. Жлобин		<b>-0,73</b>	<b>-0,49</b>	<b>-0,65</b>	<b>0,28</b>	0,15	-0,29
г. Речица		<b>-0,56</b>	<b>-0,51</b>	-0,28	<b>0,26</b>	0,27	-0,28
г. Орша	Минимальные уровни зимнего периода	<b>0,37</b>	0,11	0,16	<b>0,54</b>	<b>0,35</b>	0,11
г. Могилев		<b>-0,53</b>	<b>-0,35</b>	-0,25	<b>0,64</b>	<b>0,32</b>	0,06
г. Жлобин		-0,07	-0,20	0,08	<b>0,61</b>	<b>0,36</b>	0,09
г. Речица		-0,15	<b>-0,33</b>	0,11	<b>0,53</b>	0,26	-0,01

*Примечание.* Полужирным выделены статистически значимые величины коэффициентов корреляции ( $r$ ).

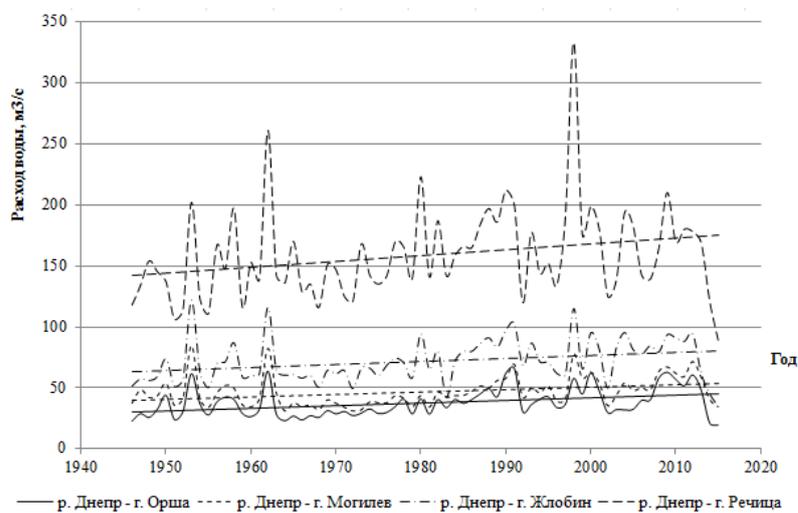
Хронологически ход расходов воды в рассматриваемых створах представлен на рисунках 5–8. В ходе проведенного анализа видно, что средние годовые расходы имеют некую стабильность. Максимальные расходы весеннего половодья устойчиво снижаются. Минимальные расходы периода открытого русла реки имеют некий рост, вызванный крупномасштабными мелиорациями. Минимальные расходы зимнего периода растут в связи с частыми оттепелями. Значимость линейных трендов хронологического хода расходов воды по рассматриваемым створам для различных видов стока представлены в таблице 1.



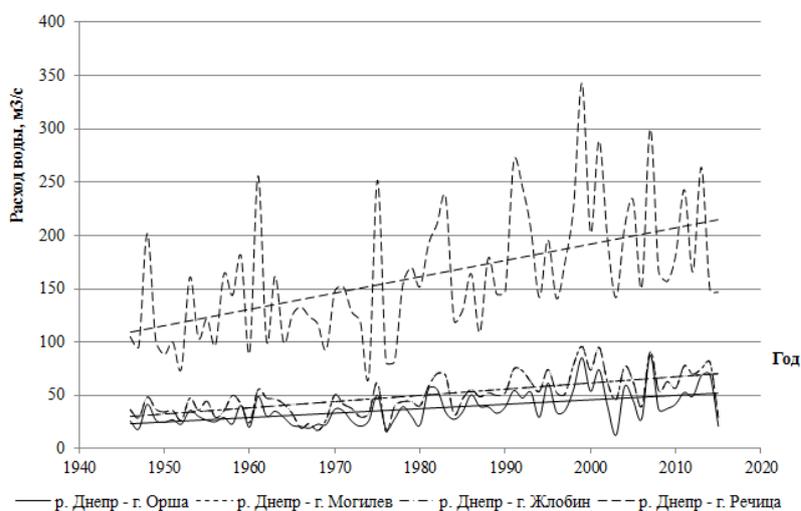
**Рисунок 5** – Многолетний ход средних годовых расходов воды р. Днепр



**Рисунок 6** – Многолетний ход максимальных расходов воды весеннего половодья р. Днепр



**Рисунок 7** – Многолетний ход минимальных расходов воды периода открытого русла р. Днепр



**Рисунок 8** – Многолетний ход минимальных расходов воды зимнего периода р. Днепр

Таким образом, наблюдается некоторая асинхронность в формировании уровней и расходов воды в рассматриваемых створах на р. Дрепр.

Для оценки изменения взаимосвязей уровней и расходов выполнена их аппроксимация линейными уравнениями

$$H = \alpha \cdot Q + H_0, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициенты регрессии,  $\text{с/м}^2$ ;  $H_0$  – значение уровня воды при  $Q \rightarrow 0$  отсчитываемое от нуля графика поста, см.

Параметры уравнения по створам реки представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, практически все взаимосвязи  $H=f(Q)$  устойчивы и статистически значимы, исключение составляют минимальные значения на гидрологическом посту в г. Могилев за период с 1946–2015 гг. в период открытого русла реки и зимний период,  $r=0,03$  и  $r=0,14$  соответственно. На рисунке 9 представлен в качестве примера график регрессионной зависимости  $H=\alpha \cdot Q + \beta$ .

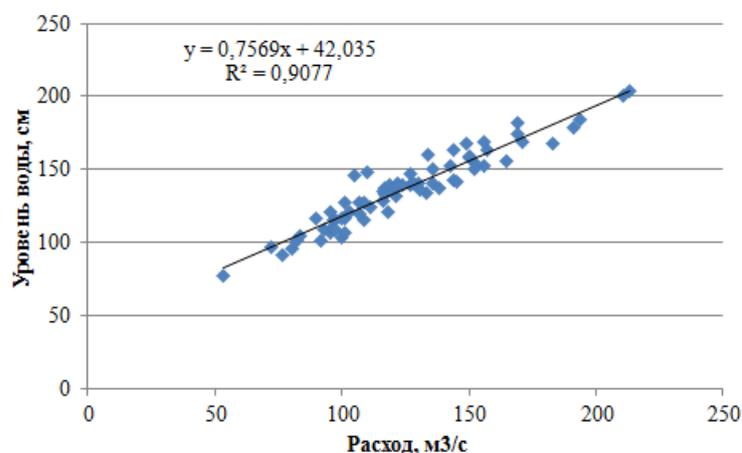


Рисунок 9 – График взаимосвязи средних годовых колебаний  $H=f(Q)$  р. Днепр – г. Орша за период с 1946 по 2015 гг.

Таблица 2 – Параметры зависимости  $H=f(Q)$

Период осреднения	Гидрологические створы											
	г. Орша			г. Могилев			г. Жлобин			г. Речица		
Параметры	$\alpha$	$H_0$ , см	$r$	$\alpha$	$H_0$ , см	$r$	$\alpha$	$H_0$ , см	$r$	$\alpha$	$H_0$ , см	$r$
Средние годовые значения												
1946–2015	7,57	42,04	<b>0,95</b>	7,19	85,76	<b>0,53</b>	5,33	85,11	<b>0,73</b>	3,49	46,04	<b>0,75</b>
1946–1987	8,04	38,46	<b>0,94</b>	8,71	93,46	<b>0,87</b>	4,35	115,05	<b>0,77</b>	3,07	71,35	<b>0,73</b>
1988–2015	7,47	40,43	<b>0,98</b>	11,16	-18,53	<b>0,88</b>	7,58	22,70	<b>0,91</b>	4,83	-18,93	<b>0,96</b>
Максимальные значения весеннего половодья												
1946–2015	4,82	145,05	<b>0,96</b>	3,26	334,54	<b>0,83</b>	0,85	305,79	<b>0,85</b>	0,74	279,69	<b>0,88</b>
1946–1987	4,38	190,1	<b>0,99</b>	2,13	462,06	<b>0,86</b>	0,68	324,34	<b>0,98</b>	0,61	309,53	<b>0,94</b>
1988–2015	5,41	97,06	<b>0,91</b>	5,32	169,17	<b>0,93</b>	1,95	233,94	<b>0,88</b>	1,57	190,65	<b>0,87</b>
Минимальные значения периода открытого русла												
1946–2015	9,77	17,92	<b>0,79</b>	1,15	63,21	0,03	7,04	29,85	<b>0,39</b>	5,10	-26,11	<b>0,57</b>
1946–1987	13,67	4,82	<b>0,80</b>	17,92	18,56	<b>0,70</b>	11,01	22,17	<b>0,73</b>	6,20	-27,04	<b>0,62</b>
1988–2015	6,99	30,15	<b>0,80</b>	12,51	-37,30	<b>0,52</b>	12,89	-44,98	<b>0,82</b>	6,87	-79,93	<b>0,97</b>
Минимальные значения зимнего периода												
1946–2015	14,77	15,86	<b>0,79</b>	3,27	92,59	0,14	6,99	71,69	<b>0,51</b>	3,83	46,26	<b>0,53</b>
1946–1987	19,45	2,35	<b>0,74</b>	12,90	72,83	<b>0,46</b>	12,59	47,72	<b>0,59</b>	5,7	32,82	<b>0,64</b>
1988–2015	13,37	21,05	<b>0,79</b>	22,22	-59,75	<b>0,84</b>	10,73	20,12	<b>0,75</b>	5,75	-10,50	<b>0,69</b>

Примечание. Полужирным выделены статистически значимые величины коэффициентов корреляции ( $r$ ).

С использованием статистических критериев выполнена оценка различий в параметрах модели  $H=f(Q)$  для интервалов осреднения 1946 – 1987 и 1988 – 2015 гг. [13, 14] для различных видов стока рассматриваемых створов р. Днепр. Как показал анализ, статистически значимые различия произошли в гидростворе г. Орша для максимального стока, минимального стока открытого русла, минимального зимнего стока; в гидростворе г. Могилев для среднегодового стока, максимального стока, минимального зимнего стока; в гидростворе г. Жлобин для среднегодового стока; в гидростворе г. Речица для среднегодового стока, максимального стока.

**Заключение.** Таким образом, в ходе анализа хронологического хода расходов и уровней воды р. Днепр в гидрологических створах г. Орша, г. Могилев, г. Жлобин и г. Речица выявлены статистически значимые различия не только в характере их колебаний, а также во взаимосвязи расходов и уровней воды.

#### Список цитированных источников

1. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск : Тонпик, 2006 – 160 с.
2. Волчек, А. А. Минимальный сток рек Беларуси / А. А. Волчек, О. И. Грядунова // Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2010. – 169 с.
3. Волчек, А. А. Закономерности формирования водного баланса речных водосборов Беларуси : Формирование водного баланса Беларуси / А. А. Волчек // Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 387 с.
4. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси : современное состояние и прогноз / А. А. Волчек, В. В. Лукша, С. И. Парфомук // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 177 с.
5. Волчек, А. А. Половодья на реках Беларуси: закономерности формирования и прогноз / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 216 с.
6. Логинов, В. Ф. Весенние половодья на реках Беларуси : пространственно-временные колебания и прогноз / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек – Минск : Беларуская навука, 2014. – 244 с.
7. Волчек, А. А. Паводки на реках Беларуси : монография / А. А. Волчек, Т. А. Шелест ; Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2016. – 199 с.
8. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак ; под общ. ред. А. А. Волчек, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
9. Алексеевский, Н. И. Генетические составляющие и прогноз уровня воды в р. Оке в период половодья / Н. И. Алексеевский, Т. А. Акименко, Г. В. Круглова, М. А. Самохин // Тр. Академии проблем водохозяйственных наук, 2003. – Вып. 11. – С. 40–50.
10. Алексеевский, Н. И. Механизмы изменения уровней воды в реках / Н. И. Алексеевский, А. Г. Ободовский, М. А. Самохин // Эрозионные и русловые процессы, 2005. – Вып. 4. – С. 216–237.

11. Волчек, А. А. Оценка колебаний максимальных уровней воды рек бассейна Припяти на территории Беларуси / А. А. Волчек, И. Н. Шпока, Д. А. Шпока // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2020. – № 2. – С. 27–30.
12. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
13. Статистические методы в природопользовании : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, П. С. Пойта, П. В. Шведовский. – Брест : Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
14. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.

UDC 626/627:631.6

## **ESTIMATION OF BREAKING RISKS OF ZHINVALI EARTH DAM TAKING INTO CONSIDERATION THE “CAPRA”**

*G. V. Gavardashvili, E. G. Kukhalashvili, T. G. Supatashvili, I. R. Iremashvili,  
I. A. Qufarashvili, K. G. Bziava, G. T. Natroshvili*

Tsotne Mirskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, givi\_gava@yahoo.com

### **Abstract**

Georgia is one of the most vulnerable countries to natural disasters within South Caucasus Region. In recent years, the disaster risk has increased due to faulty land-use. Outstanding building codes lead to inadequate building construction. There is a lack of real data on natural disasters and the impact of mudflows, floods, debris flows etc. on land-use planning and prompt actions after above mentioned catastrophes. Therefore, it is important task to carry out assessments of critical structures sensitive to natural threats such as dams and reservoirs. In order to be able to improve the resistance of hydraulic engineering structures it is necessary to utilize a formal risk analysis framework, such as the Critical Asset and Portfolio Risk Analysis (CAPRA) method. The scientific article examined the creation of a framework for the condition of the earth dam and risk management using the analysis of the critical state and the risk portfolio, which was developed by Professor Billal Ayyub who represents Maryland University in USA, to examine human-caused threats, such as terrorism events, and natural hazards, such as flooding due to dam failures, with focus on potential failure modes due to deterioration. For this purpose, based on the field and theoretical studies, the regulation of hydrological (floods, debris-flows, snow avalanches), geological (erosion, mudflows), and seismic (earthquake), as well as those natural disasters formed in the water area of Zhinvali Reservoir, which determines the stability and reliability of the Zhinvali Earth Dam, is estimated using existing statistical data and theory of reliability and risk. Special attention is paid to