ISSN: 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

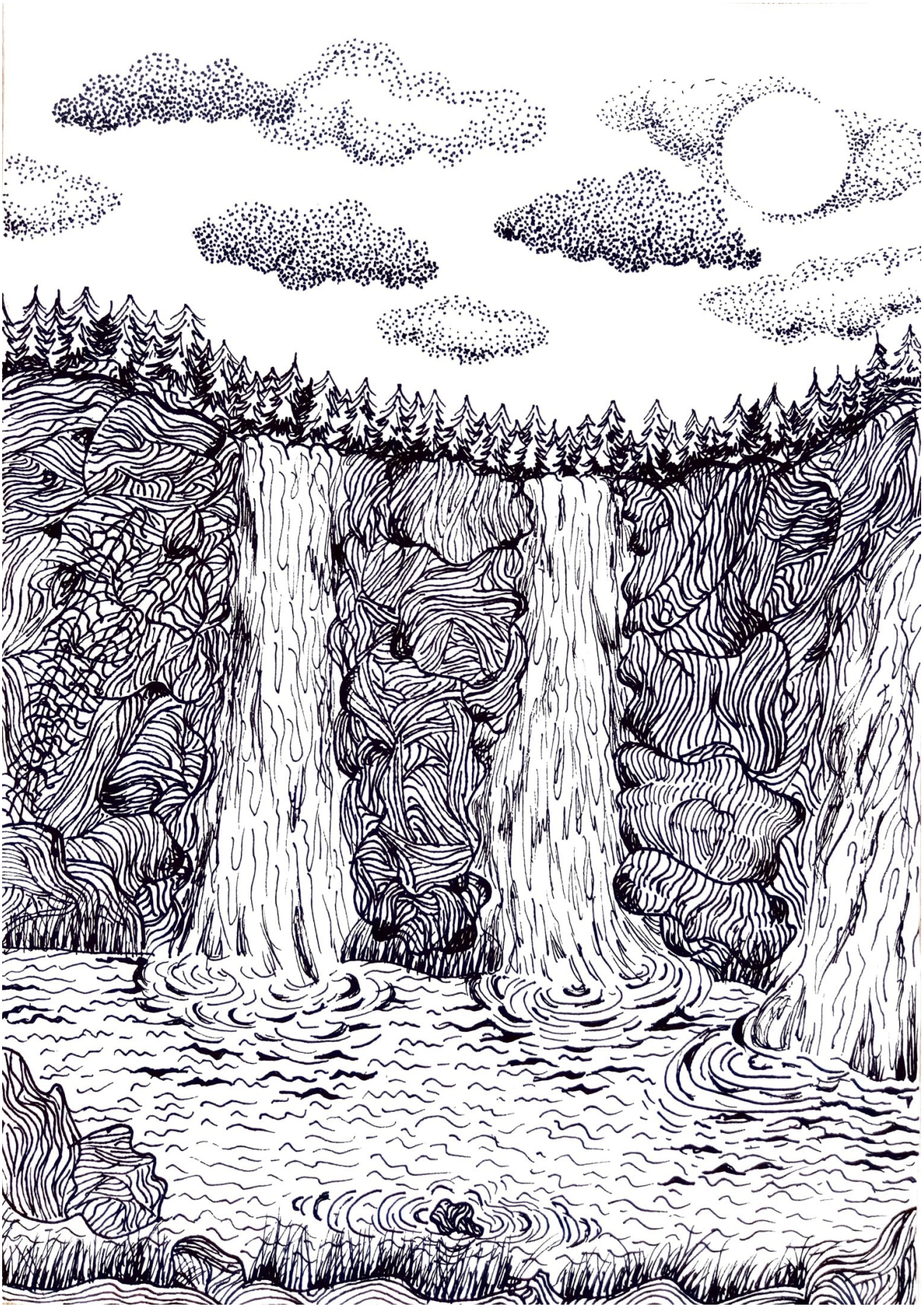
ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 6 Выпуск 2



Корниевич Таисия. *Живительные потоки*

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 6, Выпуск 2

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

2686-8385 (online)

Учредители журнала

Научно-исследовательский центр «Геодинамика»
Научно-производственное объединение «Гидротехпроект»
Институт водных проблем Российской академии наук

Главный редактор

академик РАН **Г.И. Долгих**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор (г. Владивосток, Россия)

Заместители главного редактора

докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом гидрологии речных бассейнов (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)

Ответственный секретарь

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия), тел.: +7(812)313-83-48, e-mail: os@hydro-sphere.ru

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Volume 6, Issue 2

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)

2686-8385 (online)

Founders

Research Center «Geodynamics»
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences

Editor-In-Chief

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)

Deputy Editor-In-Chief

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of of Hydrology of River Basins (Moscow, Russia)
Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University of Russia (Saint-Petersburg, Russia)
Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Executive Editor

Victor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia), tel. +7(812)313-83-48, e-mail: os@hydro-sphere.ru

Редакционный совет

академик РАН **Г.И. Долгих**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор (г. Владивосток, Россия)
докт. техн. наук **А.Ю. Виноградов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман**, Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрологии наводнений (г. Москва, Россия)
член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом гидрологии речных бассейнов (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия)

Editorial Council

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)
Boris I. Gartsman, Doctor of Science, Head of Flood Hydrology Department of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of of Hydrology of River Basins (Moscow, Russia)
Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University (Saint-Petersburg, Russia)
Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Victor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Редакционная коллегия

докт. биол. наук **В.Н. Безносов**, Научно-производ-ственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук **В.П. Благовещенский**, Институт географии Республики Казахстан, заведующий лабораторией природных опасностей (г. Алматы, Казахстан)
докт. физ.-мат. наук **Ф.Ф. Брюхань**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», руководитель проектов (г. Санкт-Петербург, Россия)
канд. геогр. наук, с.н.с. **Т.А. Виноградова**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», старший научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)
проф. **Ф. Вэй**, Институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, заместитель директора (г. Чунцин, КНР)
член-корреспондент РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Victor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Fedor F. Bryukhan, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia)
Pavel A. Chernous, Ph.D., Leading Researcher of the Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover of the Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Сибирского отделения Российской академии наук, директор (г. Улан-Удэ, Россия)
докт. физ.-мат. наук **В.К. Гусяков**, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией математического моделирования волн цунами (г. Новосибирск, Россия)
докт. **В. Джомелли**, Институт экологии и окружающей среды Национального центра научных исследований Франции, Университета Пантеон-Сорбонна и Университета Париж-Восток Кретей, директор по исследованиям (г. Париж, Франция)
проф. **К. де Йонг**, Страсбургский университет, заведующая кафедрой международных отношений факультета географии и регионального планирования (г. Страсбург, Франция)
член-корреспондент РАН **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделе-ния Российской академии наук, заведующий ла-бораторией вычислительной гидромеханики и океанографии (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Н.А. Калинин**, Пермский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы (г. Пермь, Россия)
академик РАН **Б.М. Кизяев**, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, научный руководитель (г. Москва, Россия)
докт. геол.-мин. наук, доц. **А.А. Лаврусевич**, Московский государственный строительный университет, заведующий кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)
академик НАН Беларуси **В.Ф. Логинов**, Институт природопользования НАН Беларуси, главный научный сотрудник (г. Минск, Беларусь)
канд. геогр. наук, доц. **М.Л. Марков**, Государственный гидрологический институт, заведующий отделом прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии (г. Санкт-Петербург, Россия)
академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии Республики Казахстан, директор (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **Р.Я. Миньковская**, Морской гидрофизический институт РАН, старший научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа (г. Севастополь, Россия)

(Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria)
Endon Zh. Garmaev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
Viacheslav K. Gusiakov, Doctor of Science, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Tsunami Waves (Novosibirsk, Russia)
Vincent Jomelli, Ph.D., Research Director of the Institute of Ecology and Environment of the French National Center for Scientific Research, the University Panthéon-Sorbonne and the University Paris-Est Créteil (Paris, France)
Carmen de Jong, Professor, Head of International Relations at the Faculty of Geography and Regional Planning, University of Strasbourg (Strasbourg, France)
Nicolay A. Kalinin, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection of the Perm State University (Perm, Russia)
Boris M. Kizyaev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation (Moscow, Russia)
Andrey A. Lavrusevich, Doctor of Science, Head of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Vladimir F. Loginov, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Chief Researcher of Institute for Environmental Management (Minsk, Belarus)
Mikhail L. Markov, Associate Professor, Head of the Department of Forecasting Hydrological Processes and Experimental Hydrology of the State Hydrological Institute (Saint-Petersburg, Russia)
Akhmetkal R. Medeu, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Director of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Rosa Ya. Minkovskaya, Doctor of Science, Senior Researcher of the Shelf Hydrophysics Department of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences (Sevastopol, Russia)

проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)
член-корреспондент РАН **А.В. Панин**, Институт географии Российской академии наук, заместитель директора по научной работе (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, Институт географии Республики Казахстан, почётный директор; научный руководитель фундаментальных и прикладных исследований лаборатории гляциологии; вице-президент Международной гляциологической ассоциации (г. Алматы, Казахстан)
канд. геогр. наук, доцент **С.А. Сократов,** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, заместитель декана географического факультета по научной работе (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Е.А. Таланов,** Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, профессор кафедры метеорологии и гидрологии (г. Алматы, Казахстан)
академик РАН **А.К. Тулохонов,** Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, научный руководитель (г. Улан-Удэ, Россия)
докт. геол-мин. наук **В.Е. Тумской**, Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории общей геокриологии (г. Якутск, Россия)
докт. техн. наук, проф. **С.А. Угрюмов**, Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова, заведующий кафедрой (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. **С. Фукс**, Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)
канд. геогр. наук, доц. **С.С**. **Черноморец**, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **П.А. Черноус**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)

Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Andrey V. Panin, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of fundamental and applied researches of the Department of Glaciology of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Sergey V. Shvarev, Ph.D., Head of the Laboratory of Geomorphology of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Sergey A. Sokratov, Ph.D. in Environmental & Earth Sci., Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yevgeniy A. Talanov, Doctor of Science, Professor, Professor of the Meteorology and Hydrology Department Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan)
Arnold K. Tulokhonov, Academician of the Russian Academy of Sciences Scientific, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
Vladimir E. Tumskoy, Doctor of Science, Chief Researcher of the Laboratory of General Geocryology of the Melnikov Permafrost Institute Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia)
Sergey A. Ugryumov, Professor, Doctor of Science, Head of department at St. Petersburg Forestry University named after. C.M. Kirov (St. Petersburg, Russia)
Tatiana A. Vinogradova, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Fangqiang Wei, Professor, Vice-Director of the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences (Chongqing, China)
Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Satoru Yamaguchi, Ph.D., Chief Researcher of the Snow and Ice Research Division of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Nagaoka, Japan)

канд. тех. наук **С.В. Шварёв**, Институт географии Российской академии наук, заведующий лабораторией геоморфологии (г. Москва, Россия)
докт. **С. Ямагучи**, Научно-исследовательский центр снега и льда Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям, старший научный сотрудник (г. Нагаока, Япония)

Andrey I. Zaitsev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Laboratory of Computational Hydromechanics and Oceanography of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Круковской Ольги Юрьевны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019.

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru to technical editor **Olga Krukowskaya**.
Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.
Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77-76914** from 11.10.2019.

Издание включено в **«Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»** по специальностям (отраслям):
1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (Геолого-минералогические)
1.6.8. Гляциология и криология Земли (Географические)
1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (Географические)
1.6.14. Геоморфология и палеогеография (Географические)
1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (Географические)
1.6.17. Океанология (Физико-математические)
1.6.18. Науки об атмосфере и климате (Географические)
1.6.21. Геоэкология (Географические)
2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (Технические)
4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (Технические)

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»
АДРЕС РЕДАКЦИИ:
г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений:
199155, г. Санкт-Петербург, а/я 136 Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
EDITORIAL ADDRESS:
Russia, Saint-Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island, 97 of. 3n. For corresponding: 199155 Russia, Saint-Petersburg, PO Box 136. Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»
Tel. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 110

Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа: проблема «коротких» притоков В.Ф. Толкачева, Б.И. Гарцман, А.Л. Энтин 110

Оптимизация параметров методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности на примере бассейна реки Белой И.А. Хасанов, А.Н. Елизарьев, Д.А. Тараканов, Дм.А. Тараканов 125

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ 138

Влияние стока реки Черной (Севастопольский регион) на устьевое взморье во время паводков Р.Я. Миньковская, А.Н. Демидов, С.В. Наривончик 138

Организация предотвращения чрезвычайных ситуаций на примере работы гидроузлов Волжско-Камского каскада А.Н. Гордиенко, О.И. Рожко, А.И. Петрученко 157

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 169

Климатические и не климатические факторы формирования стока в бассейне реки Битюг Е.В. Гуревич 169

Оценка стока рек юго-западного Крыма с учетом природно-антропогенных изменений Р.Я. Миньковская, С.В. Наривончик, И.А. Свищева, Д.А. Антоненков, А.Н. Демидов 191

Международный научный семинар «Гидросфера: современные методы и технологии натурных исследований» 214

НЕКРОЛОГ
Памяти Бориса Владимировича Боревского 216

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 219

CONTENTS

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 110

Modeling of river network based on digital elevation model: the problem of 'short' tributaries Vasilisa F. Tolkacheva, Boris I. Gartsman, Andrey L. Entin..... 110

Optimization of parameters of hydrograph dissection methods to increase their effectiveness on the example of the Belaya river basin Ilmir A. Khasanov, Alexey N. Elizaryev, Denis A. Tarakanov, Dmitry A. Tarakanov..... 125

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS 138

The effect of the runoff of the Chernaya River (Sevastopol region) on the estuarine coast during floods Roza Ya. Minkovskaya, Alexander N. Demidov, Svetlana V. Narivonchik 138

Organization of emergency forecasting during the flood period on the example of a pass through the waterworks of the Volga-Kama cascade Aleksey N. Gordienko, Oleg I. Rozhko, Alexandra I. Petruchenko 157

MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH 169

Climatic and non-climatic factors of runoff formation in the basin of the Bityug river Elena V. Gurevich 169

Assessment of river flow in southwestern Crimea given natural and anthropogenic changes Roza Ya. Minkovskaya, Svetlana V. Narivonchik, Irina A. Svishcheva, Dmitriy A. Antonenkov, Alexander N. Demidov 191

AUTHORS GUIDELINE 219

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 551.4:571.6 DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.110

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА: ПРОБЛЕМА «КОРОТКИХ» ПРИТОКОВ

В.Ф. Толкачева[1], Б.И. Гарцман[1], А.Л. Энтин [2,1]

[1] Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; [2] Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru

Аннотация. Развитие гидрологического моделирования в условиях нестационарного климата и динамичности ландшафтного строения речных бассейнов при дефиците данных наблюдений, требует привлечение нового массива данных – данных анализа рельефа бассейнов и структуры речных систем. Появление глобальных цифровых моделей рельефа высокого разрешения создало принципиально новые возможности и требует разработки программного инструментария целевой обработки таких моделей. Принимая во внимание, что в последнее десятилетие структурно-гидрографический анализ речных систем столкнулся с размыванием и, в перспективе, утратой прежнего образа объекта исследований, и с потерей взаимной связи между структурой речной системы и рельефом её бассейна, если они получены из различных источников данных, исследования в этом направлении становятся ключевым для развития всего научного направления. В статье рассматривается некоторые аспекты получения адекватных моделей речной сети на основе цифровых моделей рельефа. Целью и основой исследования является развитие методов и технологии моделирования речной сети на основе

MODELING OF RIVER NETWORK BASED ON DIGITAL ELEVATION MODEL: THE PROBLEM OF 'SHORT' TRIBUTARIES

Vasilisa F. Tolkacheva[1], Boris I. Gartsman[1], Andrey L. Entin[2,1]

[1] Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia; [2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru

Abstract. The developing of hydrological modeling under the conditions of a non-stationary climate, changing landscape of river basins, and a lack of observational data, asks the use of new data, such as terrain analysis data and data on the structure of river systems. The advent of high-resolution digital elevation models has opened up new opportunities in modeling. However, such modeling with modern data requires the development of new software and tools. In the past decade, structural-hydrographic analysis of river systems, as a scientific field, has faced as the blurring and, potentially, the loss of its research subject, as the loss of the main interrelationship "the river system - the topography of the basin of this system", if the data are obtained from different sources. Research with this subject is becoming key to the preservation and development of the entire scientific field. This article discusses some aspects of obtaining adequate models of the river network based on digital elevation models. The aim and basis of the research is the development of methods and technology for modeling the river network based on digital elevation models using various spatial data.

In a territory with a "young" topography and a non-equilibrium nature of river systems (the Black Sea coast of the Caucasus), using customized tools-

Tolkacheva V. F., Gartsman B. I., Entin A. L. Modeling of river network based on digital elevation model: the problem of 'short' tributaries. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 110–124. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.110.

цифровых моделей рельефа с использованием пространственных данных, представляющих климатические характеристики.

На территории Черноморского побережья Кавказа, характеризующегося геологической «молодостью» рельефа и явно неравновесным характером речных систем на этапе активного врезания, с помощью авторских инструментов-надстроек для среды ArcGIS Desktop проведено моделирование речной сети в трех бассейнах, с различными общими высотными характеристиками рельефа, по 7 вариантам функции инициации. Выявлена и проработана методически новая концептуальная проблема, искажающая процесс калибровки моделей речной сети и препятствующая получению адекватных результатов моделирования. Авторами предложена оригинальная модель автоматического построения речной сети с двумя калибруемыми параметрами. Получены предварительные данные о разнородности характера формирования речной сети в разнообразных ландшафтных условиях, выраженных в различной значимости фактора уклона, а также в ландшафтно-обусловленных пространственных различиях пороговых значений функций инициации.

Ключевые слова: структурно-гидрографический анализ; речные сети; инструменты автоматизированной оцифровки; цифровая модель рельефа; функции инициации; моделирование.

add-ons for the ArcGIS Desktop environment, river network modeling was carried out in three basins according to 7 variants of the initiation function. A new conceptual problem was identified and methodically elaborated, which distorts the process of calibrating river network models and hinders the obtaining of adequate modeling results. The authors proposed an original model for the automatic construction of a river network with two calibrated parameters. Preliminary data were obtained on the heterogeneity of the nature of the formation of the river network in various landscape conditions, expressed in the different significance of the slope factor, as well as in landscape-conditioned spatial differences in the threshold values of the initiation functions.

Keywords: structural-hydrographic analysis; river networks; automated digitization tools; digital elevation model; initiation functions; modeling.

Введение

В настоящее время ясно обозначился этап в создании нового теоретического фундамента для исследований речных систем, проводимого на стыке гидрологии суши и геоморфологии. Перспективные возможности в этом смысле предоставляет структурно-гидрографический анализ речных систем [Гарцман и др., 2008; Гарцман, Галанин, 2011; Гарцман, 2013]. Работы [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997; Yen, Lee, 1997; Reggiani et al., 2001; Gupta, 2004; Lee, Chang, 2005] представляют ряд статистических и детерминированных гидрологических моделей нового поколения с использованием данных о структуре речных систем и морфологии их бассейнов. Число работ по этой тематике в России пока невелико. В последней четверти XX в. следует упомянуть труды дальневосточной и сибирской школ гидрологии [Гарцман, 1973; Казанский, 1977; Карасев, Худяков, 1984; Корытный, 2001], а позднее – сотрудников географического факультета МГУ [Алексеевский, 2010; Сидорчук, 2014]. Интересной является также монография [Еременко, Панин, 2010], где динамика низкопорядковой речной сети рассматривается в палеогеографическом аспекте.

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) привело к появлению

общедоступных цифровых моделей рельефа (ЦМР) в виде глобальных покрытий с разрешением, эквивалентным картам среднего масштаба (1:100000 − 1:200000), что создает принципиально новые возможности в науках о Земле, для которых анализ рельефа представляет ключевую важность. Одновременно происходил менее заметный процесс смены технологий картографирования, в результате чего принципиально изменился характер изображения речной сети на карте в сторону снижения требований к методической строгости и точности. Имеется также один неочевидный аспект, хорошо знакомый специалистам: при работе с речной сетью на топографической карте рельеф бассейнов представлен на той же карте, изображенный в том же масштабе и в органичной связи с речной сетью. Если же эту речную сеть в виде оцифрованного векторного слоя наложить на ЦМР, даже максимально точно и корректно, видны многочисленные нарушения взаимосвязи водотоков с рельефом. Речная сеть с топографической карты оказывается плохо «вложенной» в рельеф, представленный в виде ЦМР, и при попытках их совместной автоматизированной обработки неизбежно возникают многочисленные ошибки.

Таким образом, развитие структурно-гидрографического анализа речных систем как научного направления сталкивается, в результате распространения ДЗЗ, во-первых, с размыванием и, в перспективе, утратой прежнего образа объекта исследований, а во-вторых – с потерей взаимной связи между структурой речной системы и рельефом её бассейна, если они получены из различных источников данных. Решением проблемы представляется моделирование (автоматическая оцифровка) речной сети на основе ЦМР с использованием других видов пространственных данных. Получаемые таким образом модели речной сети всегда аккуратно «вложены» в рельеф, однако в какой мере они сохраняют свойства и закономерности, присущие природным речным сетям?

Ответ на этот вопрос, становящийся ключевым для развития всего научного направления, является сложным и нетривиальным. Некоторым аспектам получения адекватных моделей речной сети с ЦМР посвящена данная статья. Основой исследования и его конечной целью является развитие современных методов и технологий анализа рельефа бассейнов и структуры речных систем на основе ЦМР, реализованные в виде пользовательского инструментария в среде ArcMap. Разработанные к настоящему времени инструменты [Gartsman, Entin, Shekman, 2024] реализованы как скрипты на языке Python с использованием возможностей ArcGIS Desktop 10.8. При их разработке, если явно не указано иное, используются инструменты группы Spatial Analyst. Обратная совместимость проверена для версий ArcGIS Desktop 10.5, 10.7. Текущая версия набора инструментов расположена в свободном доступе с открытым кодом по адресу https://github.com/aentin/ArcPyStreamScape.

Методы и материалы

Инструмент Stream Network Orders из набора ArcPyStreamScape реализует единый алгоритм определения истоков водотоков и построения речной сети по ЦМР на основе подбора порогового значения функции инициации, с возможностью выбора из нескольких форм этой функции [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997; Гарцман, Шекман, 2016] – индексов, вычисляемых для каждого пиксела в пределах бассейна. Шесть вариантов индексов основаны на общей форме функции инициации, параметризующей интенсивность эрозионного действия потока на подстилающую поверхность в виде выражения [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997]

$$a = \beta Q^m \Delta z^n , \qquad (1)$$

где Q – расход воды, Δz – крутизна склона, β, m, n – параметры, подбираемые путем калибровки. Зачастую в данной формуле используется площадь водосбора A, которая замещает (*surrogate*) расход Q при условии равномерного орошения водосбора осадками. Для более точного представления расхода в форме функции инициации авторами [Гарцман, Шекман, 2016] предложено использовать информацию о годовых слоях осадков P и эвапотранспирации ET.

Используются следующие индексы [Gartsman, Entin, Shekman, 2024], вычисляемые для каждого i-го пиксела ЦМР, причем P_i в

выражениях ниже означает средний по водосбору i-го пиксела годовой слой осадков, а ET – аналогичный слой эвапотранспирации:

- $E_i^* \propto A_i$ – водосборная площадь;
- $E_i^* \propto A_i\ (P_i\text{-}ET_i)$ – объем климатического стока Q_c;
- $E_i^* \propto A_i^{0.5}\Delta z_i$ – индекс напряжения сдвига (по A);
- $E_i^* \propto (A_i\ (P_i\text{-}ET_i))^{0.5}\Delta z_i$ – индекс напряжения сдвига (по Q_c);
- $E_i^* \propto A_i\Delta z_i$ – индекс энергии рельефа (по A);
- $E_i^* \propto A_i\ (P_i\text{-}ET_i)\Delta z_i$ – индекс энергии рельефа (по Q_c).

Кроме перечисленных вариантов общей формулы (1), применяются еще два варианта функции инициации, представляющие собой индексы не интенсивности, а результата эрозионного воздействия: среднее падение ΔH_{ci} и порядок сегмента полной дренажной сети ω^*. Среднее падение бассейна ΔH_{ci} равно разности средней высоты водосбора каждой точки и ее собственной высоты. Под полной дренажной сетью понимается сеть линий тока, включающая все ячейки ЦМР; порядок ее сегмента ω^* также может использоваться как критерий для реконструкции сети тальвегов.

Разнообразие встроенных в инструмент Stream Network Orders функций инициации позволяет выполнять сравнительный анализ полученных на их основе моделей речной сети. Исходными наборами данных для расчета являются ЦМР, а также растровые наборы данных о среднегодовых слоях осадков и эвапотранспирации. Для выбранной функции инициации должно быть установлено пороговое значение. Примеры моделирования сети водотоков с использованием разных пороговых значений функции инициации представлены на рисунке 1. На их основе вычисляются суммарная длина сегментов водотоков, а также их общее число – сначала для всей сети в целом, затем для каждого порядка в отдельности. Полученные статистики сохраняются в текстовый файл.

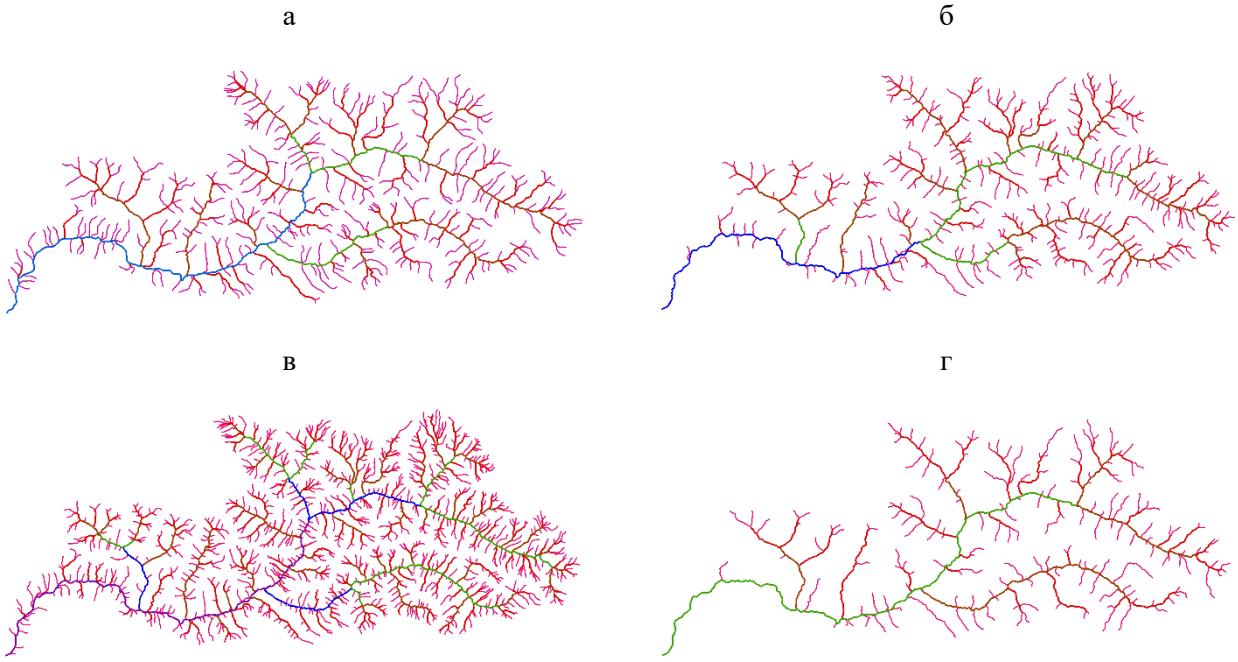


Рисунок 1. Фактическая и модельные речные сети, рассчитанные инструментом Stream Network Orders по индексу CEI: а) фактическая, старший порядок N=5; б) оптимальная модель, пороговое значении CEI 221500, N=5; в) модель при пороговом CEI 150000, N=6; г) модель при пороговом CEI 500000, N=4. Порядки водотоков: 1 – малиновый; 2 – красный; 3 – коричневый; 4 – зеленый; 5 – синий; 6 – лиловый

Figure 1. Actual river network and model ones calculated using the Stream Network Orders tool based on the CEI index: a) actual, highest order N=5; b) optimal model, CEI threshold 221500, N=5; c) model with CEI threshold 150000, N=6; d) model with CEI threshold 500000, N=4. Stream orders: 1 – crimson; 2 – red; 3 – brown; 4 – green; 5 – blue; 6 – purple

При испытании инструмента Stream Network Orders на реках Черноморского побережья Кавказа выявлена специфическая методическая проблема, обозначенная как проблема «коротких» водотоков. Рассмотрим её на примере бассейнов трех рек – Адерба, Псезуапсе, Шахе. Черноморское побережье Кавказа – регион, относящийся к альпийскому складчатому поясу, характеризуется геологической «молодостью» рельефа и явно неравновесным характером речных систем на этапе врезания при интенсивных восходящих тектонических движениях. Три исследуемых бассейна характеризуются различными общими высотными характеристиками рельефа и интенсивностью тектонического воздымания и в разной степени включают высотные пояса, выделяемые на исследуемой территории [Клименко, Куканов, Прокофьев, 1979] (рисунок 2). Реки Псезуапсе и Шахе протекают в Лазаревском районе города Сочи, Краснодарского края. Площадь бассейна Псезуапсе – 290 км², рельеф – горный с наибольшими высотами (800–1000 м) в верховьях реки, на преобладающем протяжении долина реки V-образная. Площадь водосборного бассейна Шахе – 553 км². Рельеф бассейна горный, изрезанный долинами многочисленных притоков и оврагами, характеризующийся большими относительными высотами, достигающими 1400–1800 м в верховьях и в среднем течении, и до 200 м в нижнем течении. Долина в верховьях V-образная, а ниже до устья ящикообразная. Река Адерба – река в Краснодарском крае, берёт начало на территории Крымского района, далее течёт по территории города Геленджик, имеет широкую пойму. Площадь бассейна – 73,5 км², максимальные высоты достигают 600–750 м. Преобладающим элементом режима всех перечисленных рек являются дождевые паводки в течение всего года, для Псезуапсе и Шахе существенна также доля снегового питания [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1964].

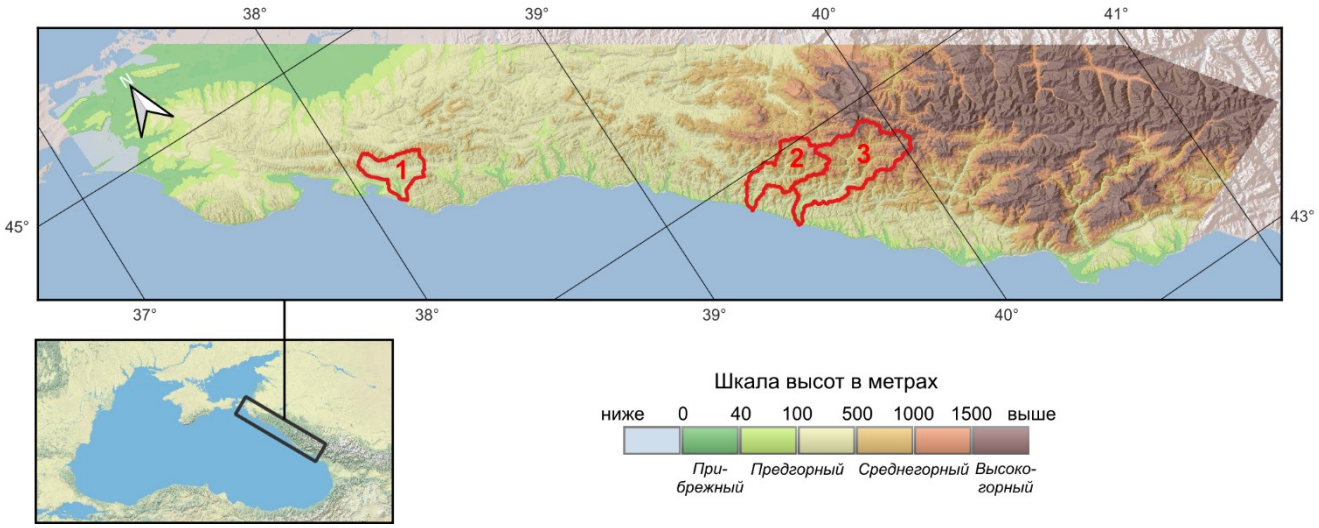


Рисунок 2. Цифровая модель рельефа FABDEM российского сегмента черноморского побережья Кавказа с бассейнами моделируемых речных сетей: 1 – Адебра, 2 – Псезуапсе, 3 – Шахе

Figure 2. The FABDEM digital elevation model of the Russian segment of the Black Sea coast of the Caucasus with the basins of the modeled river networks: 1 – Aderba, 2 – Psezuapse, 3 – Shahe

Моделирование речных сетей выполнялась в среде ArcGIS10.8.2 инструментом Stream Network Order. Использовалась ЦМР из открытых источников – FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) [Laurence Hawker et al., 2022], перепроецированная в систему координат равновеликой конической проекции [Albers, 1805] с квадратным пикселом размера 22,5×22,5 м. В качестве фактической речной сети использовались оцифрованные «голубые линии» карты масштаба 1:100 000, привязанные в единой системе координат с ЦМР. Калибровка производилась методом ручного подбора оптимальных пороговых значений различных индексов, при которых модельная сеть максимально совпадает с фактической. Главным

критерием калибровки служило совпадение количества притоков 1-го порядка в сравниваемых речных сетях, а дополнительным – суммарные длины модельных и фактической речной сети. Результаты калибровок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сопоставление вариантов речной сети, смоделированной по различным индексам, с картографическим изображением

Table 1. Comparison of river network variants, modeled using different indices, with a cartographic image

Бассейн	Псезуапсе		Шахе		Адерба	
Вариант моделирования речной сети	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км
Топокарта	131	268,5	351	668,8	62	180,0
A	131	238,1	351	527,2	63	161,2
zA	131	214,9	351	493,5	62	158,3
$zA^{0,5}$	132	201,4	352	448,9	62	151,7
Q	131	232,5	351	526,9	62	163,1
CEI	130	208,0	351	476,8	62	153,8
$zQ^{0,5}$	130	198,8	351	447,7	62	158,9
H_c	132	168,0	351	382,5	62	109,6

Как неоднократно отмечалась ранее [Гарцман, 2013; Гарцман, Шекман, 2016], оцифрованная по ЦМР речная сеть обычно получается существенно короче фактической. Известной причиной этого является неучет в моделях двух эффектов – естественной извилистости русловой сети, не отображаемой в масштабе ЦМР, и явления попятной эрозии, приводящей к постепенному удлинению первичных водотоков в процессе их развития. В связи с этим, занижение суммарной длины модельной сети по сравнению с фактической в пределах 10–15 % считалось приемлемым результатом, и такого результата обычно удавалось достичь.

Данные таблицы 1 показывают, однако, что занижение суммарной длины модельной речной сети систематически выходит за упомянутый предел допустимого. Было установлено, что наиболее резко различаются у модельных и фактических сетей именно суммарные длины водотоков 1-го порядка, обеспечивая большую, а иногда и избыточную, часть расхождения. Рассмотрим гистограммы распределения длин притоков 1-го порядка для фактической и одной из модельных сетей для р. Шахе (рисунок 3).

Как видно на рисунке 3а, минимальная длина притоков 1-го порядка фактической речной сети 285 м, а основная масса таких водотоков имеют длину в диапазоне 400–1600 м. В то же время, для модельной речной сети минимальная длина водотока 1-го порядка (рисунок 3б) составляет менее 34 м, а основная масса водотоков имеет длину до 1000 м.

При детальном визуальном анализе модельной речной сети выявляется значительное число водотоков 1-го порядка, длина которых делает их почти неразличимыми в масштабе всего бассейна (рисунок 4а). Длина водотока 34 м по отношению к используемой ЦМР представляет собой результат векторизации растрового притока размером всего в 1 пиксель. Отметим, что степень недоучета длины речной сети особенно велика для вариантов индексов, учитывающих величину локального уклона и другие характеристики вертикальной расчлененности бассейна (см. таблицу 1). Кроме того, большое количество «коротких» притоков и их влияние на результат моделирования ярко выявились именно при работе в области кайнозойской складчатости, где современные тектонические поднятия большой интенсивности приводят к формированию контрастного «молодого» эрозионного рельефа – в отличие от ранее выполненных исследований в горных странах мезозойского и более древнего возраста [Гарцман, 2013]. Эти два обстоятельства позволили сформулировать гипотезу, на основе которой выполнена корректировка алгоритма моделирования речной сети по ЦМР.

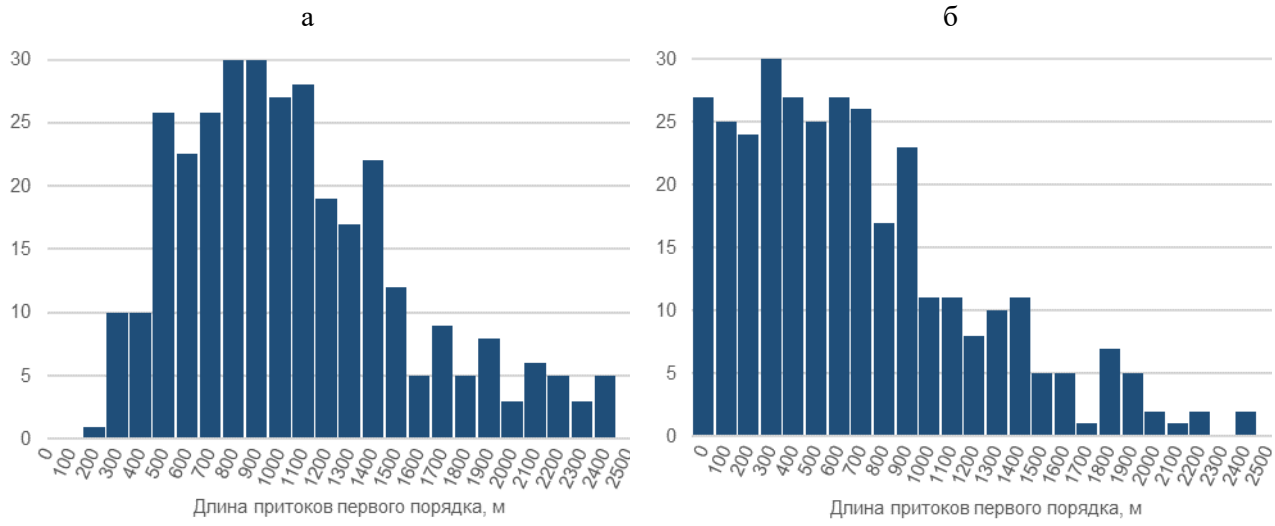


Рисунок 3. Гистограммы распределения длин притоков 1-го порядка речной сети реки Шахе: а) фактической; б) моделированной по *A*

Figure 3. Histograms of the distribution of the lengths of 1st-order tributaries of the Shahe river network: a) actual; b) modeled according to *A*

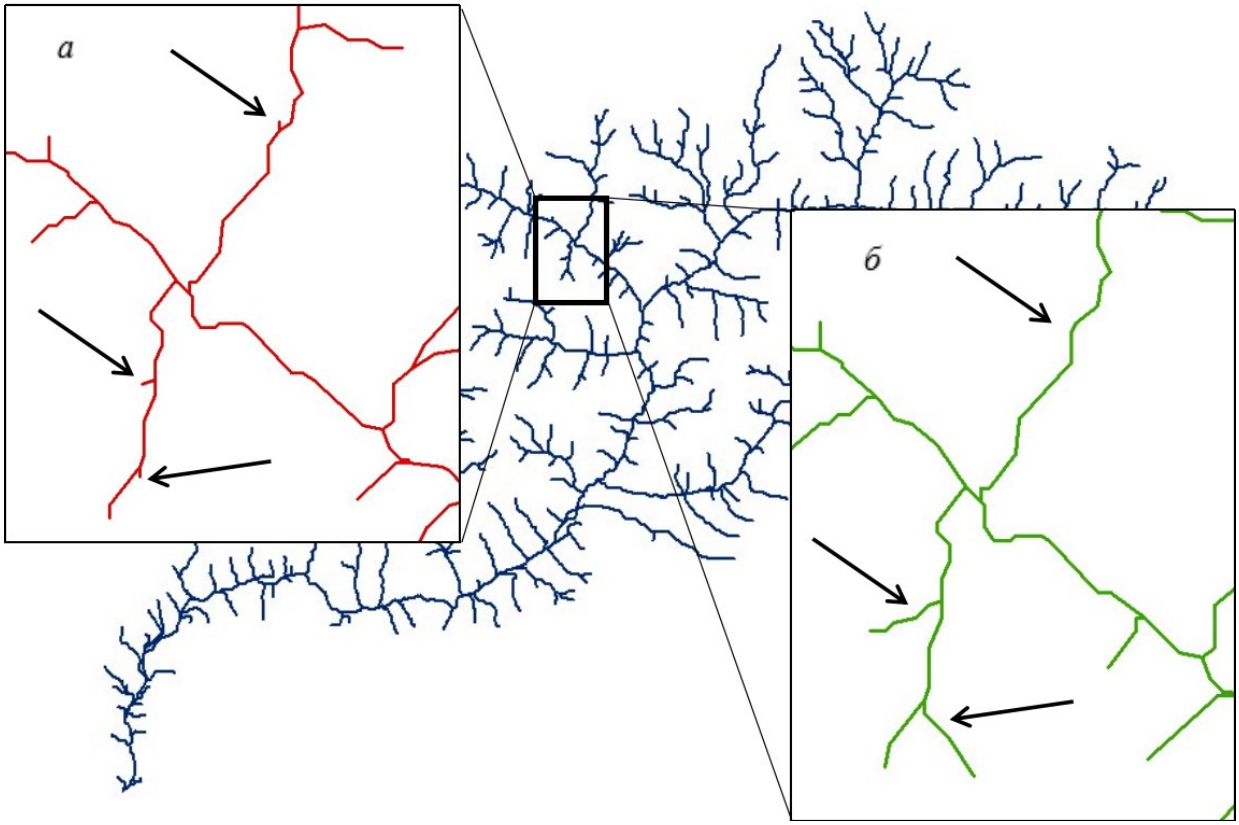


Рисунок 4. Фрагменты речной сети Шахе, смоделированной без применения пороговой длины водотока 1-го порядка (*а*, красные линии) и аналогичный фрагмент речной сети, смоделированной с применением такого условия (*б*, зеленые линии)

Figure 4. Fragments of the Shahe river network, modeled without applying a threshold length for 1st-order streams (*a*, red lines) and a similar fragment of the river network, modeled with the application of this condition (*б*, green lines)

Очевидно, при автоматизированном вычислении любого индекса функции инициации не исключены локальные случайные превышения его порогового значения, обусловленные как

«грубостью» принятой концепции формирования истока водотока, так и низким разрешением самой ЦМР. Наиболее часто такие превышения связаны с индексами, включающими величину локального уклона, которая как раз содержит значительные погрешности в местах переломов профилей склонов и тальвегов. Понятно, что на высококонтрастном неравновесном эрозионном рельефе такие точки будут наиболее многочисленны. Если трассирование от возникшего таким образом истока приводит к формированию очень короткого водотока, то есть основания им пренебречь как артефактом. Такие артефакты, необоснованно возникающие в случайных точках речной сети, не только приводят к сильному занижению её суммарной длины, но и в целом искажают процедуру калибровки модели и получаемый рисунок сети, поскольку именно число первичных водотоков, без учета их размеров, является основным калибровочным критерием.

Принцип выделения водотока 1-го порядка только на основе позиционирования его истока в результате накопления некоторого индекса эрозионного воздействия (расхода, площади водосбора и др.) представляется недостаточным. Признаками первичного постоянного водотока, очевидно, является наличие необходимого объема стока и достаточно устойчивого его режима, типичных долинных и русловых форм, характерного комплекса аллювиальных отложений. Условия его формирования включают определенные размеры и форму бассейна, необходимые параметры климата, почвенно-растительного покрова, горных пород, особенности взаимодействия русловой сети с подземными водоносными горизонтами. В такой трактовке вопрос о первичном водотоке является специфическим преломлением основной проблематики ландшафтной гидрологии.

Вполне обоснованно можно предположить, что выделяемый водоток 1-го порядка должен характеризоваться не только накоплением интенсивности эрозионного воздействия для инициации его развития, но и некоторым минимальным пространственным масштабом, обеспечивающим и характеризующим его устойчивость как природного объекта. В принятой нами схематизации для выделения водотока 1-го порядка целесообразно дополнить алгоритм модели вторым калибруемым параметром – минимальной допустимой длиной водотока 1-го порядка.

Результаты и обсуждение

Для решения проблемы «коротких» водотоков алгоритм инструмента Stream Network Order был дополнен опцией задания на входе калибровочной процедуры минимального числа ячеек, составляющих сегмент речной сети 1-го порядка. При выполнении алгоритма калибровки модели речной сети, описанной в [Gartsman, Entin, Shekman, 2024], после каждой итерации выделения растровой речной сети выполняется проверка сегментов 1-го порядка на превышение заданного порога длины. Если длина сегмента меньше пороговой, он выбрасывается из сети вместе с соответствующим ему узлом слияния. В результате рисунок внешнего отдела речной сети существенно трансформируется, в ней сохраняются лишь хорошо обоснованные первичные водотоки, средняя длина которых значительно возрастает.

Калибровка порогового значения длины выполняется ручным подбором – после отработки одного значения можно задать другое перед новым запуском инструмента Stream Network Order, а затем сопоставить результаты. Отметим, что в результате описанного дополнения алгоритма повышается размерность модели, которая переходит в категорию моделей с двумя калибруемыми параметрами. Авторам неизвестны публикации, отражающие исследования, в которых был бы применен подобный подход калибровки двух параметров при моделировании речной сети по ЦМР на основе функции инициации.

Опыт использования параметра минимальной длины первичного водотока показывает, что настоящей процедуры калибровки, в смысле поиска экстремума целевой функции качества моделирования, не получилось. Качество модели по критерию близости суммарной длины модельной сети к фактической монотонно растет по мере увеличения пороговой длины от нуля до минимального фактического значения. При превышении этого минимального значения качество по данному критерию может возрастать и далее, однако при этом возникает

уже противоречие другого плана, которое требует осмысления. В связи с этим, на данном этапе исследования при калибровках моделей использовалось пороговое значение минимальной длины первичного водотока такое же, как у фактической речной сети.

Чем же обусловлена минимальная величина водотока 1-го порядка, выявленная для фактических речных сетей? Является ли она отражением природной закономерности, демонстрируя характерный минимальный масштаб первичного водотока, или является простым техническим следствием принятой методики картографирования водных объектов? К сожалению, однозначного ответа на эти вопросы сейчас дать невозможно. В руководящих документах по созданию и обновлению топографических карт среднего и крупного масштаба содержится достаточно указаний, рекомендующих отбор водотоков для отображения по искусственным критериям, а в некоторых случаях, особенно для горных территорий, допускающих субъективные решения конкретных исполнителей картографических работ.

Так, в руководящем документе по созданию и обновлению топографических карт ГКИНП-05-029-84[1] в пункте 37 сказано: «Реки и ручьи показываются:

- на картах масштабов 1:10000 – 1:25000 – все, независимо от их протяженности;
- на картах масштабов 1:50000 – 1:200000 – как правило, длиной в масштабе карты 1 см и более;
- на картах масштабов 1:500000 – 1:1000000 – 1,5 см и более.

Реки и ручьи (постоянные и пересыхающие), каналы и канавы в зависимости от ширины водотока и масштаба карты изображаются в одну или две линии».

В руководстве по картографическим и картоиздательским работам [Руководство..., 1978] говорится: «На картах показываются все реки и ручьи независимо от их протяженности и местности, по которой они протекают, за исключением горных районов, при изображении которых на картах масштабов 1:50 000 и 1:100 000 ручьи длиной в масштабе карты менее 1 см показываются с отбором».

В руководящем документе по созданию учебных физических карт ГКИНП-14-132-80[2] указывается, что: «Реки показываются длиной не менее 5–6 см в масштабе карты. Реки меньшей длины могут быть нанесены в маловодных и горных районах, а также связанные со специальным содержанием или в тех случаях, когда на них расположены областные или крупные промышленные центры, или по ним проходят границы». Дальнейшие решения о нанесении или не нанесении водотоков на карту зависят от конкретного топографа, работающего с данным участком. На сегодняшний день эти рекомендации уже не актуальны, однако на момент составления топографических карт, с которых снимаются «фактические» речные сети, они были основными руководящими документами по составлению топографических карт и материалов.

Таким образом, речная сеть, называемая нами «фактической», представляет собой также лишь модель, составленную при значительной роли искусственных технических ограничений и индивидуального экспертного опыта. В критическом для нашей задачи аспекте отображения первичной сети водотоков полнота и адекватность этой модели неизвестны, и могут быть поставлены под сомнение. Опыт определения минимальной длины водотока 1-го порядка по картографическим изображениям многих речных бассейнов показал, что она может быть неустойчивой в пространстве – значительно и незакономерно различаться для соседних

[1] Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила «Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000» ГКИНП-05-029-84 // Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Военно-топографическое управление Генеральногош штаба

[2] Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила «Руководящий технический материал по созданию учебных физических карт союзных республик, автономных советских социалистических республик, краев, областей СССР со сведениями по краеведению» ГКИНП-14-132-80 от 29.05.1980 № 236п. // Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР

водосборов. В целом это обстоятельство добавляет сложности поставленной задаче воспроизведения структуры речной сети по цифровой модели рельефа на основе моделей с калибруемыми параметрами. Вопрос требует дальнейшей разработки.

После доработки инструмента Stream Network Order распределение длин водотоков 1-го порядка, полученное в результате моделирования с учетом минимальной длины первичного водотока, существенно приблизилось к фактическому (см. пример на рисунке 5). В новом модельном построении минимальное значение первичного водотока 146 м, а длины основной части водотоков лежит теперь в интервале 200−1400 м. Форма гистограммы длин при этом несколько приблизилась к фактической, но еще существенно отличается.

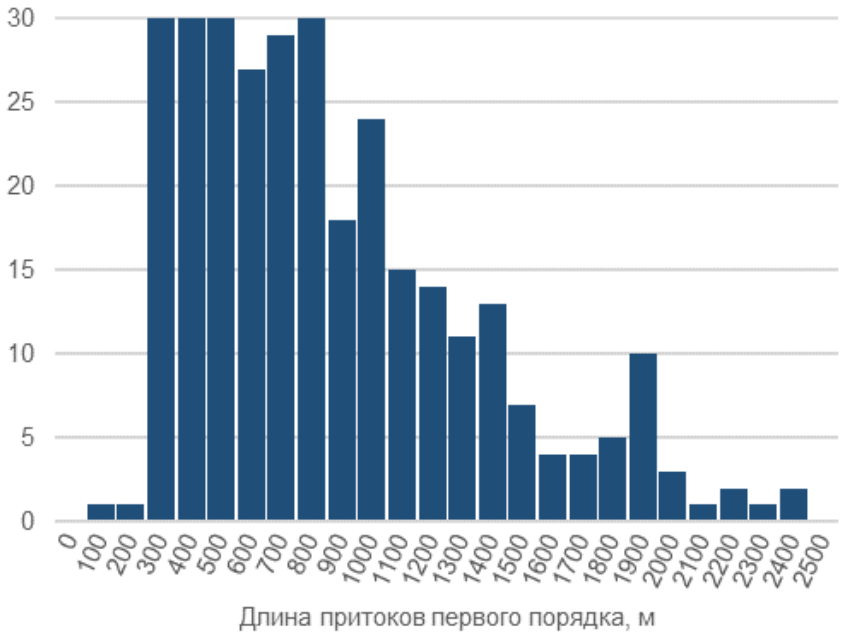


Рисунок 5. Гистограмма распределения длин притоков 1-го порядка речной сети бассейна р. Шахе, смоделированной с применением минимальной длины сегмента 1-го порядка

Figure 5. Histogram of the distribution of the lengths of 1st-order tributaries of the Shahe river basin, modeled with the application of a minimum length for 1st-order segments

Сопоставление фрагмента новой модели речной сети реки Шахе с применением минимальной длины водотоков 1-го порядка (рисунок 4б) с фрагментом прежней модели без такого применения показывает, что некоторые слишком короткие притоки удлиняются, а остальные отбрасываются. После удаления «коротких» водотоков либо принимающие их водотоки более высокого порядка «сшиваются» в месте узла слияния в один, либо, если сливались два водотока 1-го порядка и давали 2-й порядок, при удалении одного водотока 1-го порядка водоток 2-го порядка приобретает 1-й порядок и «сшивается» с оставшимся водотоком 1-го порядка. Встречается еще третий, относительно редкий вариант перестройки сети, когда оба сливающихся водотока 1-го порядка оказываются короче минимального значения и отбрасываются. В этом случае образуемый ими ранее водоток 2-го порядка приобретает 1-й порядок без удлинения. За счет этого в модельной речной сети иногда могут возникнуть новые водотоки 1-го порядка с длиной меньше минимального значения, как видно на рисунке 5. Для устранения последней проблемы требуется нетривиальная доработка алгоритма, которая является задачей его дальнейшего развития. Влияние этих редких ситуаций на конечный результат незначительно.

После обновления инструмента речные сети, представленные в таблице 1, были смоделированы заново (таблица 2). За счет задания минимальной длины водотока 1-го порядка по всем вариантам функции инициации суммарная длина модельной сети существенно приближается к фактической, причем почти во всех случаях попадает в 15 %-й интервал

погрешности, принятый в качестве допустимого. Отметим также, что задание минимальной длины притока 1-го порядка приводит к снижению оптимальных пороговых значений индексов при калибровке по всем вариантам функции инициации, что вытекает из самого алгоритма калибровки.

Таблица 2. Результаты автоматической оцифровки речной сети по вариантам функций инициации с применением пороговой длины водотоков 1-го порядка

Table 2. Results of the automatic digitization of the river network according to variants of initiation functions using a threshold length for 1st-order streams

Вариант построения речной сети	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Мин. длина водотока 1-го порядка, пикс.	Общая длина речной сети, км	Изм. общей длины речной сети по сравн. с таблицей 1, %,	Разница общей длины фактической и модельных речных сетей, %
Бассейн реки Адерба					
Топокарта	62	-	180,0	-	-
A	62	12	165,1	+2,4	-8,3
zA	62	12	165,3	+4,2	-8,2
$zA^{0,5}$	62	12	166,5	+8,8	-7,5
Q	62	12	168,7	+3,3	-6,3
CEI	62	12	177,0	+10,3	-1,7
$zQ^{0,5}$	62	12	169,6	+6,3	-5,8
H_c	62	12	137,9	+20,5	-23,4
Бассейн реки Псезуапсе					
Топокарта	131	-	268,5	-	-
A	131	12	253,0	+5,9	-5,8
zA	131	12	244,5	+12,1	-8,9
$zA^{0,5}$	131	12	236,7	+12,1	-11,9
Q	131	12	247,5	+14,9	-7,8
CEI	131	12	240,4	+6,1	-10,5
$zQ^{0,5}$	131	12	232,6	+10,9	-13,4
H_c	131	12	208,8	+14,5	-22,2
Бассейн реки Шахе					
Топокарта	351	-	668,8	-	-
A	351	12	570,9	+7,6	-14,6
zA	351	12	564,0	+12,5	-15,7
$zA^{0,5}$	351	12	555,1	+19,1	-17,0
Q	351	12	573,5	+8,1	-14,2
CEI	351	12	561,2	+12,5	-16,1
$zQ^{0,5}$	351	12	547,2	+18,2	-18,2
H_c	351	12	504,4	+24,2	-24,6

Модели с применением индекса среднего падения ΔH_c больше остальных реагируют на изменение минимальной длины притоков 1-го порядка, но эти варианты все же остаются худшими по признаку общей длины водотоков по сравнению с остальными. Видно также, что различные функции инициации очень по-разному реагируют на задание минимальной длины притока 1-го порядка в различных бассейнах, различающихся высотой и интенсивностью

расчленения рельефа. Это подчёркивает необходимость поиска оптимального индекса, либо набора индексов, позволяющих параметризовать процесс формирования речной сети при существенных различиях комплекса действующих физико-географических факторов.

Анализ данных таблицы 2 наглядно показывает различное по качеству приближение модельных сетей к фактическим при применении различных индексов функции инициации. Для р. Адерба все индексы, кроме ΔH_c, дают приемлемый результат, при этом лучший результат со значительным отрывом дает индекс *CEI*. Для р. Псезуапсе также все индексы, кроме ΔH_c, дают приемлемый результат, но в среднем существенно худший. Лучшим индексом для р. Псезуапсе является индекс площади водосбора *A*, а следующий и довольно близкий результат дает индекс климатического стока *Q*. Для р. Шахе результаты в среднем гораздо хуже. Лучшим индексом является *Q*, следующий по качеству и почти неотличимый от лучшего результат дает индекс *A*, и лишь эти две модели укладываются в упомянутый выше допустимый интервал погрешности 15 %.

Все три исследуемых водосбора являются горными, но существенно различаются по степени «горности», т.е. по диапазону высот и контрастности рельефа, а также по всему комплексу тесно связанных с рельефом ландшафтных характеристик. Это можно проиллюстрировать на примере показателя средней высоты бассейнов р. Адербы, Псезуапсе и Шахе – 423, 925 и 1265 м, соответственно. Представляется возможным сформулировать гипотезу: поскольку ведущие факторы и характерные особенности эрозионного развития речных бассейнов существенно различны в разных ландшафтных обстановках, для моделирования речных сетей в широких географических следует применять разнообразные наборы индексов функции инициации, либо сложный комплексный индекс высокого уровня обобщения. Эта гипотеза определяет основное направление дальнейших исследований по проблематике.

Заключение

Назревшей проблемой развитие исследований в области наук о Земле является создание инструментария для детального и разнообразного анализа ЦМР в комплексе с другими наборами пространственных данных. Это обеспечит новые информационные и методические возможности, поскольку рельеф для них является фундаментально значимым фактором.

Программный инструмент Stream Network Order, реализованный в виде скрипта на базе возможностей ArcGIS Desktop 10.8, предназначен для моделирования речных сетей на основе ЦМР с использованием различных вариантов функции инициации. Перспективы его развития связаны с разработкой комплексных процедур анализа таких сложных и экстремально динамичных природных объектов, как речные системы.

Выполнено тестирование методов моделирования речной сети по ЦМР с использованием климатических пространственных данных, представляющих климатические характеристики. Использована авторская технология на примере 3 речных бассейнов Черноморского побережья Кавказа, с различными высотными характеристиками рельефа и тектонической активностью. Подтверждены основные преимущества технологии: принципиальное сокращение времени на выполнение полного цикла моделирования по сравнению с ручной обработкой; получение не только визуальной «отрисовки» модельного построения, но и обобщенных порядковых параметров и статистик речной сети; возможность использования инструмента широким кругом пользователей без специальной технической подготовки; возможность опционального вывода промежуточных результатов построения модели и дальнейшее их самостоятельное использование.

Выявлена и проработана методически концептуальная проблема т.н. «коротких» притоков, искажающая процесс калибровки моделей речной сети и препятствующая получению адекватных результатов. Обосновано и выполнено усовершенствование алгоритма моделирования речной сети, в результате чего

предложена оригинальная модель с двумя калибруемыми параметрами, в которой принцип порога эрозионного действия дополнен принципом порога минимального масштаба развитой речной системы. В процессе испытаний сформулировано предположение, что в разных ландшафтных обстановках для моделирования речных сетей следует применять разнообразные наборы индексов функции инициации, либо сложный комплексный индекс высокого уровня обобщения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИВП РАН FMWZ-2022-0001 № гос. рег. 122041100222–7.

Acknowledgements

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001.

Литература

Albers H. C. Beschreibung einer neuen Kegelprojection. (von Zach's) Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde. 12: 450–459. November 1805. Available at: https://www.digitale-sammlungen.de/de/view/bsb10538604?page=474,475

Gartsman B.I. Entin A.L. Shekman E.A. Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment // Water Resources. 2024. V. 51. Is. 3. P. 171–184. DOI: 10.1134/S0097807824700726

Gupta V.K. Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics // Chaos, Solitons and Fractals. 2004. V. 19. Iss. 2. Pp. 357−365. DOI: 10.1016/S0960-0779(03)00048-1

Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. 2022 Environ. Res. Lett. 17. DOI: 0.1088/1748-9326/ac4d4f

Lee K.T. Chang C.H. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH modeling // Journal of Hydrology. 2005. V. 311. Iss. 1–4. Pp. 91–105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.008

Reggiani P. Sivapalan M. Hassanizaden S.M. Gray W.G. Coupled equations for mass and momentum balance in a stream network: Theoretical derivation and computational experiments // Proc. R. Soc. Lond. A. 2001. V. 457. Pp. 157–189. DOI: 10.1098/rspa.2000.0661

Rodriguez-Iturbe I. Rinaldo A. Fractal river basins: chance and self-organization. Cambridge University Press, 1997. 547 p.

Yen B.C. Lee K.T. Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream order laws // Jour. of

References

Albers H. C. "Beschreibung einer neuen Kegelprojection". (von Zach's) *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde.* 12: 450−459. November 1805. Available at: https://www.digitale-sammlungen.de/de/view/bsb10538604? page=474,475.

Alekseevskii N.I. Masshtabnye izmeneniya kharakteristik sistemy potok-ruslo po dline rek [Large-scale changes in the characteristics of the stream-channel system along the length of rivers]. *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov. Materialy 3 vseross. konf. 24-28 avgusta 2010 [Fundamental Problems of Water and Water Resources. Proceedings of the Third All-Russian Conf., August 24-28, 2010]*, Barnaul, 2010, pp.4–6. (In Russian).

Eremenko E.A., Panin A.V. *Lozhbinnyi mezorel'ef Vostochno-Evropeiskoi ravniny [The gully mesorelief of the East European Plain].* Moscow, MIROS Publ., 2010. 192 p. (In Russian).

Gartsman B.I. Analiz geomorfologicheskikh uslovii formirovaniya pervichnykh vodotokov na osnove tsifrovykh modelei rel'efa [Analysis of geomorphological conditions for primary streams formation using digital elevation models]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2013, vol. 1, pp.136–147. (In Russian).

Gartsman B.I., Bugaets A.N., Tegai N.D. Krasnopeev S.M. Analiz struktury rechnykh sistem i perspektivy modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov [Analysis of the structure of river systems and the prospects for modeling hydrological processes] *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2008, vol. 2, pp. 116–123. (In Russian).

Hydrol. Engin.1997. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:1(1)

Алексеевский Н.И. Масштабные изменения характеристик системы поток-русло по длине рек / Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Мат-лы 3-й всеросс. конф. 24-28 августа 2010. Барнаул. 2010. С. 4–6.

Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.

Гарцман Б.И. Бугаец А.Н. Тегай Н.Д. Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 116–123.

Гарцман Б.И. Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.

Гарцман Б.И. Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 86–98.

Гарцман Б.И. Шекман Е.А. Ли К.Т. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 164−173.

Гарцман И.Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Водн. ресурсы, 1973. №3. С 109–124.

Еременко Е.А. Панин А.В. Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. М.: МИРОС, 2010. 192 с.

Казанский Б.А. Теоретические закономерности распределения речных структур / Тр. ДВНИГМИ. Вып. 63. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 85–90.

Карасев, М.С. Худяков Г.И. Речные системы (на примере Дальнего Востока). М.: Наука, 1984. 143 с.

Клименко В.И. Куканов В.М. Прокофьев С.С. Подземные воды Черноморского побережья Кавказа и их охрана. М.: Наука, 1979. 100 с.

Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2001. 163 с.

Gartsman B.I., Entin A.L., Shekman E.A. Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment. *Water Resources,* 2024, vol. 51, iss. 3, P. 171–184. DOI: 10.1134/ S0097807824700726.

Gartsman B.I., Galanin A.A. Strukturno-gidrograficheskii i morfometricheskii analiz rechnykh sistem: teoreticheskie aspekty [Structural-hydrographic and morphometric analysis of river systems: theoretical aspects]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2011, № 3, pp. 27–37. (In Russian).

Gartsman B.I., Shekman E.A., Li K.T. Poryadkovaya klassifikatsiya rechnykh vodorazdelov na osnove obrabotki tsifrovykh modelei rel'efa [Order classification of river watershed divides based on processing digital elevation models]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2016, vol. 4, pp. 164–173. (In Russian).

Gartsman B.I. Shekman E.A. Vozmozhnosti modelirovaniya rechnoi seti na osnove GIS-instrumentariya i tsifrovoi modeli rel'efa [Potential of river network modeling based on gis technologies and digital elevation model]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 2016, vol. 1, pp. 86–98. (In Russian).

Gartsman I.N. Topologiya rechnykh sistem i gidrograficheskie indikatsionnye issledovaniya [The topology of river systems and hydrographic indicator studies]. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 1973, vol. 3, pp. 109–124. (In Russian).

Gupta V.K. Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics. *Chaos, Solitons and Fractals.* 2004, vol. 19, iss. 2, pp. 357–365.DOI: 10.1016/S0960-0779(03)00048-1.

Karasev M.S., Khudyakov G.I. *Rechnye sistemy (na primere Dal'nego Vostoka) [River systems (using the example of the Russian Far East)].* Moscow, Nauka Publ., 1984, 143 p. (In Russian).

Kazanskii B.A. *Teoreticheskie zakonomernosti raspredeleniya rechnykh struktur [Theoretical patterns of river structure distribution].* Tr. DVNIGMI, Vyp. 63, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, p. 85–90. (In Russian).

Klimenko V.I., Kukanov V.M., Prokof'ev S.S. *Podzemnye vody Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza i ikh okhrana [Groundwater of the Black Sea*

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / под ред. Т. Н. Джапаридзе. – Л.: Гидрометеоиздат, 1964. – 224 с.

Руководство по картографическим и картоиздательским работам. Часть 1. Составление и подготовка к изданию топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. – М.: Редакционно-издательский отдел ВТС, 1978 – 131 с.

Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. №1. С. 3–14.

coast of the Caucasus and their protection]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 100 p. (In Russian).

Korytnyi L.M. *Basseinovaya kontseptsiya v prirodopol'zovanii [The basin concept in environmental management]*. Irkutsk, In-t geogr. SO RAN, 2001, 163 p. (In Russian).

Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17. DOI: 0.1088/1748-9326/ac4d4f.

Lee K.T., Chang C.H. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH modeling. *Journal of Hydrology,* 2005, vol. 311, iss. 1–4, pp. 91−105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.008.

Reggiani P., Sivapalan M., Hassanizaden S.M., Gray W.G. Coupled equations for mass and momentum balance in a stream network: Theoretical derivation and computational experiments. *Proc. R. Soc. Lond. A.* 2001, vol. 457, pp. 157–189. DOI: 10.1098/ rspa.2000.0661.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 9. Zakavkaz'e i Dagestan. Vyp. 1. Zapadnoe Zakavkaz'e [Surface Water Resources of the USSR: Hydrological Study. Vol. 9. Transcaucasia and Dagestan. Issue 1. Western Transcaucasia] Ed. by T. N. Dzhaparidze. – Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964, 224 p. (In Russian) .

Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. *Fractal river basins: chance and self-organization.* Cambridge University Press, 1997, 547 p.

Rukovodstvo po kartograficheskim i kartoizdatel'skim rabotam. Chast' 1. Sostavlenie i podgotovka k izdaniyu topograficheskikh kart masshtabov 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. Moscow, Redaktsionno-izdatel'skii otdel VTS, 1978, 131 p. (In Russian).

Sidorchuk A.Yu. Fraktal'naya geometriya rechnykh setei [Fractal geometry of the river network]. *Geomorfologiya [Geomorphology],* 2014, vol. 1, pp. 3−14. (In Russian; summary in English).

Yen B.C., Lee K.T. Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream order laws. *Jour. of Hydrol. Engin.* 1997, vol. 2., iss. 1. pp. 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:1(1).

УДК 504.43 DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.125

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДОВ РАСЧЛЕНЕНИЯ ГИДРОГРАФА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ БЕЛОЙ

И.А. Хасанов [1], А.Н. Елизарьев [1, 2], Д.А. Тараканов [1], Дм. А. Тараканов [1]

[1]Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа. Россия; [2]Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия

e-mail: ilmir.hasanov.09@mail.ru

Аннотация. Регулирование стока оказало серьезное негативное воздействие на водные экосистемы, что подтолкнуло к проведению исследований последствий изменений водного режима в различных водных и пойменных экосистемах. Особое внимание следует уделить анализу воздействия антропогенных факторов на сток в период межени. Определение основных источников питания реки в период межени позволит проводить наиболее точное нормирование количественного использования водных ресурсов рек.

В данной работе представлены результаты оптимизации параметров семи методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности выделения базисного стока. Для выделения базисного стока применены следующие методы: фиксированного интервала, скользящего интервала, метод локальных минимумов, Экхардта, Чапмана, Чапмана и Максвела, Лайна и Холлика. Особенностью данных методов является применение различных параметров, используемых при выделении базисного стока: индекса максимального базисного стока BFImax, принимающего значения от 0,2 до 0,8 в зависимости от проницаемости пород, коэффициента спада α, описывающего скорость уменьшения речного стока со временем, и N, количество дней. Оценка эффективности оптимизации параметров методов

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF HYDROGRAPH DISSECTION METHODS TO INCREASE THEIR EFFECTIVENESS ON THE EXAMPLE OF THE BELAYA RIVER BASIN

Ilmir A. Khasanov [1], Alexey N. Elizaryev [1, 2], Denis A. Tarakanov [1], Dmitry A. Tarakanov [1]

[1]University of Science and Technology, Ufa, Russia; [2]Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

e-mail: ilmir.hasanov.09@mail.ru

Abstract. Dam construction and other human activities have changed the flow patterns of many rivers. The study focuses on the river network of the Belaya River basin in the Southern Urals, Russia, utilizing extensive multi-year observations of daily water discharge at 10 hydrological stations. Seven baseflow separation methods, including fixed interval, sliding interval, local minimum, Eckhardt, Chapman, Chapman and Maxwell, and Lyne and Hollick methods, were employed. To delineate baseflow, the recession coefficient α was determined using four approaches: 1) analysis of the recession curve obtained by averaging annual values; 2) construction of a point diagram of water discharge; 3) statistical analysis of water discharge; and 4) averaging all values of the recession coefficient α. The effectiveness of these methods was evaluated using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Kling-Gupta Efficiency (KGE) metrics. The evaluation of the effectiveness of foreign baseflow separation methods was conducted using the Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient. Additionally, the Kling-Gupta Efficiency criterion, commonly used among researchers, was applied. The assessment revealed that the Eckhardt method proves most effective when applying parameters α and BFI_{max} (at BFImax equal to 0.8). However, the Eckhardt method with BFI_{max} equal to 0.2 shows the lowest Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient and Kling-Gupta Efficiency

Хасанов И.А., Елизарьев А.Н., Тараканов Д.А., Тараканов Дм. А. Оптимизация параметров методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности на примере бассейна реки Белой // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. Вып. 2. С. 125–137. DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.125.

выделения базисного стока проведена с использованием коэффициента эффективности Нэша-Сатклиффа, а также критерия эффективности Клинга-Гупты.

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белой. Материалом исследования послужили многолетние данные наблюдений за ежедневным расходом воды с 10 гидрологических постов. Установлено, что метод Экхардта наиболее эффективен при применении параметров α и BFImax (при BFImax, равном 0,8). Однако метод Экхардта при BFImax, равном 0,2, показывает самые низкие значения коэффициентов эффективности, что говорит о нецелесообразности его применения на водосборе, сложенного скальными породами. В свою очередь метод скользящего интервала наиболее эффективен при применении параметра N, значение которого необходимо уменьшать на 1 день. Следовательно, методы Экхардта и скользящего интервала могут быть рекомендованы к использованию для всей речной сети бассейна реки Белая.

Ключевые слова: метод выделения базисного стока; поверхностный сток; речной сток; коэффициента спада; индекс максимального базового стока; коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа; критерий Клинга-Гупты.

criterion values, indicating its impracticality in watersheds with rocky substrates. Conversely, the sliding interval method is most effective with a parameter N requiring a one-day reduction. Consequently, the Eckhardt and sliding interval methods are recommended for the entire river network of the Belaya River basin. Despite this, it is noteworthy that the fixed interval and Lyne and Hollick methods also demonstrated high Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient and Kling-Gupta Efficiency criterion values, offering valuable options for consideration in water resource management.

Keywords: baseflow separation method; surface water; streamflow; recession constant; index of the maximum baseflow; Nash–Sutcliffe efficiency; Kling–Gupta efficiency.

Введение

Изучение пресноводных ресурсов указывает на серьезное снижение численности популяций различных видов водных организмов, что представляет угрозу для экосистем и их устойчивости. Согласно данным индекса живой планеты за 2020 г., численность популяций фауны пресноводных видов в среднем уменьшилась на 84 % с начала 1970-х гг.[1] Строительство плотин, наряду с другими антропогенными воздействиями, вызвало изменения в режиме стока многих рек [Poff et al., 1997; Барышников, 1999; Дубинина, Жукова, 2016; Дубинина, Никитина, 2019; Никитина, 2021]. Эти изменения привели к обеднению и смене видового состава рек, что сделало водные экосистемы малоустойчивыми перед воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Регулирование стока оказало серьезное негативное воздействие на водные экосистемы, что подтолкнуло к проведению исследований последствий изменений водного режима в различных водных и пойменных экосистемах [Никитина, 2021]. Особое внимание следует уделить анализу воздействия антропогенных факторов на речной сток в межень, поскольку этот период характеризуется особым дисбалансом

[1] WWF. Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss: A Deep Dive into Freshwater [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2020-09/LPR2020_freshwater.pdf. Дата обращения: 20.11.2023.

Khasanov I.A., Elizaryev A. N., Tarakanov D. A., Tarakanov Dm. A. Optimization of parameters of hydrograph dissection methods to increase their effectiveness on the example of the Belaya river basin. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 125–137. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.125.

между внешними воздействиями и естественными процессами. Антропогенные воздействия в этот период могут привести к нехватке водных ресурсов в речных системах, что в свою очередь может негативно сказаться как на устойчивости экосистем, так и устойчивого обеспечения водой сельскохозяйственных и промышленных предприятий.

При расчленении гидрографа отмечают сток реки, который постоянно поддерживается подземными водами – «базисный сток» [Hall, 1968; Виссмен, 1979; Tallaksen, 1995]. Базисный сток является ключевым элементом в формировании устойчивого стока реки, особенно в периоды отсутствия атмосферных осадков. Исследование базисного стока позволяет понять, как подземные воды влияют на поддержание водных экосистем, качество воды и управление водных ресурсов [Eckhardt, 2008; Price, 2011; Liu, Xie, 2017; Liu et al., 2019]. Существует несколько методов выделения базисного стока, которые нашли широкое применение в гидрологических исследованиях и позволяют быстро и эффективно обрабатывать большие ряды данных [Eckhardt, 2008; Sloto, Crouse, 1996; Arnold, Allen, 1999; Aksoy, Kurt, Eris, 2009; Zhang et al., 2017; Gnann, Woods, Howden, 2019]. Особенностью данных методов является применение различных параметров, используемых при выделении базисного стока: индекса максимального базового стока BFI_{max}, принимающего значения от 0,2 до 0,8 в зависимости от проницаемости пород, коэффициента спада α, описывающего скорость уменьшения речного стока со временем, и количество дней N [Arnold, Allen, 1999; Gnann, Woods, Howden, 2019; Chapman, 1991; Chapman, Maxwell, 1996; Eckhardt, 2005]. Калибровка параметров BFI_{max} и α является неотъемлемой частью гидрологических исследований, направленных на выделение базисного стока, и обеспечивает адаптацию методов к конкретным условиям каждого водосбора, что, в свою очередь, повышает достоверность результатов и позволяет учитывать уникальные гидрологические особенности каждой территории [Yang, Choi, Lim, 2018; He S. et al., 2022; Хасанов, Елизарьев, Тараканов, 2024].

Использование дополнительных параметров и оптимальный подбор их значений позволяет учесть сложные взаимодействия между различными компонентами водосбора. Это особенно актуально для ситуаций, когда на водных объектах России наблюдается высокая разница между расходами воды в период весеннего половодья и зимней межени. Например, для реки Белая, протекающей рядом с городом Уфа, такая разница может достигать 27 раз [Гареев, 1978; Гареев, 1989]. Использование различных методов выделения базисного стока позволит определить более адаптированный подход к изучению гидрологических процессов, что является ключевым элементом для эффективного управления водными ресурсами.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка влияния подбора параметров методов расчленения гидрографа на эффективность выделения базисного стока для рассматриваемой речной сети бассейна реки Белая.

Методика исследования

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белая, расположенного на территории Южного Урала, Россия. Климат Южного Урала умеренно континентальный, характеризуется влажным теплым летом и суровой зимой. За год выпадает от 350 до 800 мм осадков. Снежный покров устанавливается во второй половине ноября и начинает сходить к середине апреля. Река Белая протекает по всей территории Башкортостана, по границе с Удмуртией и Татарстаном. Питание реки преимущественно снеговое. Площадь бассейна реки Белой составляет 142 000 км^2 (рисунок 1).

Для проведения исследований использовались многолетние данные наблюдений за среднесуточным расходом воды на 10 гидрологических постах (рисунок 1). Для выделения базисного стока использовано 7 методов: фиксированного интервала (fixed interval), скользящего интервала (sliding interval), метод локальных минимумов (local minimum), Экхардта (Eckhard), Чапмана (Chapman), Чапмана и Максвела (CM), Лайна и Холлика (LH) [Eckhardt, 2008; Sloto, Crouse, 1996; Chapman, 1991; Chapman, Maxwell, 1996; Lyne, Hollick, 1979; Nathan, McMahon, 1990; Mau, Winter, 1997].

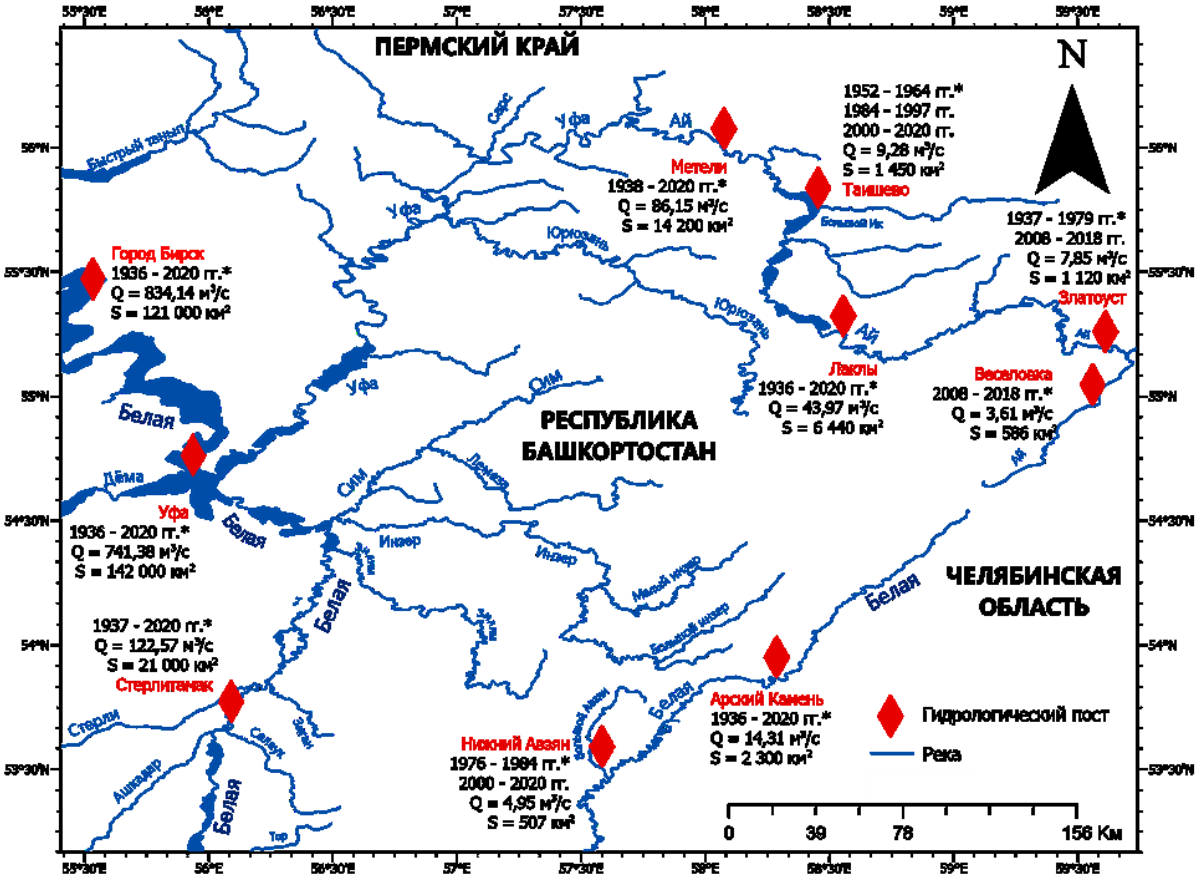


Рисунок 1. Бассейн реки Белая с обозначением географического расположения 10 гидрологических постов. На рисунке: * – период наблюдений, гг., Q – средний расход воды, м^3/с и S – площадь водосбора, км^2

Figure 1. The Belaya River basin with the designation of the geographical location of 10 hydrological posts. Shown in the picture: * – observation period, years, Q – average water discharge, m^3/s and S – catchment area, km^2

Для выделения базисного стока по методам Eckhard, Chapman, CM и LH необходимо определить параметр коэффициента спада α, который описывает скорость уменьшения речного стока со временем и может быть определен 4 различными методами:

1. Анализ кривой спада, полученной путем усреднения соответствующих значений кривых спада за каждый год всего периода наблюдения (NH);

2. Построение точечной диаграммы расхода воды *Qj+1* от *Qj* (Eckhardt);

3. Применение статистического анализа расхода воды *Qj+1/Qj* (BH);

4. Усреднение всех полученных значений коэффициента спада α [He et al., 2022; Nathan, McMahon, 1990; Brodie, Hostetler, 2005; Rimmer, Hartmann, 2014]. Стоит также отметить, что метод Eckhardt проанализирован с изменением параметра BFI_{max}. Параметр BFI_{max} равен 0,25 для водосбора, сложенного скальными породами, и 0,8 – для сложенного хорошо проницаемыми породами [Eckhardt, 2005; Knoben, Freer, Woods, 2019].

Методы fixed interval, sliding interval и local minimum используют идентичный подход при определении параметра N (количества дней):

$$N = A^{0.2} \quad (1)$$

где A – площадь водосборного бассейна в квадратных милях [14]. Однако авторы [Sloto, Crouse, 1996, Сучкова, 2021] отмечают увеличение или уменьшение значений базисного стока при изменении параметра N. Таким образом, необходимо выполнить оценку влияния параметра N на выделение базисного стока с помощью изменения количества дней:

1. N меньше расчетного на 1 день (N-1);
2. N больше расчетного на 1 день (N+1);
3. N расчетное по формуле (1) (N);
4. N больше расчетного на 2 дня (N+2).

Оценка эффективности зарубежных методов выделения базисного стока проводилась по коэффициенту эффективности модели Нэша – Сатклиффа (NSE), основанному на функции нормализации. Значения коэффициента эффективности NSE метода варьируются от - ∞ до 1 и определяется по следующей формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t1,t2,\dots tn}(Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t1,t2,\dots tn}\left(Q_0^t - \overline{Q_0}\right)^2} \quad (2)$$

где *t1*, *t2*, …*tn* – дата n-го значения расхода воды, Q_m^t – значения базисного стока, которые были получены после применения метода выделения базисного стока, м^3/с, Q_0^t – значения расхода реки полученные после применения трех критериев оценки, м^3/с, $\overline{Q_0}$ – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, м^3/с [Rimmer, Hartmann, 2014; Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020; Борщ, Симонов, Христофоров, 2020; Gan et al., 2022; Narimani et al., 2023].

Также среди исследователей для оценки эффективности методов выделения базисного стока распространен критерий Клинга-Гупты (KGE), значения которого варьируются от -∞ до 1, определяемый по формуле:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} - 1\right)^2 + \left(\frac{\overline{Q_m}}{\overline{Q_0}} - 1\right)^2} \quad (3)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона между значениями расхода реки и базисного стока, σ_0 – стандартное отклонение значений расхода реки, м^3/с, σ_m – стандартное отклонение значений базисного стока, м^3/с, $\overline{Q_0}$ – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, м^3/с, $\overline{Q_m}$ – среднее значение базисного стока, м^3/с [Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020].

Метод выделения базисного стока, значение NSE и KGE которого ближе всего располагается к 1 считается наиболее эффективным [Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020; Gan, 2022].

Результаты и их обсуждение

Расчленение гидрографа и выделение базисного стока на 10 створах выполнено при различных значениях параметра коэффициента спада α (таблица 1).

Таблица 1. Значениях параметра коэффициента спада α для каждого гидрологического поста
Table 1. Values of the decline coefficient parameter α for each hydrological post

Метод определения параметра α	Гидрологический пост									
	Город Уфа	Город Бирск	Город Стерлитамак	Село Метели	Село Лаклы	Дом отдыха Арский камень	Деревня Ташшево	Город Златоуст	Село Веселовка	Село Нижний Авзян
NH	0,99	0,99	0,99	0,94	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99	0,99
BH	0,94	0,95	0,93	0,91	0,97	0,94	0,89	0,95	0,89	0,90
Eckhardt	0,95	0,95	0,87	0,92	0,93	0,84	0,80	0,78	0,88	0,77
Среднее значение	0,92	0,96	0,93	0,92	0,96	0,93	0,90	0,9	0,92	0,89

Как видно из рисунка 2, хорошую сходимость значений базисного стока с расходом воды демонстрируют методы sliding interval, fixed interval, LH и Eckhardt (при BFImax, равном 0,8). Исключением являются методы local minimum и Eckhardt (при BFImax, равном 0,2). Метод local minimum отмечает минимальные значения расхода реки, затем соединяет эти минимумы на гидрографе, а полученная линия интерпретируется в качестве базисного стока. Стоит также отметить большую разницу между значениями базисного стока при применении метода Eckhardt.

Для каждого метода выделения базисного стока выполнен расчет показателей эффективности NSE и KGE с учетом различных

значений параметров коэффициента спада α, индекса максимального базового стока BFImax и количества дней N. Результаты расчетов графически интерпретированы на рисунке 3.

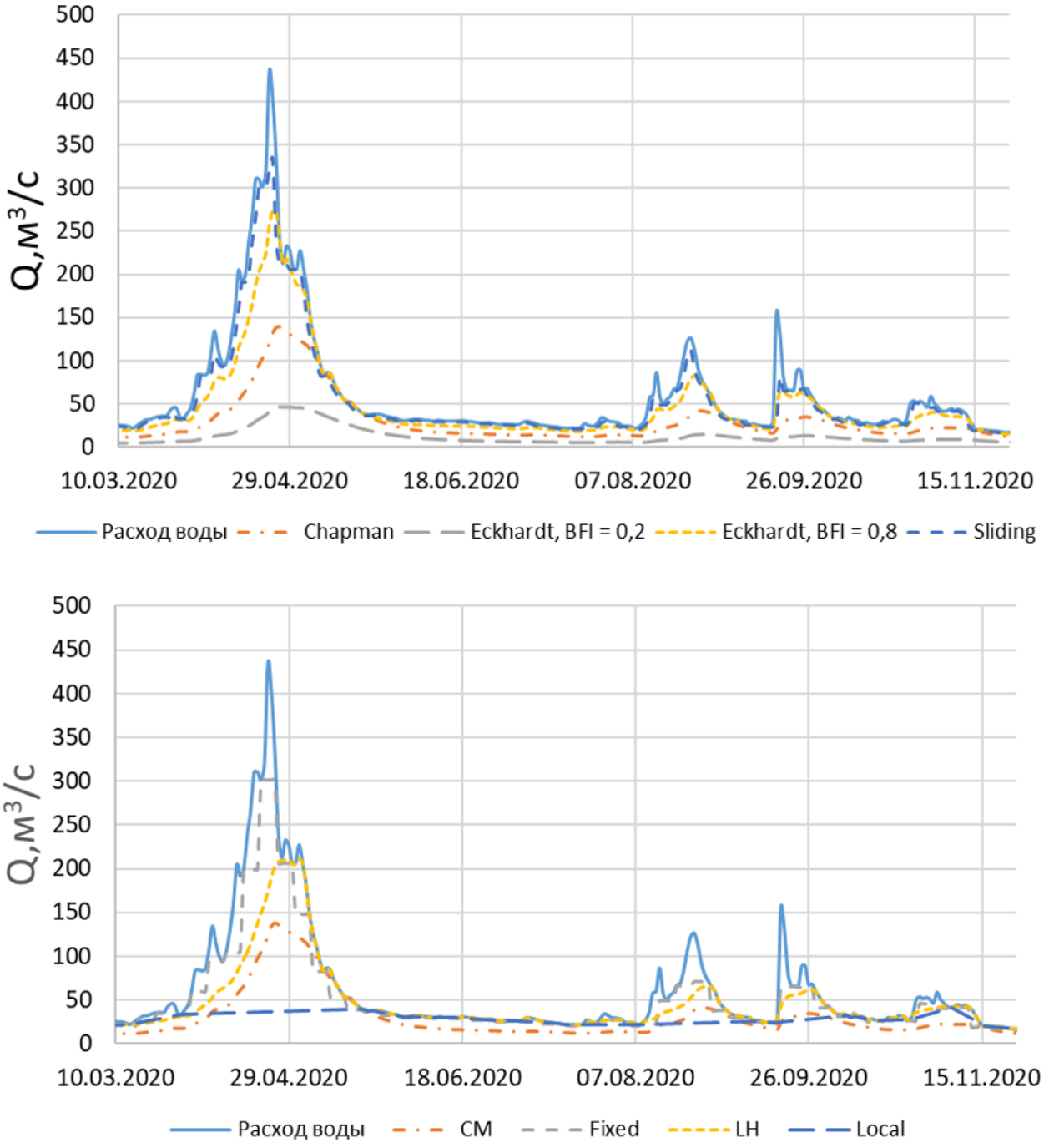
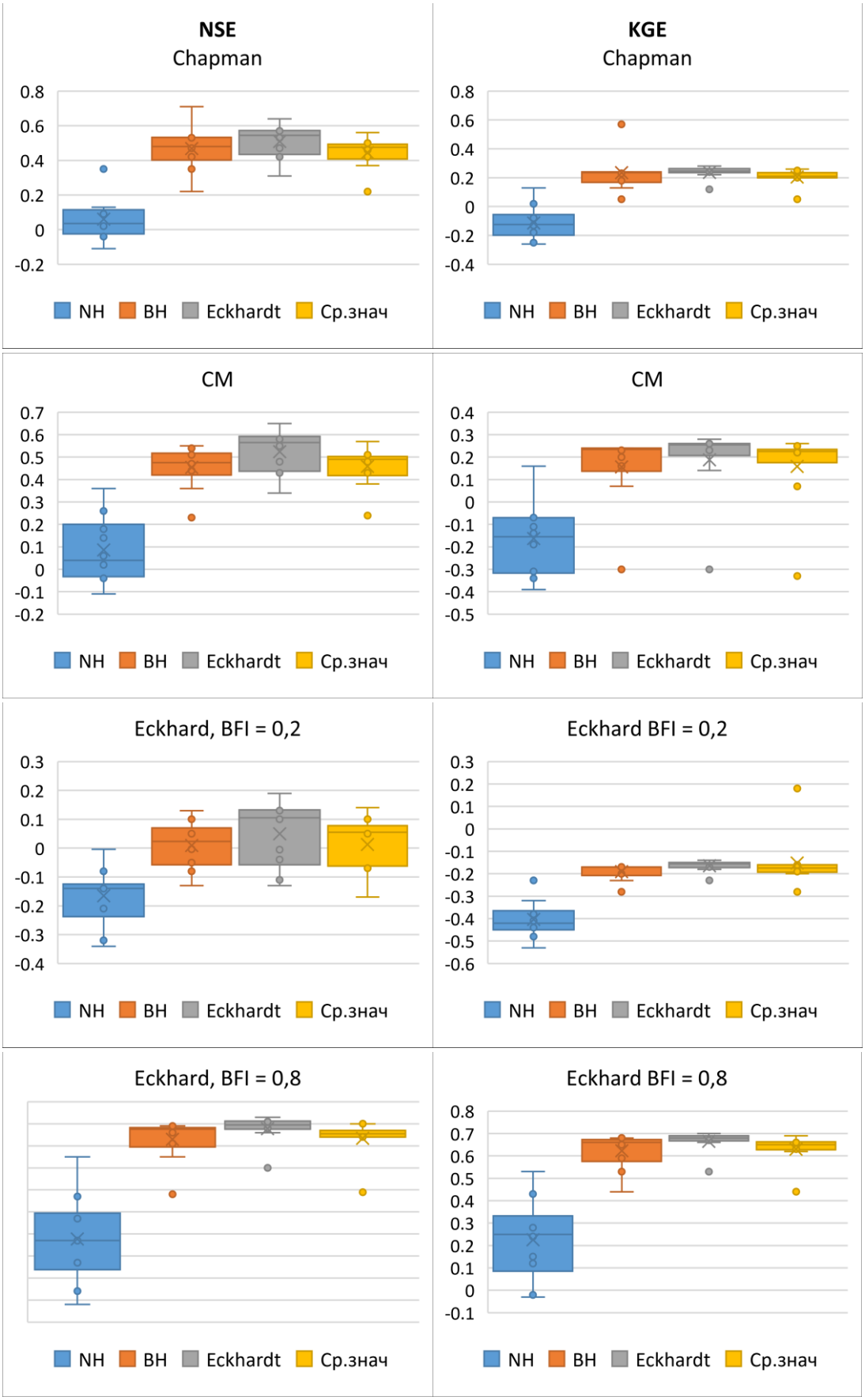


Рисунок 2. Гидрограф реки Ай (село Лаклы). Выделение базисного стока выполнено следующими методами: а) Методы Chapman, Eckhardt (BFImax = 0,2), Eckhardt (BFImax = 0,8), sliding interval. б) Методы fixed interval, и local minimum, CM и LH

Figure 2. Hydrograph of the Ai River (Lakly village). The allocation of the basic runoff is performed by the following methods: a) Chapman, Eckhardt (BFImax = 0.2), Eckhardt (BFImax = 0.8), sliding interval methods. b) Fixed interval, and local minimum, CM and LH methods

Значения медиан NSE для каждого рассматриваемого в данном исследовании метода, расположенных ближе всего к 1, при различных параметрах α, BFImax и N приведены в таблице 2.


NSE
Chapman
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
KGE
Chapman
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
CM
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
CM
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
Eckhard, BFI = 0,2
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
Eckhard BFI = 0,2
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-0.4
-0.5
-0.6
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
Eckhard, BFI = 0,8
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач
Eckhard BFI = 0,8
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
NH
BH
Eckhardt
Ср.знач

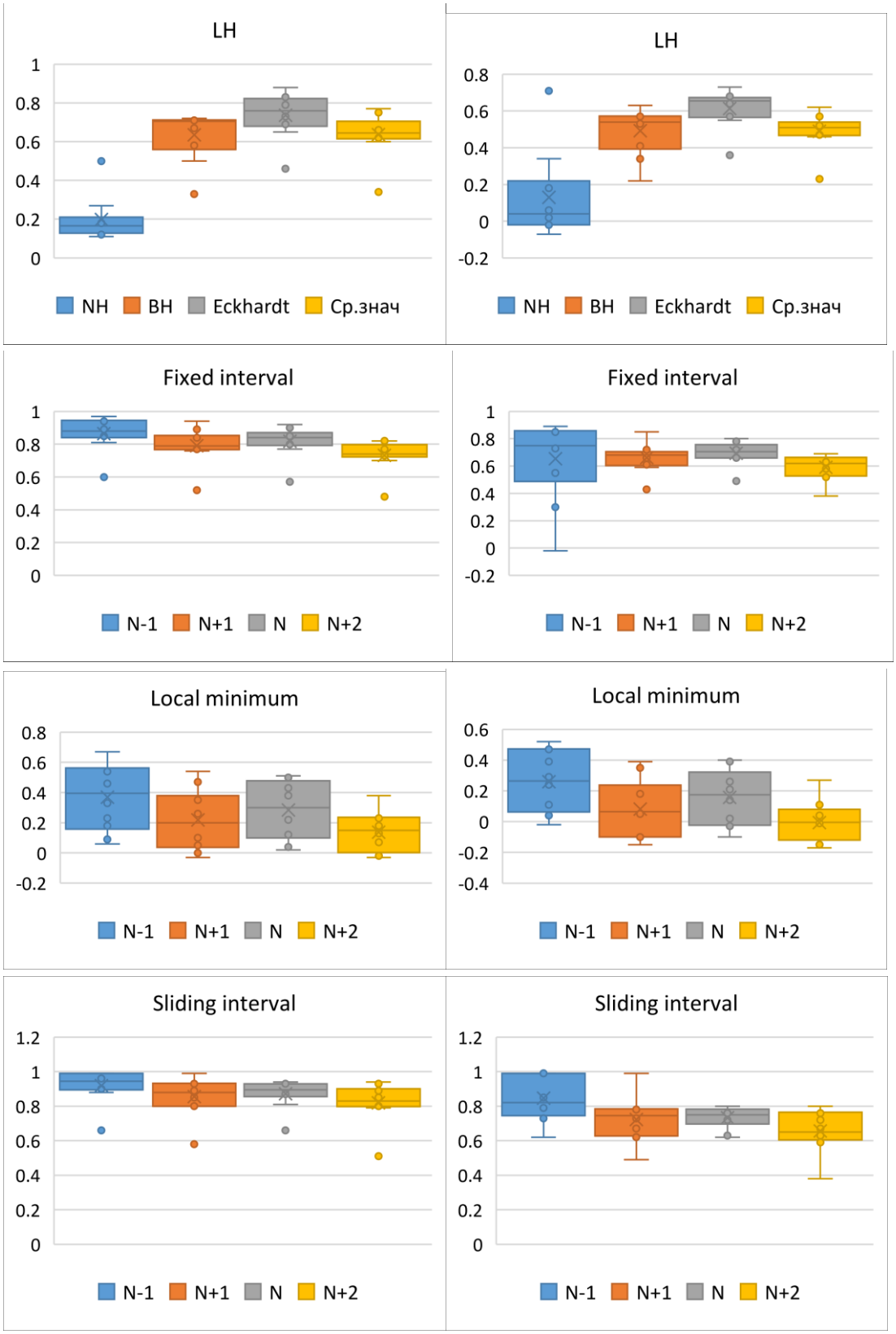


Рисунок 3. Результаты оценки эффективности 7 методов выделения базисного стока по с помощью коэффициентов NSE и KGE при различных значениях параметров коэффициента спада α, индекса максимального базового стока BFImax и количества дней N

Figure 3. The results of evaluating the efficiency of 7 methods baseflow separation using the NSE and KGE coefficients at different values for the parameters of the decrease coefficient α, the maximum baseflow BFImax, and the number of days N

Таблица 2. Значения медиан NSE для каждого рассматриваемого в данном исследовании метода, расположенных ближе всего к 1, при различных параметрах α, BFImax и N

Table2. The values of the median NSE for each method considered in this study, located closest to 1, for different parameters α, BFImax and N

№ п/п	Метод выделения базисного стока	Метод определения параметра α, BFI_{max} и N (NSE/KGE)	NSE	KGE
1	Chapman	Eckhardt/Eckhardt	0,55	0,25
2	CM	Eckhardt/Eckhardt	0,57	0,26
3	Eckhardt (BFI_{max} = 0,2)	Eckhardt/Eckhardt	0,11	-0,16
4	Eckhardt (BFI_{max} = 0,8)	Eckhardt/Eckhardt	0,9	0,68
5	Fixed interval	N меньше расчетного на 1 день*	0,88	0,75
6	LH	Eckhardt/Eckhardt	0,76	0,66
7	Local minimum	N меньше расчетного на 1 день	0,4	0,27
8	Sliding interval	N меньше расчетного на 1 день	0,95	0,82

* - параметр N определяется с помощью формулы (2)

Исследования эффективности методов выделения базисного стока и влияния параметров α, BFImax и N на значения базисного стока широко проводятся и за рубежом [Yang, Choi, Lim, 2018; He et al., 2022]. Так, например, в работе [Yang et al., 2018] установлено оптимальное значение параметра коэффициента спада α для национального экспериментального леса в Почуне, Кенгидо, Южная Корея. Установлено, что оптимальный параметр коэффициента спада α может принимать значения 0,85 и 0,92 для хвойных и лиственных лесов. В качестве основного метода выделения базисного стока использовался метод Eckhardt. В работе [Shengjia et al., 2022] проведено исследование по поиску оптимального значения параметра α и BFImax для реки Южный Тяо, Китай. Результаты исследования показали, что оптимальное значение параметра α варьируется в диапазоне от 0,91 до 0,97 для годового и от 0,89 до 0,98 для ежемесячного коэффициента спада. Значение NSE для среднесуточного, ежемесячного и годового коэффициента спада α составляет 0,8, 0,78 и 0,67 соответственно. Для определения оптимального значения BFImax авторы предлагают использовать генетический алгоритм [Katoch, Chauhan, Kumar, 2021].

Стоит отметить, что в работах [Yang et al., 2018; He S. et al., 2022] не учитывается влияние изменения осадков на методы выделения базисного стока.

Заключение

Таким образом, проведенная оценка эффективности 7 различных методов выделения базисного стока с помощью коэффициента эффективности NSE и KGE позволила установить, что метод Eckhardt наиболее эффективен при применении параметров α и BFImax (при BFImax, равном 0,8). Однако метод Eckhardt при BFImax, равном 0,2, показывает самые низкие значения NSE и KGE, что говорит о нецелесообразности его применения на водосборе, сложенного скальными породами. В свою очередь метод sliding interval наиболее эффективен при применении параметра N, значение которого необходимо уменьшать на 1 день. Следовательно, метод Eckhardt и sliding interval могут быть рекомендованы к использованию для всей речной сети бассейна реки Белая. Несмотря на это следует отметить, что методы fixed interval и LH также продемонстрировали высокие значения NSE и KGE.

По результатам сравнительного анализа влияния параметров α, BFImax и N на значения базисного стока, как следствие, на NSE и KGE установлено:

1. Метод NH по определению параметра α значительно снижает эффективность методов Chapman, CM, Eckhardt (при BFImax = 0,2 и 0,8) и LH;

2. Расчет параметра α с помощью метода Eckhardt позволяет выделить базисный сток с самой высокой эффективностью при

использовании методов Chapman, CM, Eckhardt (при BFImax = 0,8) и LH;

3. Применение методов fixed interval, local minimum и sliding interval, главным критерием которых выступает параметр N, наиболее эффективны при уменьшении расчетного значения параметра N на 1 день.

Таким образом, оптимальный диапазон значений α для методов выделения базисного стока Chapman, CM, Eckhardt (BFImax = 0,2), Eckhardt (BFImax = 0,8) и LH составляет от 0,77 до 0,95.

Литература

Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegaard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. The natural flow regime // Bioscience. 1997. Vol. 47. P. 769–784.

Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн речной поток – русло. СПб.: РГГМУ. 1999. 218 с.

Дубинина В.Г., Жукова С.В. Оценка возможных последствий строительства Багаевского гидроузла для экосистемы Нижнего Дона // Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 20–30.

Дубинина В.Г., Никитина О.И. Об учете экологического фактора при управлении водными ресурсами водохранилищ. Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, г. Сочи, 23–29 сентября 2019 г. – Новочеркасск: Лик, 2019. – С. 80−86.

Никитина О.И. Влияние регулирования стока на водные экосистемы бассейна амура и меры по их сохранению: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.36. – Институт водных проблем российской академии наук, Москва. 2021. 147 с.

Hall F.R. Base-flow recessions – A review // Water Resour. Res. 1968. Vol. 4 (5). P. 973–983.

Виссмен У. Введение в гидрологию. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1979. 470 с.

Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis // Journal of Hydrology. 1995. Vol. 165. P. 349–370.

Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods // J. Hydrol. 2008. Vol. 352 (1–2), P. 168–173.

Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions. A Review // Progress in Physical Geography. 2011. Vol. 35 (4). P. 465–492.

Liu X.Y., Xie F.F. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method // Water Resour Prot. 2017. Vol. 33 (01). P. 18–23.

References

Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegaard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. The natural flow regime. *Bioscience*, 1997, 47, P. 769–784.

Baryshnikov N.B. *Antropogennoe vozdeystvie na samoreguliruyushchuyusya sistemu basseyn rechnoy potok – ruslo [Anthropogenic impact on the self-regulating system of the river basin flow – channel]*. SPb.: RGGMU, 1999, 218 p.

Dubinina V.G., Zhukova S.V. Otsenka vozmozhnykh posledstviy stroitel'stva Bagaevskogo gidrouzla dlya ekosistemy Nizhnego Dona [The assessment of potential consequences of the construction of the Bagaevsky hydroelectric complex for the Lower Don ecosystem], *Rybnoe khozyaystvo [Fisheries]*, 2016, vol. 4, p. 20–30.

Dubinina V.G., Nikitina O.I. Ob uchete ekologicheskogo faktora pri upravlenii vodnymi resursami vodokhranilishch [On the consideration of ecological factors in the management of water resources of reservoirs] *Vodokhranilishcha Rossiyskoy Federatsii: sovremennye ekologicheskie problemy, sostoyanie, upravlenie: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf., g. Sochi [Reservoirs of the Russian Federation: contemporary ecological problems, condition, management: collection of materials from the All-Russian scientific and practical conf., Sochi.], 23–29 sentyabrya 2019 g,* Novocherkassk: Lik, 2019, p. 80–86.

Nikitina O.I. *Vliyanie regulirovaniya stoka na vodnye ekosistemy basseyna amura i mery po ikh sokhraneniyu [The impact of flow regulation on the aquatic ecosystems of the Amur River basin and measures for their conservation]*: dis. … kand. geogr. nauk: 25.00.36, Institut vodnykh problem rossiyskoy akademii nauk, Moskva, 2021, 147 p.

Hall F.R. Base-flow recessions – A review. *Water Resour. Res*, 1968, vol.4 (5), p. 973–983.

Vissmen U. *Vvedenie v gidrologiyu [Introduction to Hydrology],* Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979, 470 p.

Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol*, 1995, vol.165, p. 349–370.

Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 352 (1–2), p. 168–173.

Liu Z, Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F. et al. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China // Forests. 2019. Vol. 10. 1065.

Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis (96-4040). Reston, VA: U.S. Geological Survey. 1996.

Arnold J.G., Allen P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records // J. Am. Water Resour. Assoc. 1999. Vol. 35 (2). P. 411–424.

Aksoy H., Kurt I., Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method // J. Hydrol. 2009. Vol. 372 (1–4). P. 94–101.

Zhang J., Zhang Y., Song J., Cheng L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia // J. Hydrol. 2017. Vol. 549. P. 252−263.

Gnann S.J., Woods R.A., Howden N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve? // Water Resour. Res. 2019. Vol. 55 (4). P. 2838–2855.

Chapman T. G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon // Water Resour. Res. 1991. Vol. 27 (7). P. 1783–1784.

Chapman T.G., Maxwell A.I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Paper presented at Hydrology and Water Resources Symposium Water and the Environment. Institution of Engineers, Australia, 1996.

Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation // Hydrol. Process. 2005. 19 (2). P. 507–515.

Yang H., Choi H. T., Lim H. Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments // Water. 2018. Т. 10. №. 8. С. 1074.

He S. et al. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter // Hydrological Processes. 2022. Т. 36. №. 3. С. e14512.

Хасанов И. А., Елизарьев А.Н., Тараканов Д.А. Оценка эффективности методов выделения базисного стока для бассейна реки Белой, Россия // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34, № 1. С. 85−95. DOI 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95.

Гареев А.М. Водные ресурсы Башкирии и их состояние. Уфа: Китап. 1978. 182 с.

Гареев А.М. Оптимальное планирование водоохранных мероприятий. Уфа: Китап. 1989. 230 с.

Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions. A Review. *Progress in Physical Geography*, 2011, vol. 35 (4), p. 465–492.

Liu XY, Xie FF. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method. *Water Resour. Prot.*, 2017, vol. 33(01), p. 18–23.

Liu Z., Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F. et al. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China. *Forests*, 2019, vol.10, 1065.

Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: *A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis (96-4040)*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1996.

Arnold, J.G., Allen, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *J. Am. Water Resour. Assoc.,* 1999, vol. 35 (2), p. 411–424.

Aksoy, H., Kurt, I., Eris, E. Filtered smoothed minima baseflow separation method. *J. Hydrol*, 2009, vol. 372 (1–4), p. 94–101.

Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. *J. Hydrol*, 2017. 549, p. 252–263.

Gnann, S.J., Woods, R.A., Howden, N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve? *Water Resour. Res*, 2019, vol. 55 (4), p. 2838–2855.

Chapman T. G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Res.,* 1991, vol. 27 (7), p. 1783–1784.

Chapman, T.G., Maxwell, A.I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. *Hydrology and Water Resources Symposium Water and the Environment*. Institution of Engineers, Australia, 1996.

Eckhardt, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process*, 2005, vol. 19 (2), p. 507–515.

Yang H., Choi H. T., Lim H. Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments. *Water*, 2018, vol. 10 (8), p. 1074.

He S. et al. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter. *Hydrological Processes*, 2022, vol. 36(3), e14512.

Hasanov I. A., Elizarev A.N., Tarakanov D.A. Ocenka effektivnosti metodov vydeleniya bazisnogo stoka dlya bassejna reki Beloj, Rossiya [Assessment of the effectiveness of baseflow separation methods for the Belaya River basin, Russia]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*

Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia, 1979. T. 79. Vol. 10. P. 89–93.

Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses // Water Resour. Res. 1990. Vol. 26 (7). P. 1465−1473.

Mau D.P., Winter, T.C. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA // Ground Water, 1997. Vol. 35(2), P. 291–304.

Brodie R. S., Hostetler S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs // Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference. Auckland: New Zealand Hydrological Society Press. 2005. Vol. 28.

Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models // J. Hydrol. 2014. Vol. 514, P. 249−257.

Сучкова К.В. Моделирование генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища: дис. … канд. геогр. наук: 25.00.27. - Институт водных проблем российской академии наук, Москва, 2021. 157 с.

Knoben W.J.M., Freer J.E., Woods R.A. Technical note: inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. Vol. 23 (10). P. 4323–4331.

Xie J., Liu X., Wang K., Yang T. et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. J. Hydrol, 2020. Vol. 583, 124628.

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. С. 176–189.

Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China. // Environ Earth Sci. 2022. Vol. 81. P.323.

Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., et al. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran // J. Hydrol, 2023. Vol. 47. 101383.

Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // Multimedia tools and applications. 2021. Vol. 80. P. 8091−8126.

[Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences], 2024, vol. 34(1), pp. 85–95, DOI 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95.

Gareev A.M. *Vodnye resursy Bashkirii i ikh sostoyanie [Water Resources of Bashkiria and Their Condition.*]. Ufa: Kitap, 1978, 182 p.

Gareev A.M. *Optimal'noe planirovanie vodookhrannykh meropriyatiy [Optimal Planning of Water Protection Measures.]*, Ufa: Kitap, 1989, 230 p.

Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Inst. of eng. Australia national conf.* Australia, Barton 1979, vol. 79 (10), p. 89–93.

Nathan, R.J., McMahon, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res*, 1990, vol. 26 (7), p. 1465–1473.

Mau D.P., Winter, T.C. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Ground Water*, 1997, vol. 5(2), p. 291−304.

Brodie R. S., Hostetler S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Proc. of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conf*. Auckland: New Zealand Hydrological Society Press, 2005, vol. 28.

Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models. *J. Hydrol*, 2014, vol. 514, p. 249−257.

Suchkova K.V. *Modelirovanie geneticheskikh sostavlyayushchikh rechnogo stoka na vodosbore Mozhayskogo vodokhranilishcha [Modeling the Genetic Components of River Flow in the Mozhayskoye Reservoir Watershed.]*: dis. … kand. geogr. nauk: 25.00.27, Institut vodnykh problem rossiyskoy akademii nauk, Moskva, 2021, 157 p.

Knoben W.J.M., Freer J.E., Woods R.A. Technical note: inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2019, vol. 23 (10), p. 4323–4331.

Xie J., Liu X., Wang K., Yang T., et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. *J. Hydrol*, 2020, p.583, 124628.

Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Effektivnost' modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Effectiveness of Modeling and Forecasting River Flow]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasts*], 2020, p. 176−189.

Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China. *Environ Earth Sci*, 2022, vol. 81, p. 323.

Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., et al. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran. *J. Hydrol,* 2023, vol. 47, 101383.

Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // Multimedia tools and applications, 2021, vol. 80, pp. 8091−8126.

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 556.044+556.54+556.166+556.332.72 DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.138

ВЛИЯНИЕ СТОКА РЕКИ ЧЕРНОЙ (СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ РЕГИОН) НА УСТЬЕВОЕ ВЗМОРЬЕ ВО ВРЕМЯ ПАВОДКОВ

Р.Я. Миньковская [1]*, А.Н. Демидов[2]**, С.В. Наривончик [1]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", г. Севастополь, Россия; [2] Севастопольское отделение Федерального государственного бюджетного учреждения "Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова", Севастополь, Россия

e-mail: *rosmink@yandex.ru, **sev-oazis@mail.ru

Аннотация. На основе многолетней (1991–2023 гг.) и оперативной (2024 г.) информации Отдела гидрофизики шельфа МГИ РАН получены данные о влиянии стока р. Черной на устьевое взморье в период паводков различного генезиса. Установлено, что наибольшее влияние на поверхностный слой воды Севастопольской бухты, в условиях регулирования речного стока Чернореченским водохранилищем, оказывали паводки природно-антропогенного происхождения. Например, аварийный сброс в нижний бьеф водохранилища в январе 2024 г., вызвал распреснение поверхностного слоя воды значительной части устьевого взморья до 2–17 ‰, что в последние 30 лет по натурным наблюдениям не отмечалось. В период этого паводка в западную часть Севастопольской бухты поступала вода из прилегающей части Черного моря соленостью 18–20 ‰. Во фронтальной зоне горизонтальные

THE EFFECT OF THE RUNOFF OF THE CHERNAYA RIVER (SEVASTOPOL REGION) ON THE ESTUARINE COAST DURING FLOODS

Roza Ya. Minkovskaya [1*], Alexander N. Demidov [2**], Svetlana V. Narivonchik [1]

[1] Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences" , Sevastopol, Russia; [2] Sevastopol branch of the Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov State Oceanographic Institute", Sevastopol, Russia

e-mail: *rosmink@yandex.ru, **sev-oazis@mail.ru

Abstract. Data on the effect of the Chernaya River runoff on the estuarine coast during floods of various genesis were obtained based on long-term (1991–2023) and operational (2024) information from the Shelf Hydrophysics Department of Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. It was found that floods of natural and anthropogenic origin had the greatest impact on the surface water layer of the Sevastopol Bay under the conditions of regulation of river runoff by the Chernaya River reservoir. For example, an emergency discharge into the lower reaches of the reservoir in January 2024 caused the desalination of the surface water layer of a significant part of the estuarine coast up to 2–17 ‰, a phenomenon not observed in field studies over the past 30 years. During this flood, water from the adjacent part of the Black Sea with a salinity of 18–20 ‰ entered the western part of Sevastopol Bay. In the frontal zone,

Minkovskaya R.Ya., Demidov A.N., Narivonchik S.V. The effect of the runoff of the Chernaya River (Sevastopol region) on the estuarine coast during floods. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 138–156. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.138.

градиенты солености воды достигали 2–6 ‰ на км. Кроме того, рассматриваемый паводок вызвал геоморфологические изменения устьевого участка реки, затопление прилегающих территорий, что потребовало значительных средств для ликвидации негативных последствий его влияния на среду, население и хозяйство. Сравнительный анализ средних многолетних распределений солености поверхностного слоя воды устьевого взморья, выполненный с учетом природной цикличности гидрометеорологических характеристик, свидетельствует о наметившемся осолонении прибрежной акватории г. Севастополя, а анализ аномалий солености – об её зависимости от сбросов пресной воды из Чернореченского водохранилища.
Ключевые слова: устье р. Черной; паводки; опасные явления; распреснение Севастопольской бухты; изменчивость солености воды; аварийные сбросы; влияние речного стока на устьевое взморье.

the horizontal gradients of water salinity reached 2–6 ‰ per km. In addition, that flood caused geomorphological changes at the estuary section of the river, flooding of adjacent areas, necessitating significant funds to mitigate adverse effects on the environment, population and economy. A comparative analysis of the average long-term salinity distribution at the surface water layer of the estuarine coast, performed taking into account the natural cyclicity of hydrometeorological characteristics, reveals a trend of increasing salinity aof the coastal water area of Sevastopol, and the analysis of salinity anomalies indicates its dependence on freshwater discharges from the Chernaya River reservoir.
Keywords: mouth of the Chernaya River; floods; dangerous phenomena; desalination of the Sevastopol Bay; variability of water salinity; emergency discharges; influence of river runoff on the estuarine coast.

Введение

Река Черная – основной источник водоснабжения Севастопольского региона и важная составляющая баланса воды, тепла и солей Севастопольской бухты, наибольшей части устьевого взморья реки. С речной водой на устьевой участок реки и устьевое взморье поступают растворенные и взвешенные вещества, лимитирующие жизнедеятельность биотической компоненты экосистемы устья и прилегающей части Черного моря. Несмотря на то, что сток р. Черной в период паводков оказывает существенное влияние на бухту, этот процесс изучен недостаточно из-за неоперативности наблюдений в период паводков, чаще отмечающихся в осенне-зимний период при неблагоприятных погодных условиях.

Система мониторинга устья р. Черной имеет ряд недостатков методического характера, часть которых обусловлена объективными причинами. Одна из них – асинхронность наблюдений: определение расхода воды, поступающего на устьевое взморье, не совпадает по времени с выполнением океанографических съёмок Севастопольской бухты; другая – отсутствие оперативного реагирования на резкое изменение гидрометеорологических условий. Данные Росгидромета о расходе воды на гидропосту (г/п) Хмельницкое только косвенно могут характеризовать поступление пресной воды на устьевое взморье, так как расход воды в вершине устья р. Черной, из-за водозабора для водоснабжения г. Севастополя, значительно меньше, чем на гидропосту. Кроме того, оперативная информация об изменении расхода воды на г/п Хмельницкое недоступна. Это препятствует изучению влияния паводков на режим и качество воды акватории г. Севастополя, имеющих важное значение для городского хозяйства.

Паводки на крымских реках относятся к опасным и особо опасным явлениям, так как могут наносить существенный ущерб при размыве дамб, берегов, затоплении территорий, используемых под застройку и сельское хозяйство. Для Севастопольского региона характерна застройка естественно-затапливаемых пойм, их перепланировка, подсыпка грунта или забор песка и гальки, изменение направления речных русел, их углубление, спрямление, очистка, сооружение поперечных и вдольбереговых дамб, износ

гидротехнических сооружений. Во время паводков, отмечающихся по нескольку раз в год, устьевое взморье р. Черной быстро распресняется, формируется «слой скачка» плотности (солености и температуры), препятствующий вертикальному обмену кислородом и химическими веществами. С речным стоком поступает большое количество биогенных и загрязняющих веществ, наносы, мусор, смываемые во время ливней с территории водосбора, а также пресноводные гидробионты. Резкое опреснение воды осолоненного приемного водоема приводит к изменению физико-химических свойств среды обитания галофильных и галофобных гидробионтов, что негативно отражается на биотической компоненте устьевой экосистемы и качестве воды. В условиях недостаточного ветрового перемешивания и водообмена Севастопольской бухты с морем градиенты всех абиотических характеристик сохраняются достаточно долго, что способствует аккумуляции загрязняющих веществ в слабопроточных частях устьевого взморья, ухудшая его экологическое состояние, ресурсный потенциал.

Большинство паводков в верховьях р. Черной аккумулируется в Чернореченском водохранилище, но бывают случаи сброса излишков паводковых вод в нижний бьеф. Иногда это приводит к негативным экологическим последствиям, затоплению территорий, что снижает качество окружающей природной среды и рекреационный потенциал региона. Последний такой случай наблюдался 19–25.01.2024 г. и рассмотрен в данной статье подробнее.

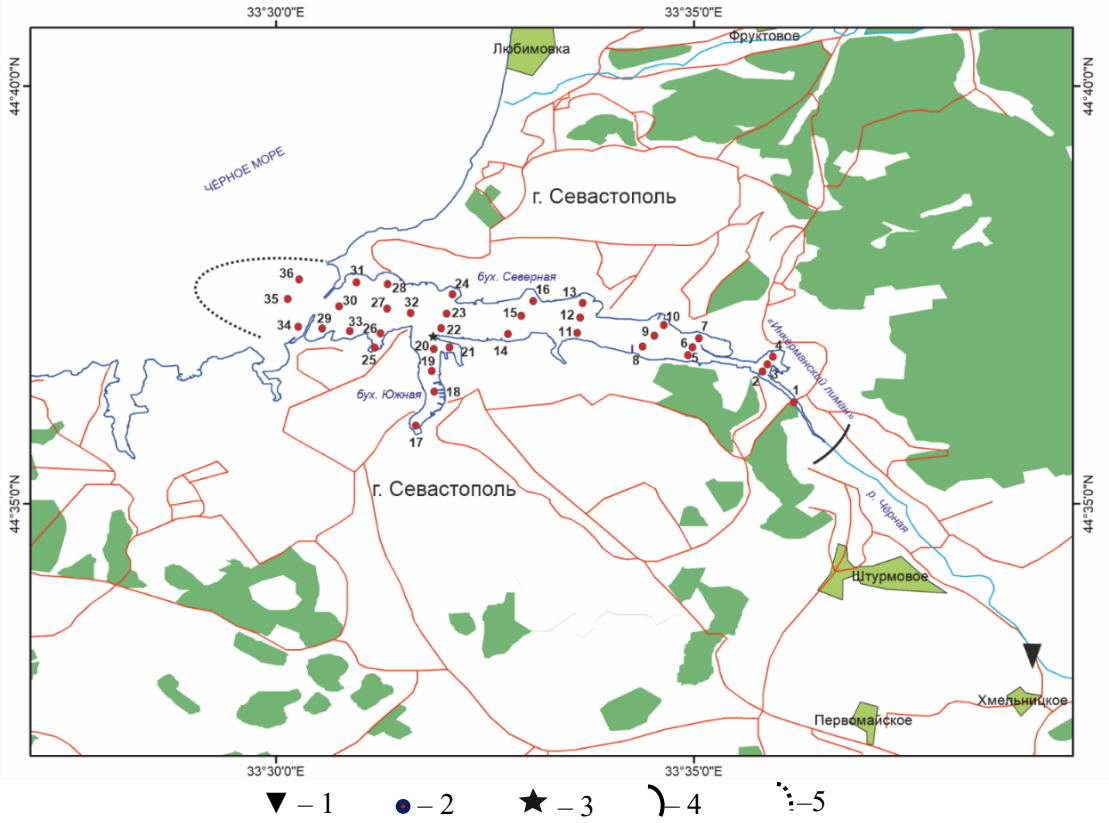


Рисунок 1. Сеть станций мониторинга в устье р. Черной:
1 – гидрологический пост Росгидромета (с. Хмельницкое), 2 – станции океанографических съемок МГИ РАН, 3 – метеорологическая станция Павловский мыс (МГ-II Севастополь), 4 – верхняя граница морского устья р. Черной, 5 – граница распреснения

Figure 1. The network of monitoring stations of Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences at the mouth of the Chernaya River:
1 – hydrological post of Roshydromet (Khmelnitskoye village); 2 – salinity sampling points; 3 – Pavlovsky Cape meteorological station (MG-II Sevastopol); 4 – upper boundary of the sea mouth of the Chernaya River; 5 – desalination boundary

Водохозяйственный комплекс г. Севастополя «находится в состоянии материально-технического упадка и перегруженности в результате урбанизации и сельскохозяйственного использования»[1]. Поэтому особое значение имеет сохранение природной среды от негативного воздействия экстремального стока рек в условиях неблагоприятных природных явлений, частота которых может увеличиваться при изменении климата. Неэффективное регулирование речного стока и чрезмерная нагрузка на прибрежные территории устьев малых рек (застройка естественно-затапливаемых пойм и аварийные попуски водохранилищ) – основная причина наводнений и материальных ущербов.

Протекая по Инкерманской долине р. Черная имеет очень малый уклон (1–4 ‰) и широкую пойму (0,8–1,0 км), масса пресной воды при паводках и половодье испытывает подпор не только со стороны Севастопольской бухты, особенно при нагонах, но и от сооружений, препятствующих свободному пропуску паводка (серия плотин, мостов и дорожных переходов). Поэтому на устьевом участке реки риски затопления территории максимальны. Ниже Чернореченского водохранилища в р. Черную впадают притоки: Байдарка, Уркуста, Ай-Тодорка и Сухая. При одновременных паводках на притоках в основное русло реки дополнительно поступает суммарный объем воды (соизмеримый с объёмом воды в основном русле), что увеличивает масштабы наводнения в рассматриваемом регионе.

Таким образом, цель работы – исследование влияния паводочного стока на морское устье р. Черной – актуальна. Полученные результаты могут быть использованы для решения научных и прикладных задач океанологии, гидрологии и смежных наук, разработки научного обоснования усовершенствования природопользования, моделирования масштабов влияния речного стока на приемный водоем. Объект исследования – морское устье р. Черной (рисунок 1), а предмет – анализ изменчивости опреснения поверхностного слоя воды устьевого взморья р. Черной по натурным данным.

Состояние изученности

Обычно средние паводки на верхних притоках р. Черной (Боса и Узунджа) и сток рек Арманка, Календа и Бага без проблем аккумулируются Чернореченским водохранилищем[2,3]. При значительных паводках попуски воды в его нижний бьеф, где расположена селитебная часть города Севастополя и сел, объекты экономики и социальной инфраструктуры, оказывают влияние на устье реки, включающее устьевой участок, «Инкерманский лиман», искусственного происхождения [Миньковская, Демидов, 2016], Севастопольскую бухту (рисунок 1), вызывая затопление побережья с жилыми и хозяйственными постройками. Так как при значительных паводках отмечались случаи распреснения не только Севастопольской бухты, но и прилегающей части Черного моря на расстоянии 1–4 км от входа в бухту [Куфтаркова и др., 2006], в соответствии с РД 52.10.324-92[4] можно включать эту часть моря, на которую распространяется влияние максимального стока реки, в состав устьевой области реки.

Ранее, до сооружения Чернореченского водохранилища, «Инкерманского лимана» и канала («Река Черная»), соединяющего его с Севастопольской бухтой, Инкерманская долина при паводках затапливалась регулярно, в дельте р. Черной существовали плавни и заболоченные территории, остатки которых прослеживаются до сих пор [Миньковская, Демидов, 2016; Миньковская, 2020].

[1] Постановление правительства Севастополя «Об утверждении государственной программы города Севастополя «Экология и охрана окружающей среды города Севастополя»» от 20.12.2021 № 660 ПП. https://sev.gov.ru/docs/253/138353/?ysclid=lzjp0cht8o703596330

[2] Чернореченское водохранилище. Правила эксплуатации [Текст] / Укргипроводхоз. — Киев, 1980. — Т. 1. — 271 с.

[3] Водохозяйственные расчёты Чернореченского водохранилища. Пояснительная записка. ЗАО «КрымНИОпроект». Симферополь, 1998. 30 с.

[4] РД 52.10.324-92 (Руководящий документ). Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. – М.: МО Гидрометеоиздата, 1993. – 189 с. https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293775/4293775610.pdf

Паводки на р. Черной наблюдаются 1–15 раз в году, обычно в холодный период года. Их вызывают жидкие осадки или снеготаяние при оттепелях. Но паводки бывают и летом, когда слой и интенсивность осадков больше, чем зимой [Ефимов, 2022]. Продолжительность паводков 2–5 дней; при этом уровень воды на гидропостах Росгидромета может подниматься за сутки на 1–4 м [Ресурсы, 1966; Мырза, Овчарук, 2014]. Расход воды р. Черной у с. Хмельницкое во время паводков бывает больше среднего многолетнего расхода воды на один-два порядка, особенно когда в области формирования стока реки слои стокообразующих осадков превышают следующие градации [Ефимов, 2022]: 1300 мм (раз в 20 лет), 1600 мм (раз в 50 лет) и 1900 мм (раз в 100 лет). В этих случаях происходит затопление пойменных земель, и точное измерение расхода воды в русле реки невозможно из-за наводнения, затопления гидрометрического мостика на г/п Хмельницкое и больших скоростей течения, не позволяющих выполнить инструментальные измерения.

По данным наблюдений[2], средний многолетний расход воды р. Черной в створе гидроузла Чернореченского водохранилища (в 19 км от г/п Хмельницкое) составлял 1,84 м^3/с, максимальные расходы воды в нижний бьеф водохранилища могут достигать 410 м^3/с (0,1 %-ой обеспеченности) и 655 м^3/с (0,01 %-ой обеспеченности), а без гарантийной поправки – даже 780 м^3/с. Эти величины сопоставимы с меженным стоком р. Днепр в створе Каховской ГЭС [Миньковская, 2022]. Расходы воды в нижнем бьефе Чернореченского водохранилища редкой обеспеченности (0,1 % и 0,01 %), приведенные в [Волосухин, 2019] и обоснованные 63-летним рядом наблюдений на г/п Хмельницкое, составляли соответственно 370 и 660 м^3/с. Здесь же показано, что предпаводковая сработка водохранилища для предотвращения его переполнения должна быть ~ 20,0 млн м^3, т.е. почти треть полезного объёма водохранилища (61,2 млн м^3).

Значимых тенденций паводочного стока р. Чёрной в 1947–2010 гг. [Овчарук, Тодорова, 2014] и в 1991–2020 гг. [Наривончик и др., 2022] не обнаружено.

В работе [Ермакова и др., 2022] проанализированы паводки на реках Крыма в 2021 г., вызванные обильными дождевыми осадками в летний период. Основное внимание авторы уделили паводку на р. Бельбек и ее притоках. При этом, влияние паводков на устьевое взморье не рассматривалось. Несмотря на то, что паводки были экстремальными, опасных последствий их воздействия на устье р. Черной не приводится. Очевидно, регулирование стока реки Чернореченским водохранилищем снизило возможный негативный эффект от паводка 2021 г. в устье этой реки, в то время как в её верховьях расход воды превысил норму почти в 13 раз. Даже паводок (на р. Сухой, притоке р. Черной), вызвавший прорыв дамбы пруда у Тороповой дачи, был нивелирован ниже по течению Гасфортовским водохранилищем.

В [Овсяный и др., 2007; Дегтерев, 2022] приводятся сведения о максимальных расходах воды, которые могут составлять 120 м^3/с (в теплый период года) – 200 м^3/с (в холодный период года), а в [Мырза, Овчарук, 2014] утверждается, что максимальные расходы паводков летнего периода в 2 раза больше, чем в холодный период года.

Процесс распреснения Севастопольской бухты ранее изучался по натурным данным [Репетин и др., 2003; Овсяный и др., 2007; Миньковская, 2015, 2020; Совга, Хмара, 2020; Наривончик и др., 2022] и с помощью математического моделирования [Иванов и др., 2003; Михайлова, Шапиро, 2005; Слепчук, Совга, 2018]. Схемы распределения солености воды в период проведения океанографических съемок Севастопольской бухты (за 1998–2007 гг.) представлены в [Атлас, 2010]. Эти работы в основном касались анализа отдельных съемок бухты или её частей (рисунок 1), за исключением работ [Миньковская, 2015, 2020; Наривончик и др., 2022], в которых данные натурных наблюдений обобщались за многолетний период. Однако даже при анализе изменчивости солености за многолетний период, результаты исследований не характеризовали распреснение устьевого взморья целиком. Например, в [Орехова, Медведев, Овсяный, 2018] рассматривались съемки акватории устья в 2007–2017 гг., но ни одного

случая тотального распреснения Севастопольской бухты не приводится. Кроме того, сказано, что масштабы «геохимической барьерной зоны» не зависят от стока, что не соответствует натурным данным, приведенным у других авторов [Куфтаркова, Губанов, Ковригина, 2006; Атлас, 2010; Совга, Хмара, 2020].

Несмотря на то, что были получены корреляционные зависимости солености воды бухты от стока р. Черной [Миньковская, 2020], влияние максимального речного стока на распределение абиотических характеристик детально не изучалось. Синхронные определения расхода воды в вершине устья р. Черной (существенно отличавшегося от расхода воды на г/п Хмельницкое) и солености воды устьевого взморья ранее не производились. Океанографические съёмки бухты обычно выполнялись в течение 2–3 дней [Атлас, 2010] при разных гидрометеорологических условиях. Изменчивость солености воды в Севастопольской бухте существенная, под действием ветра ее распределение может измениться за несколько часов [Репетин и др. 2003]. Поэтому схемы распределения абиотических компонентов в устье р. Черной, представленные во многих работах, не всегда отражали реальную картину изменчивости основных гидрохимических характеристик в зависимости от речного стока.

Устье реки – промежуточное звено между речной и морской экосистемами, в котором при адвекции и смешении разнородных вод накапливаются и трансформируются органические, биогенные, загрязняющие вещества и микроэлементы [Малахова и др., 2020]. Здесь формируется специфическая экосистема, биологическая составляющая которой адаптируется к быстрой смене гидрологических условий водной среды.

Соленость воды лимитирует выживаемость гидробионтов разной степени толерантности к изменениям минерализации воды, что повышает риск заморных явлений и появления сероводорода в придонном слое воды [Хлебович, 1974; Ястреб, Хмара, 2007; Миньковская, 2015].

Отмеченные ранее [Наривончик и др., 2022] положительные тенденции солености воды устьевого взморья р. Черной и неизменность минерализации речной воды способствуют увеличению контрастности смешивающихся вод. Чем больше сток воды, тем меньше её минерализация [Миньковская, 2020]. Вынос пресноводных гидробионтов при паводках в осолоненную Севастопольскую бухту может привести к их гибели и вызвать негативные экологические последствия для экосистемы устья. Особенно уязвима экосистема восточной части Севастопольской бухты, в наибольшей степени подверженная влиянию речного стока [Орехова, Медведев, Овсяный, 2018] и характеризующаяся средним уровнем трофности [Слепчук, Совга, 2018]. В низовье р. Черной минерализация воды и содержание биогенных веществ увеличиваются из-за сброса сточных вод [Овсяный и др., 2007], что усиливает фактор эвтрофирования Севастопольской бухты.

Приток речных и сточных вод в Севастопольскую бухту (рисунок 1) во время паводков и ливней способствует формированию вертикального градиента плотности (солёности и температуры) воды, что затрудняет поступление кислорода в придонный слой, способствует возникновению гипоксии и приводит к резкому изменению биотической составляющей экосистемы, зачастую негативному [Орехова, Коновалов, 2018].

В работе [Tikhonova et al., 2022] показана важная роль повышенного стока р. Черной в формировании качества воды и донных отложений устьевого взморья реки «по гидрофизическим, гидрохимическим и микробиологическим показателям» в зоне фронтального раздела. Анализ распределения нефтяных углеводородов показал, что речная вода оказывает очищающий эффект на водную среду Севастопольской бухты и выносит в нее органические вещества, влияющие на содержание бактериобентоса.

Во время значительных паводков, количество пресной воды, поступающей в Севастопольскую бухту, сопоставимо с ее объемом [Репетин и др., 2003]. Неудовлетвори-тельное экологическое состояние водоохранных зон на водосборе р. Черной – один из основных факторов поступления биогенных и загрязняющих веществ во время осадков. Транзит этих веществ в Севастопольскую бухту приводит к её загрязнению [Овсяный, Орехова, 2018], что снижает отмеченный в ряде работ [Миньковская,

2020; Tikhonova et al., 2022] очищающий эффект речной воды по отношению к содержанию в бухте нефтяных углеводородов и фенолов.

Отдельные зимние паводки исследовались ранее, особенно паводок 04.02.2015 г. [Совга, Хмара, 2020; Наривончик и др., 2022]. Однако в работе [Совга, Хмара, 2020] показан фрагмент распреснения восточной части устьевого взморья, а в работе [Наривончик и др., 2022] приводится вертикальная изменчивость солености воды вдоль оси Севастопольской бухты, обусловленная стоком реки около 5 $м^3/с$.

В работе [Иванов и др., 2003] с использованием численной квазиизопикнической многослойной модели воспроизведена термохалинная структура воды Севастопольской бухты и показано, что при увеличении стока р. Чёрной от 1 до 37 $м^3/с$ поверхностный слой воды Севастопольской бухты распресняется до 14,4–17,9 ‰ и увеличивается вынос распреснён-ной воды в прилегающую часть моря. Динамика распределения солености воды под действием стока р. Черной и ветра показана в статье [Михайлова, Шапиро, 2005]. С помощью трехмерной нелинейной термогидродинамической модели рассчитано, что при изменении стока реки в пределах 1–1,5 $м^3/с$, при сгонном ветре, слой воды 5–10 м в западной части бухты распреснялся до 17–17,2 ‰, уровень воды при этом изменялся за 6 часов на 7–9 см (а его изменение на 1 см вызывало изменение расхода воды в проливе, соединяющем бухту с морем, на 4 $м^3/с$).

Один из основных факторов риска наводнений (наряду с климатическими вариациями погодных условий) – бессистемная застройка, которая активизировалась с 1990-х гг. [Данилов-Данильян и др., 2022]. Выполненная без научного обоснования (иногда путем самозахвата территорий водоохранных зон и прибрежных полос) застройка затапливаемых пойм, сооружение преград для прохождения речного потока в паводок, износ гидротехнических сооружений, заиление русел, их недостаточная расчистка и дноуглубление способствуют возникновению наводнений даже тогда, когда их могло бы и не быть.

Материалы и методы

Регулярные наблюдения за соленостью поверхностного слоя воды Севастопольской бухты на морской гидрометеорологической станции Севастополь прекращены в 1986 г. [Гидрометеорологические условия морей, 2012]. Анализ средних многолетних и аномальных распределений солености воды на устьевом взморье р. Черной выполнялся по данным экспедиционных наблюдений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» (МГИ РАН) за период 1998–2024 гг. и Севастопольского отделения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (СО ГОИН) с 1991 по 1997 гг. Соленость воды при этом измерялась гидрометрическими зондами ГАП-АК-12Р и ГАП-К-12Р и определялась по электропроводности, а также по хлорности воды аргентометрическим методом. Погрешность определения зависела от солености и температуры воды и составляла ±0,04–1,9 ‰. Всего рассмотрено 137 океанографических съемок.

Сеть станций многолетнего мониторинга МГИ РАН показана на рисунке 1. Однородность рядов наблюдений указанных организаций за соленостью воды, определяемой разными методами (с точностью 0,5–1,0 ‰), была установлена ранее в работе [Наривончик и др., 2022], что позволило объединить данные наблюдений в единый ряд. По съемкам (рисунок 1), выполненным МГИ РАН в Севастопольской бухте в течение 1–3 дней, не всегда можно было построить реальное распределение солености воды в ее акватории из-за существенной изменчивости гидрометеорологических характеристик под действием ветра и волнения.

Периоды осреднения выбраны с учётом изменчивости гидрометеорологических факторов формирования состояния устья. Рассматривалось два временных интервала, каждый из которых включал 14-летний цикл (по два семилетних периода в каждом), с характерными особенностями изменчивости солености воды, температуры воздуха, стока р. Черной и осадков [Наривончик и др., 2022]. В первом периоде (1996–2009 гг.) соленость воды устьевого взморья значимых тенденций не имела, а во втором

периоде (2010–2023 гг.) тенденции были значимыми (в среднем по станциям 0,04 ‰/год). При этом сток воды и слой осадков в обоих рассматриваемых периодах значимых тенденций не имели [Наривончик и др., 2022].

Повторяемость опреснения поверхностного слоя устьевого взморья определялась с использованием квантильного анализа. Критерием опреснения Севастопольской бухты считалось распреснение её западной части до солености 17,6 ‰ и ниже, т.е. на 40 и более % больше стандартной ошибки среднего значения и на 0,6 ‰ меньше средней многолетней солености воды (более 2-х её СКО) прилегающей части Черного моря [Гидрометеорологические условия, 2012].

Данные о расходе воды р. Черной на г/п Хмельницкое за прошлые годы взяты из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов[5]. Средняя ошибка определения расхода воды около 6 %. Гидрологический пост в с. Хмельницкое действует с 01.06.1941, расположен в 11 км от устья, площадь водосбора 342 км^2. Регулярные измерения расхода воды в вершине устья не производятся, хотя объем воды, поступающий на устьевое взморье, меньше чем на г/п Хмельницкое из-за водозабора для водоснабжения региона. Сток р. Черной зарегулирован Чернореченским водохранилищем с 1956 г.

Рассматривался случай паводка природно-антропогенного происхождения, произошедший в январе 2024 г. в результате ливневых осадков, переполнения Чернореченского водохранилища и аварийных сбросов воды в его нижний бьеф. Препятствием для свободного пропуска паводка на устьевое взморье р. Черной (включающее «Инкерманский лиман» и Севастопольскую бухту) было искусственное сооружение в районе вершины устья реки, пропускная способность которого была рассчитана на меженный режим стока (рисунок 2). Позже насыпь (рисунок 2) была поднята на 1,5–2,0 м, что и явилось причиной подпора сброшенной из Чернореченского водохранилища воды и затопления долины реки выше преграды (рисунок 3).



Рисунок 2. Дамба в районе вершины устья р. Черной в межень
Figure 2. A dam near the top of the mouth of the Chernaya River during low-water period

19.01.2024 и 22.01.2024 было выполнено рекогносцировочное обследование территории для выбора гидрометрического створа и сделаны измерения расхода воды р. Черной (19.01.2024 – измерителем скорости течения, а 22.01.2024 – поплавками). Также расход воды измерялся вертушкой 23.01.2024, в этот же день было отобрано 28 проб на соленость воды устьевого взморья по схеме станций, представленной на рисунке 4.

[5] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов. [Электронный ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505 (дата обращения: 11.09.2024).



Рисунок 3. Затопление поймы р. Черной 19.01.2024
Figure 3. Flooding of the floodplain of the Chernaya River on January 19, 2024

Соленость воды 24.01.2024 определялась рефрактометром RHS-10/ATC в 28 точках (рисунок 1), диапазон измерения солености 0–100 ‰, точность ±1 ‰. Пробы термостатировались до 20 °С, соленость принималась равной среднему арифметическому значению из трёх определений.

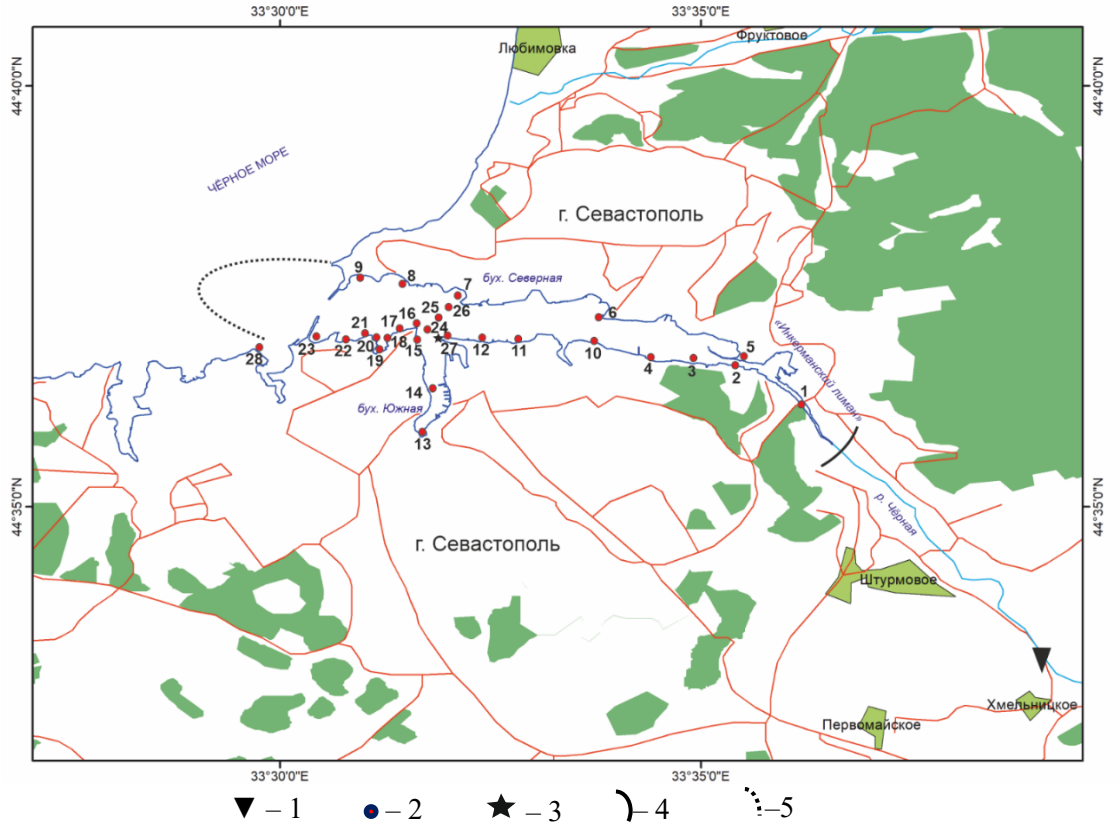


Рисунок 4. Схема расположения пунктов наблюдений в устье р. Черной 24.01.2024:
1 – гидрологический пост Росгидромета (с. Хмельницкое); 2 – точки отбора проб на соленость; 3 – метеорологическая станция Павловский мыс (МГ-II Севастополь); 3 – верхняя граница морского устья р. Черной; 4 – граница распреснения

Figure 4. The layout of the observation points at the mouth of the Chernaya River on January 24, 2024:
1 – hydrological post of Roshydromet (Khmelnitskoye village); 2 – salinity sampling points; 3 – Pavlovsky Cape meteorological station (MG-II Sevastopol); 4 – upper boundary of the sea mouth of the Chernaya River; 5 – desalination boundary

Расход воды рассчитывался методом «скорость–площадь» [Лучшева, 1983] ориентировочно. Правильность определения расхода воды тестировалась по зависимостям его составляющих от уровня воды [РПВ, 1966; Лучшева, 1983]. Для определения скорости течения использовался измеритель скорости водного потока ИСВП–ГР–21М1 с ИСО-1. Диапазон измерений скорости течения 0,04–5 м/с, средняя погрешность ±4,4 %.

Данные о погодных условиях в период выполнения работ 19–23.01.2024 приведены по материалам наблюдений морской гидрометеостанции Севастополь (МГ-II Севастополь), а за отдельные съемки многолетнего периода по данным[6].

Обсуждение результатов

В современный период (1991–2023 гг.) средний многолетний расход воды р. Черной на г/п Хмельницкое был равен 1,73 м^3/с, срочный расход воды изменялся от 0,053 до 62,4 м^3/с, средний многолетний расход паводков составлял 20,7 м^3/с, а минимальный – 2,28 м^3/с. При отсутствии значимых трендов расхода воды р. Черной в рассматриваемые периоды (1991–2023, 1996–2009, 2010–2023 гг.), средний расход воды в 1996–2009 гг. был равен 2,18 м^3/с, а в период 2010–2023 гг. – 1,52 м^3/с.

Среднее многолетнее распределение солености воды за 1991–2020 гг. представленное в [Наривончик и др., 2022], аналогично распределению солености воды в 1991–2023 гг. Однако анализ изменчивости солености поверхностного слоя воды по отдельным периодам показал, что в 1996–2009 гг. значимых тенденций не отмечалось, а в 2010–2023 гг. соленость воды на станциях (рисунок 1) начала увеличиваться на 0,03–0,05 ‰ в год. Это обусловлено увеличением температуры воздуха (испарением), солености воды северо-западной части Черного моря [Наривончик и др., 2022] и изменением объемов речного стока, поступавшего в разные периоды на устьевое взморье реки. С учетом указанных различий средние многолетние распределения солености поверхностного слоя воды построены за два последних периода (рисунок 5).

Как видно из рисунка 5а, в первый период устьевое взморье было распреснено до 17,6 ‰, изогалина 18 ‰ располагалась за пределами Севастопольской бухты, а в 2010–2023 гг. она продвинулась в центральную часть бухты (рисунок 5б). Это свидетельствует о прогрессирующем в последние годы осолонении устьевого взморья р. Черной [Наривончик и др., 2022]. При этом, соленость воды устьевого участка реки, «Инкерманского лимана» и канала «Река Черная» изменялась несущественно.

Распресняющее влияние стока р. Черной трудно дифференцировать от влияния пресной воды, поступающей при смыве во время ливней с урбанизированной городской территории непосредственно в бухту, так как основной причиной паводков являются дождевые осадки, охватывающие значительные территории.

Исследование влияния наиболее значительных паводков на устьевое взморье р. Черной выполнялось с 1998 по 2024 гг. (рисунки 6, 7). В этот период в бассейне р. Черной паводки формировались преимущественно осенью и зимой, когда похолодания прерывались оттепелями или продолжительные жидкие осадки в области питания стока выпадали на мерзлую почву, что вызывало существенный приток воды в речную систему. Лишь иногда паводки отмечались летом. Осенью и зимой Чернореченское водохранилище подготавливают к приему половодья и паводков, и сбросы в нижний бьеф увеличиваются. К ним присоединяется боковая приточность, которая, при ливнях, в сумме сопоставима с попусками, а иногда и превышает их. Обычно это не приводило к существенному затоплению территории.

Ранее, до строительства прудов и Чернореченского водохранилища в бассейне реки, ковша Инкерманского порта и канала «Река Черная», Инкерманская долина в устьевой части реки затапливалась при паводках на 0,7–1,0 км, в устье реки существовали плавни и заболоченные земли [Миньковская, Демидов, 2016]. Противопаводковая емкость Чернореченского

[6] Архив погоды [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Севастополе (дата обращения: 18.09.2024)

водохранилищ, при правильной эксплуатации его гидротехнического комплекса, позволяет трансформировать паводок редкой повторяемости без негативных последствий. Однако для этого надо иметь надежный прогноз паводочного стока достаточно большой заблаговременности, что пока не всегда возможно.

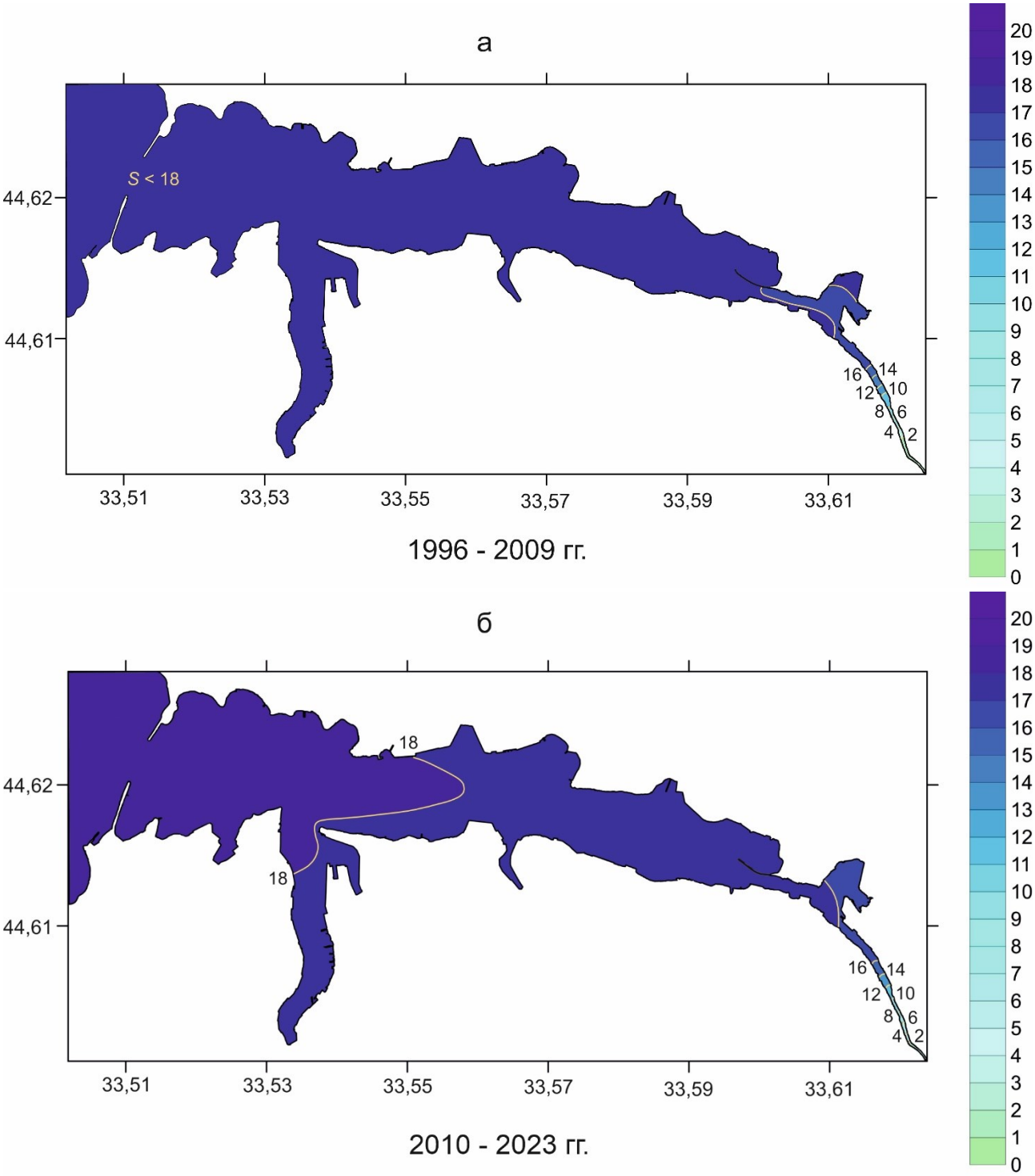


Рисунок 5. Среднее многолетнее распределение солености поверхностного слоя воды устьевого взморья р. Черной в 1996–2009 гг. (а) и в 2010–2023 гг. (б)

Figure 5. The average long-term salinity distribution of the surface water layer at the estuary of the Chernaya River in 1996–2009 (a) and in 2010–2023 (b)

Поскольку для устьев рек водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы устанавливаются такими же, как и для рек (100 и 50 м соответственно)[7], естественно затапливаемая пойма р. Черной (шириною около 1 км) застроена. Это обстоятельство делает ее уязвимой при форс-мажорных обстоятельствах, которые не исключены при недостаточной подготовке емкости водохранилища к приему паводка, ее переполнении и необходимости аварийных сбросов. В этих случаях может отмечаться затопление территорий и ущербы.

В последние 30 лет, повторяемость распреснения всей Севастопольской бухты, зафиксированного при выполнении океанографических съёмок, составила 25 %, а ее восточной части – 50 %. На р. Черной у с. Хмельницкое в 28 % случаев наблюдались существенные паводки (30 и более м^3/с), превышающие их среднее многолетнее значение. Однако сведений о масштабном затоплении Инкерманской долины до 2024 г. не обнаружено. В отдельные годы отмечались локальные затопления в районе вдольбереговой трассы (июль 2015 г.), но чаще наблюдались затопления и подтопления, вызванные ливневыми осадками, а не паводком. Например, 17.07.2018 и 18.06.2021 расход воды составил 36,4 м^3/с, однако сведений о затоплении низовья р. Черной не обнаружено.

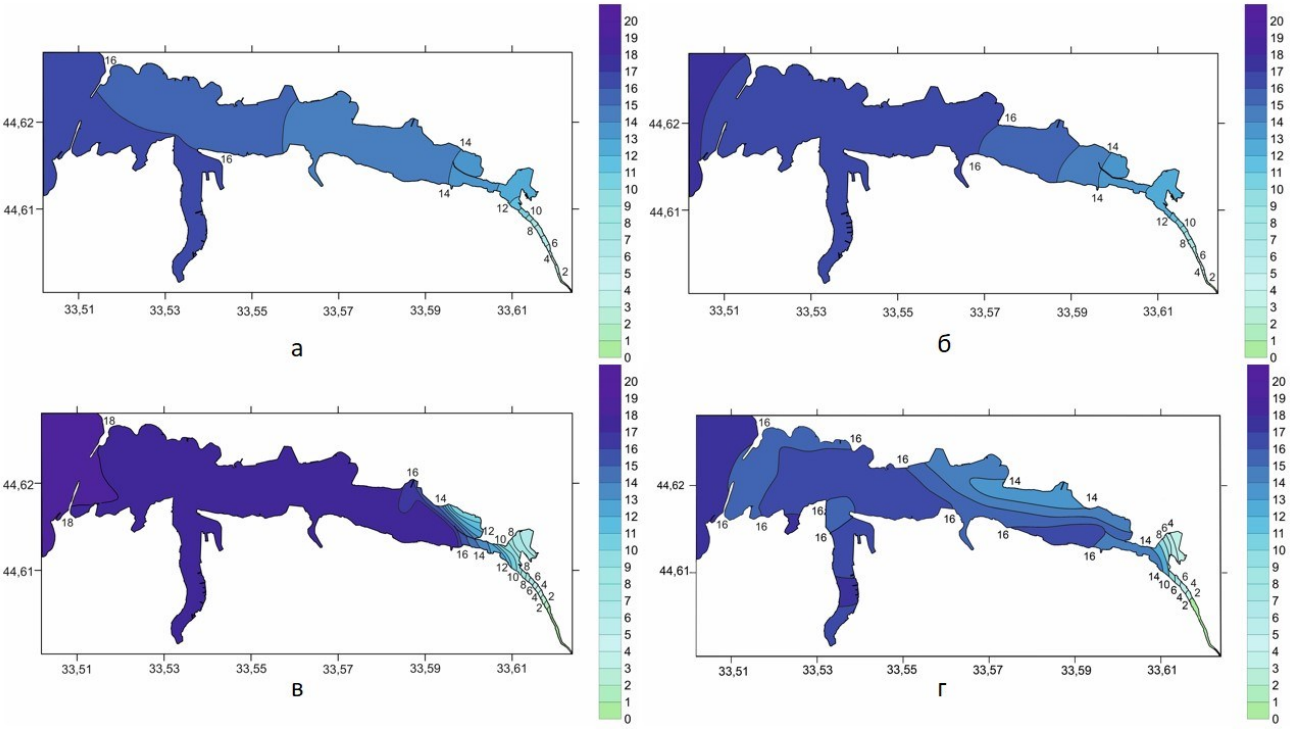


Рисунок 6. Влияние паводков р. Черной на устьевое взморье в 1998–2022 гг.:
а) 10.06.1998; б) 20.01.2003; в) 02–04.02.2015; г) 10–11.02.2022
Figure 6. Impact of the Chernaya River floods on the estuary coast in 1998–2022.:
a) June 10, 1998; b) January 20, 2003; c) February 2–4, 2015; d) February 10–11, 2022

В последний период (2010–2023 гг.), по сравнению с предыдущим, регулирование стока р. Черной изменилось, что, возможно, связано с возрастающими потребностями в воде г. Севастополя из-за роста населения, наметившееся с 2014 г. [Миньковская, 2020; Наривончик и др., 2022], необходимостью резервирования стока в Чернореченском водохранилище в многоводные годы и лимитирования водопотребления в периоды дефицита водных ресурсов.

Анализ влияния паводков на устьевое взморье в разные годы (рисунок 6) показал, что при

[7] Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/?ysclid=m0xxeo2cir80640000 (дата обращения: 11.09.2024).

прочих равных условиях (слабоветрии и отсутствии осадков на поверхность Севастопольской бухты), чем больше сток р. Черной, тем больше зона распреснения устьевого взморья. Этот вывод согласуется с результатами моделирования влияния речного стока на бухту [Иванов и др., 2003].

В июне 1998 г. распреснение устьевого взморья было сформировано существенными попусками из Чернореченского водохранилища (в пределах 17,8–61,5 м^3/с), отмечавшимися с октября 1997 г. по июнь 1998 г., продолжительным половодьем и ливневыми осадками в начале июня 1998 г. В период съемки (рисунок 6а) расход воды р. Черной составлял 10–17 м^3/с.

Зимняя оттепель и осадки вызвали паводок в январе 2003 г., и сбросы в нижний бьеф водохранилища обусловили средний суточный расход воды р. Черной на г/п Хмельницкое 2–5 м^3/с. В результате площадь распреснения Севастопольской бухты уменьшилась примерно в 2 раза (рисунок 6б).

02–04.02.2015 расход воды р. Черной тоже составлял 2–5 м^3/с, но при этом отмечался южный и юго-западный ветер 4 м/с. Поэтому, несмотря на близкий по значениям сток реки, область распреснения сместилась в северную часть бухты и была несколько меньше, чем в предыдущем случае (рисунки 6б и 6в).

Значительное распреснение акватории устьевого взморья отмечалось в период съемки 10–11.02.2022 при расходе воды на г/п Хмельницкое 10–15 м^3/с, юго-западном и южном ветре (3 м/с). Чернореченское водохранилище к началу сбросов было наполнено, выпавшие осадки и потепление привели к дополнительному притоку в него талой и дождевой воды, что вызвало аварийный сброс её излишков в нижний бьеф и техногенный паводок, усиленный боковой приточностью ниже гидроузла водохранилища.

Представленные на рисунке 6 распределения солености поверхностного слоя воды отражают степень влияния природно-антропогенных паводков на устьевое взморье р. Черной в зависимости от расхода воды на г/п Хмельницкое (рисунок 1). При этом все рассмотренные паводки в период съемок не достигали среднего многолетнего значения (20,7 м^3/с).

Особый случай наблюдался в январе 2024 г. (рисунок 7). По данным Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»[8] паводку предшествовало выпадение жидких осадков (74 мм) в области питания реки поверх слоя снежного покрова толщиной 17 см. В результате потепления тало-дождевой сток сформировал паводок в верховьях р. Черной, с пиком 19.01.2024. При этом уровень воды выше Чернореченского водохранилища поднялся всего на 70 см, а на г/п Хмельницкое отмечался резкий подъем уровня воды на 168 см. Одновременно наблюдались паводки на притоках р. Черной ниже гидроузла (Сухой речке, Байдарке, Ай-Тодорке), сбросы из переполненных прудов, сточных вод и смыв с берега.

Поскольку в 2010–2023 гг. чаще отмечался сток р. Черной ниже нормы, к приему паводка подготовка емкости водохранилища, заполненного уже в декабре 2023 г. на 93 %, зимой 2024 г. была недостаточной. По данным государственного унитарного предприятия города Севастополя «Водоканал» объем водохранилища перед паводком составлял 98 %, а 21–23.01.2024 он увеличился до 102–103 %, хотя для безопасной работы этого водохранилища, в соответствии с [Волосухин, 2019], его объем перед паводком должен был составлять около 70 %. Аварийные сбросы и искусственное сооружение, уменьшившее пропускную способность русла в нижнем бьефе (рисунок 2), были основной причиной повышенного стока в низовье реки и затопления поймы (рисунок 3), что принесло существенный ущерб экономике региона.

В период экспедиционных исследований 19–23.01.2024, выполненных МГИ РАН и СО ГОИН на спаде паводка, впервые удалось получить картину распреснения поверхностного слоя воды устьевого взморья в результате влияния речного стока, превышающего его среднее

[8] ForPost новости Севастополя [Электронный ресурс]. URL: https://sevastopol.su/news/krymskiy-gidrolog-nazvala-vnyatnye-prichiny-nebyvalogo-navodneniya-v-sevastopole# (дата обращения: 11.09.2024).

многолетнее значение на г/п Хмельницкое в 10–20 раз (рисунок 7). При этом 23.01.2024 преобладал восточный ветер (1–2 м/с), без осадков, температура воздуха изменялась в пределах -2,3–3,0 °С.

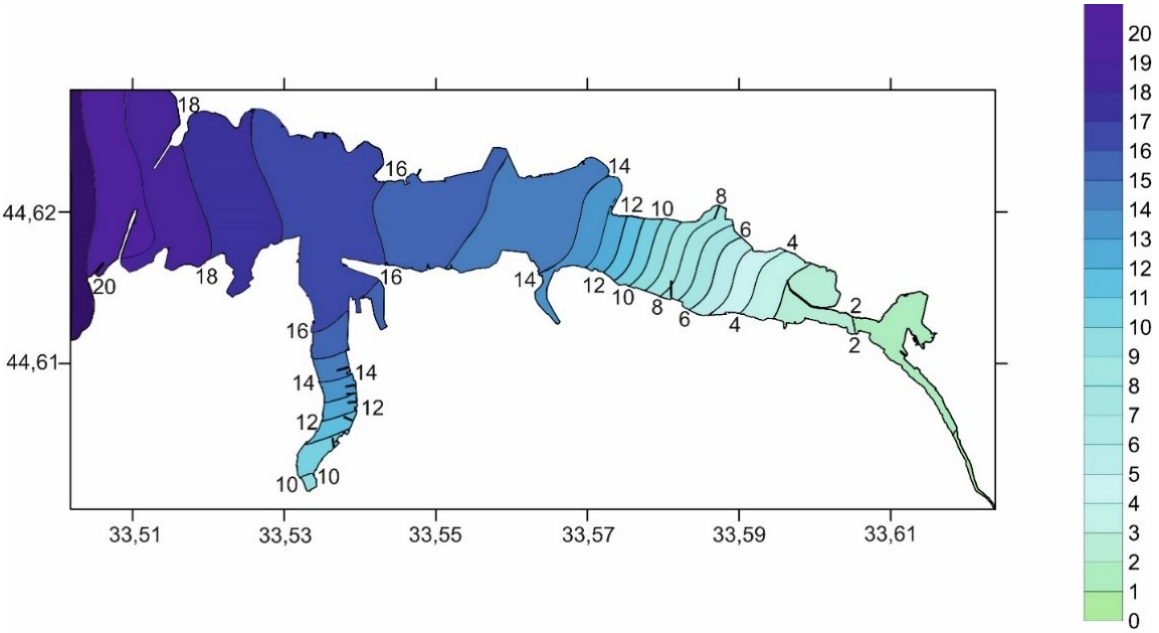


Рисунок 7. Распределение солености поверхностного слоя воды устьевого взморья р. Черной 23.01.2024

Figure 7. Distribution of the water salinity in the surface layer of the estuarine coast of the Chernaya River on January 23, 2024

Расход воды 19–23.01.2024 уменьшался с 36 до 22 м^3/с. Его распресняющее влияние было существенным: устьевой участок реки и «Инкерманский лиман» (рисунок 1) были заполнены водой, соленостью 1–2 ‰, восточная часть Севастопольской бухты опреснилась до 10 ‰, а в ее западную часть из моря поступала вода соленостью 18 ‰. Сточными и подземными водами также была распреснена бухта Южная (рисунок 7).

Выводы

Природно-техногенные паводки на р. Черной представляют опасность для экономики Севастопольского региона, но остаются недостаточно изученными. Впервые за последние 30 лет исследовано влияние аварийных сбросов из Чернореченского водохранилища на устьевое взморье реки зимой 2024 г.

Средний расход воды в вершину устья р. Черной в период паводка 19–23.01.2024 составлял 28 м^3/с, максимальный достигал 36 м^3/с, при этом средний многолетний расход воды на г/п Хмельницкое за 1991–2023 гг. был равен 1,73 м^3/с. За 5 дней в Севастопольскую бухту в среднем поступало около 12 млн м^3 воды, что составило 19 % от объема Чернореченского водохранилища и 15 % от объема Севастопольской бухты.

В результате паводка в январе 2024 г. кутовая часть Севастопольской бухты распреснилась до 3 ‰, при среднем значении солености поверхностного слоя воды в этом районе 17,4 ‰, зона опреснения занимала 80 % устьевого взморья, горизонтальные градиенты солености воды достигали 2–6 ‰ на км, а из прилегающей части моря в бухту поступала вода соленостью 20 ‰.

В условиях отмечающегося в последние 15 лет осолонения устьевого взморья р. Черной при значительных паводках различного генезиса контрастность смешивающихся в Севастопольской бухте разнородных вод возрастает, что увеличивает степень экологической опасности в устьевом регионе.

Литература

Атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты. / Под. ред. Иванова В.А. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 320 с. ISBN: 978-966-02-5666-8.

Волосухин Я.В. Безопасность комплекса гидротехнических сооружений Чернореченского водохранилища в г. Севастополе // Строительство и архитектура. 2019. Т. 7. № 3. С. 13–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-3-13-18.

Гидрометеорологические условия морей Украины в 2 т. Том 2: Черное море / Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. 421 с.

Данилов-Данильян В.И., Козлова М.А., Полянин В.О., Чеснокова И.В. Научное обеспечение водной безопасности Крыма: проблемы и решения // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 363–371. DOI: 10.31857/S0321059622040022.

Дегтерев А.Х. Заполняемость водохранилищ Крыма в период перекрытия Северо-Крымского канала. Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2022. 70 с. ISBN 978-5-6048340-7-7.

Ермакова Г.С., Горелиц О.В., Жбаков К.К., Землянов И.В., Милютина И.Ю. Экстремальные паводки на реках Крыма в 2021 году // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 460–473. DOI: 10.31857/S0321059622040046.

Ефимов В.В., Анисимов А.Е., Комаровская О.И. Характеристики экстремальных атмосферных осадков в Крыму // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 6–18. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-6-18.

Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Репетин Л.Н., Шапиро Н.Б. Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997–1999 годах // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 4. С. 15–35.

Куфтаркова Е.А., Губанов В.И., Ковригина Н.П., Еремин И.Ю., Сеничева М.И. Экологическая

References

Atlas okeanograficheskikh kharakteristik Sevastopolskoy bukhty [Atlas of oceanographic characteristics of Sevastopol Bay]. Ed. V.A Ivanov. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2010. 320 p. ISBN: 978-966-02-5666-8. (In Russian).

Danilov-Danilyan V.I., Kozlova M.A., Polyanin V.O., Chesnokova I.V. The scientific basis of water safety of crimea: problems and solutions. Water resources, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 525–532. DOI: 10.1134/S0097807822040029.

Degterev A.KH. *Zapolnyayemost vodokhranilishch Kryma v period perekrytiya Severo-Krymskogo kanala. [The occupancy rate of Crimean reservoirs during the closure of the North Crimean Canal]*. Sevastopol, Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya "Sevastopolskiy gosudarstvennyy universitet" Publ., 2022. 70 p. ISBN 978-5-6048340-7-7. (In Russian).

Efimov V.V., Anisimov A.E., Komarovskaya O.I. Kharakteristiki ekstremalnykh atmosfernykh osadkov v Krymu [Characteristics of extreme precipitation in crimea]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea],* 2022, no. 2, pp. 6–18. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-6-18. (In Russian; abstract in English).

Ermakova G.S., Gorelits O.V., Zhbakov K.K., Zemlyanov I.V., Milyutina I.Yu. Extreme floods in Crimean rivers in 2021. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 616–629. DOI: 10.1134/S0097807822040042.

Ilyin Y.P., Repetin L.N., Belokopytov V.N., Goryachkin Y.N., Dyakov N.N., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. *Gidrometeorologicheskie usloviya morei Ukrainy v 2 tomakh. Tom 2: Chernoe more [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine in 2 volumes. Volume 2: Black Sea]*. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2012. 421 p. (In Russian).

Ivanov V.A., Mikhailova E.N., Repetin L.N., Shapiro N.B. A model of the sevastopol'skaya bay. Reproduction of the vertical structure of temperature and salinity fields in 1997-1999. *Physical Oceanography*, 2003, vol. 13, no. 4, pp. 201–222.

оценка современного состояния вод в районе взаимодействия Севастопольской бухты с прилегающей частью моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 1. С. 72–91.

Лучшева А.А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 424 с.

Малахова Л.В., Проскурнин В.Ю., Егоров В.Н., Чужикова-Проскурнина О.Д., Бобко Н.И. Микроэлементы в воде реки Черной и оценка их поступления с речным потоком в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря. 2020. № 3. С. 77–94. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-3-77-94.

Миньковская Р.Я. Районирование морских устьев рек по изменчивости солёности воды // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 76–88.

Миньковская Р.Я., Демидов А.Н. Эволюция морского устья реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 1. С. 82–89.

Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Чёрного моря). Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ РАН, 2020. 364 с. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9.

Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 2. С. 60–76.

Мырза Е.Л. Овчарук В.А. Анализ условий формирования паводков холодного периода на реках Крымских гор // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С.740–745.

Наривончик С.В. Миньковская Р.Я. Дьяков Н.Н. Мальченко Ю.А. Щербаченко С.В. Изменчивость солёности воды устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) в современный климатический период // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 4. С. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.

Овсяный Е.И., Артеменко В.М., Романов А.С., Орехова Н.А. Сток реки Черной как фактор

Khlebovich V.V. *Kriticheskaya solenost biologicheskikh protsessov [Critical salinity of biological processes]*. Leningrad, the Science Publ., 1974. 231 p. (In Russian).

Kuftarkova E.A., Gubanov V.I., Kovrigina N.P., Eremin I.Y., Senicheva M.I. Ekologicheskaya otsenka sovremennogo sostoyaniya vod v rayone vzaimodeystviya Sevastopolskoy bukhty s prilegayushchey chastyu morya [Ecological assessment of the current state of waters in the area of interaction of Sevastopol Bay with the adjacent part of the sea]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal [Marine Environmental Journal]*, 2006, vol. 5. no. 1, pp. 72–91. (In Russian).

Luchsheva A.A. *Prakticheskaya gidrometriya [Practical hydrometry]*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1983. 424 p. (In Russian).

Malakhova L.V., Proskurnin V.Yu., Egorov V.N., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Bobko N.I. Mikroelementy v vode reki Chernoy i otsenka ikh postupleniya s rechnym potokom v Sevastopolskuyu bukhtu v zimniy sezon 2020 goda [Trace elements in the chernaya river water and evaluation of their income with the riverine inflow into the sevastopol bay in winter 2020]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnykh i shelfovykh zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 2020, no. 3, pp. 77–94. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-3-77-94. (In Russian; abstract in English).

Mikhailova É.N., Shapiro N.B. Simulation of the circulation and space structure of thermohaline fields in the sevastopol bay with regard for the actual external data (winter, 1997). *Physical Oceanography*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 118–132. DOI: 10.1007/s11110-005-0035-0.

Minkovskaya R.Ya. Rayonirovaniye morskikh ustyev rek po izmenchivosti solenosti vody [Zoning of sea estuaries by variability of salinity of water]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology],* 2015, no. 9, pp. 76–88. (In Russian).

Minkovskaya R.Ya., Demidov A.N. Evolyutsiya morskogo ustya reki Chernoy (Sevastopolskiy region) [Evolution of marine mouth of the Chernaya river (Sevastopol region)]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea],* 2016, no 1, pp. 82–89. (In Russian).

формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. №. 15. С. 57–65.

Овсяный Е.И., Орехова Н.А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 1. С. 82–94. DOI:10/22449/0233-7584-2018-1-82-94.

Овчарук В.А., Тодорова Е.И. Статистические параметры максимальных расходов воды и слоев паводочного стока для рек горного Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 766–770.

Орехова Н.А., Коновалов С.К. Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 739–750. DOI: 10.1134/S0030157418050106.

Орехова Н.А., Медведев Е.В., Овсяный Е.И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91.

Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В., Романов А.С., Овсяный Е.И. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 2. С. 66–80.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Т.6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Крым / Под ред. М.М. Айзенберга, М.С. Каганера. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 344 с.

Слепчук К.А., Совга Е.Е. Уровень эвтрофирования восточного района Севастопольской бухты по результатам численного моделирования индекса E-TRIX // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 53–59. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-2-53-59.

Совга Е.Е., Хмара Т.В. Влияние стока реки Черной в период паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской

Minkovskaya R.Ya. *Kompleksnyye issledovaniya raznotipnykh morskikh ustyev rek (na primere morskikh ustyev rek severo-zapadnoy chasti Chernogo morya) [Comprehensive studies of different types of river mouths (on the example of the river mouths in the north-western part of the Black Sea)]*. Sevastopol, Publ. of Marine Hydrophysical Institute, 2020. 364 p. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9. (In Russian; abstract in English).

Myrza E.L. Ovcharuk V.A. Analiz usloviy formirovaniya pavodkov kholodnogo perioda na rekakh Krymskikh gor [Analysis of conditions for the formation of cold period floods on the rivers of the Crimean Mountains]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]*, 2014, vol. 10, no. 1, pp.740–745. (In Russian).

Narivonchik S.V., Minkovskaya R.Ya., Dyakov N.N., Malchenko Yu.A., Shcherbachenko S.V. Izmenchivost solenosti vody ustyevogo vzmorya reki Chernoy (Sevastopolskiy region) v sovremennyy klimaticheskiy period [Variability of the water salinity at the estuary of the chernaya river (sevastopol region) in the modern climatic period]. *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena],* 2022, vol. 4, no. 4, pp. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359. (In Russian; abstract in English).

Orekhova N.A., Konovalov S.K. Oxygen and sulfides in bottom sediments of the coastal sevastopol region of crimea. *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 679–688. DOI: 10.1134/S0001437018050107.

Orekhova N.A., Medvedev E.V., Ovsyany E.I. Vliyaniye vod reki Chernoy na gidrokhimicheskiy rezhim Sevastopolskoy bukhty (Chernoye more) [The influence of the waters of the Chernaya River on the hydrochemical regime of the Sevastopol Bay (Black Sea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 2018, no. 3, pp. 84–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91. (In Russian).

Ovcharuk V.A., Todorova E.I. Statisticheskiye parametry maksimalnykh raskhodov vody i sloyev pavodochnogo stoka dlya rek gornogo Kryma [Statistical parameters of maximum water flow and flood runoff layers for the rivers of the mountainous Crimea]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*

гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 1. С. 31–40. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-1-31-40.

Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 231 с.

Ястреб В.П., Хмара Т.В. Соленость вод как условие существования экосистем открытых лиманов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. № 15. С. 347–358.

Ecological State of the Water Area in the Fresh Water - Saline Water Mixing Zone in Spring (the River Chernaya Estuary - Sevastopol Bay, Black Sea) / Tikhonova E, Burdiyan N., Soloveva O., Mironov O., Guseva E., Kotelyanets E., Gurov K. // Pollution. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 693–703. DOI: 10.22059/POLL.2022.334733.1271.

[Geopolitics and ecogeodynamics of regions], 2014. vol. 10, no. 1, pp. 766–770.

Ovsyany E.I., Artemenko V.M., Romanov A.S., Orekhova N.A. Stok reki Chernoy kak faktor formirovaniya vodno-solevogo rezhima i ekologicheskogo sostoyaniya Sevastopolskoy bukhty [The flow of the Chernaya River as a factor in the formation of the water-salt regime and the ecological state of the Sevastopol Bay]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoye ispolzovaniye resursov shelfa [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]* 2007. no. 15, pp. 57–65. (In Russian).

Ovsyany E.I., Orekhova N.A. Hydrochemical regime of the river chernaya (Crimea): environmental aspects. *Physical Oceanography*, 2018. vol. 25, no. 1, pp. 77–89. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-1-77-88.

Repetin L.N., Gordina A.D., Pavlova E.V., Romanov A.S., Ovsyany E.I. Vliyaniye okeanograficheskikh faktorov na ekologicheskoye sostoyaniye Sevastopolskoy bukhty (Chernoye more) [The influence of oceanographic factors on the ecological state of Sevastopol Bay (Black Sea)]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Marine Hydrophysical Journal]*, 2003, no. 2, pp. 66–80.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 t. T.6. Ukraina i Moldaviya. Vyp. 1. Krym [Surface water resources of the USSR: in 20 vol. Vol.6. Ukraine and Moldova. Issue 1. Crimea]. Ed. M.M. Ayzenberga, M.S. Kaganera. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1966. 344 p. (In Russian).

Slepchuk K.A., Sovga YE.E. Uroven evtrofirovaniya vostochnogo rayona Sevastopolskoy bukhty po rezultatam chislennogo modelirovaniya indeksa E-TRIX [Eutrophication level of the eastern part of the sevastopol bay on the basis of numerical modeling of e-trix index]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea],* 2018, no. 2, pp. 53–59. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-2-53-59. (In Russian).

Sovga E.E., Khmara T.V. Influence of the Chernaya river runoff during high and low water on the ecological state of the apex of the sevastopol bay water area. *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 28–36. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-1-28-36.

Tikhonova E, Burdiyan N., Soloveva O., Mironov O., Guseva E., Kotelyanets E., Gurov K. Ecological State of the Water Area in the Fresh Water - Saline Water Mixing Zone in Spring (the River Chernaya Estuary - Sevastopol Bay, Black Sea). *Pollution*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 693–703. DOI: 10.22059/POLL.2022.334733.1271.

Volosukhin Ya.V. Bezopasnost kompleksa gidrotekhnicheskikh sooruzheniy Chernorechenskogo vodokhranilishcha v g. Sevastopole [Safety of complex of hydraulic structures of chernorechenskiy reservoir in Sevastopol]. *Stroitelstvo i arkhitektura [Construction and Architecture],* 2019, vol. 7, no. 3, pp. 13–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-3-13-18. (In Russian).

Yastreb V.P., Khmara T.V. Solenost vod kak usloviye sushchestvovaniya ekosistem otkrytykh limanov [Salinity of waters as a condition for the existence of ecosystems of open estuaries]. *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoye ispolzovaniye resursov shelfa [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources],* 2007, no. 15, pp. 347–358. (In Russian).

УДК 504.06+551.515.9+614.8 DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.157

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРИМЕРЕ РАБОТЫ ГИДРОУЗЛОВ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА

А.Н. Гордиенко, О.И. Рожко, А.И. Петрученко

ФБГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий), г. Москва, Россия

e-mail: an_gordienko@bk.ru

Аннотация. Безопасное ведение народного хозяйства в сфере управления водными ресурсами, сохранение государственного имущества невозможно без своевременного прогнозирования возможных чрезвычайный ситуаций (ЧС) на объектах водного хозяйства, принятия решений, направленных на предотвращение ЧС или минимизацию их последствий. Основной задачей данного исследования является обзор используемых подходов и принципов в привязке к объектам водной инфраструктуры в целях недопущения возникновения ЧС. Данная статья также акцентирует использованные в работе нормативные положения, материалы МЧС России, Росводресурсов и Росгидромета, которые отражают методический опыт, выработанный, в том числе, в ходе прогностической работы при участии МЧС России в работе Межведомственной рабочей группы по регулированию режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада. При этом, Волжско-Камский каскад водохранилищ и гидроэлектростанций избран объектом исследования, поскольку является основным инфраструктурным инженерным стержнем функционирования и устойчивого развития социально-хозяйственного комплекса центра Европейской части России. Итогом работы

ORGANIZATION OF EMERGENCY FORECASTING DURING THE FLOOD PERIOD ON THE EXAMPLE OF A PASS THROUGH THE WATERWORKS OF THE VOLGA-KAMA CASCADE

Aleksey N. Gordienko, Oleg I. Rozhko, Alexandra I. Petruchenko

All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations (Federal Center for Science and High Technologies), Moscow, Russia

e-mail: an_gordienko@bk.ru

Abstract. Safe management of the national economy in the field of water resources management, preservation of state property is impossible without timely forecasting of emergencies at water management facilities, making decisions aimed at preventing emergencies or minimizing their consequences. The main objective of this study is to review the approaches and principles used in relation to water infrastructure facilities in order to prevent the occurrence of emergencies.This article also focuses on the normative provisions used in the work, analytical materials of the EMERCOM of Russia, Rosvodresursy and Roshydromet, which reflect the methodological experience developed, including during the prognostic work with the participation of the EMERCOM of Russia in the work of the Interdepartmental Working Group on regulating the modes of operation of reservoirs of the Volga-Kama cascade. At the same time, the Volga-Kama cascade of reservoirs and hydroelectric power plants has been chosen as the object of research, since it is the main infrastructural engineering core of the functioning and sustainable development of the socio-economic complex of the center of the European part of Russia.

The result of the work is the presentation of a set of basic indicators for assessing a large water body from the perspective of predicting possible emergency situations.

является представление комплекса основных показателей оценки большого водного объекта с позиции прогнозирования возможных чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации; наводнения; Волжско-Камский каскад.

Keywords: emergencies; floods; Volga-Kama cascade.

Введение

Основной задачей данной статьи является представление особенностей оценки и прогнозирования состояния объектов водной инфраструктуры в целях недопущения (предотвращения) возникновения глобальных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Основной ЧС, возникающей в результате нарушения режима работы гидроузла, является комплексная техногенная ЧС в виде наводнения, содержащая в своих характеристиках затопления, вызванные, например, необоснованным сбросом через сооружения гидроузлов расходов воды, превосходящих пропускную способность русла реки [Акимов, 2023].

В России прослеживается тенденция значительного роста ущерба от опасных техногенных явлений гидрологического происхождения. Управление в отрасли предполагает коллегиальную выработку решений. С учётом такой организации межведомственного и экспертного взаимодействия, появилась возможность в данном исследовании использовать материалы прогнозов о рисках возникновения чрезвычайных ситуаций в период весеннего паводка[1], разработанные во Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий) (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)) в соответствии с поручениями Межведомственной рабочей группы по регулированию режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада, аналитические материалы о работе Волжско-Камского каскада (ВКК)[2,3,4], а также иные аналитические материалы и нормативные ведомственные документы.

Перечень ЧС, прогнозирование которых осуществляется в отношении водохозяйственной инфраструктуры, определён набором утверждённых МЧС России критериев информации, квалифицирующей события в природе или техносфере как ЧС в случае их возникновения. Исходя из позиции МЧС России[5] к таковым относятся:

– аварии на водном транспорте (в результате нарушения режима работы, например, гидроузла с возможностью шлюзования);

– высокие уровни воды в результате усугубляющего обстановку половодья; зажора, затора или дождевого паводка;

[1] Прогноз о рисках возникновения чрезвычайных ситуаций в период весеннего паводка с учётом специального пропуска через гидроузлы Волжско-Камского каскада, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), М., 22.03.2023 № 2/23.

[2] Аналитическая справка-прогноз по итогам работы Межведомственной рабочей группы по гидрометеорологической обстановке в Волжско-Камском бассейне и сравнительный анализ маловодных половодий с прогнозируемым половодьем во втором квартале 2020 года, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), М., 26.06.2020 № 2753-13-5.

[3] Аналитическая справка о режимах работы гидроузлов Волжско-Камского каскада с учётом складывающихся погодных условий и водохозяйственной обстановки в период с 11.02.2023 по 17.03.2023 г. и на период с 21.03.2023 по 10.04.2023, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), М., 21.03.2023 № 1/23.

[4] Приказ Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы) от 04.03.2004 № 31 «О Межведомственной оперативной группе по регулированию режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада» (в редакции приказа Росводресурсов от 10.02.2014 № 36 «О Межведомственной рабочей группе по регулированию режимов работы водохранилищ Волжско-Камского каскада» *(в открытых источниках не опубликован).*

[5] Критерии информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, утверждены приказом МЧС России от 05.07.2021 № 429 (зарегистрирован Минюстом России 16.09.2021 за № 65025) // Интернет-портал «Официальное опубликование правовых актов», http://publication.pravo.gov.ru дата опубликования 16.09.2021 за № 0001202109160036, дата обращения 02.05.2024.

Gordienko A. N., Rozhko O. I., Petruchenko A. I. Organization of emergency forecasting during the flood period on the example of a pass through the waterworks of the Volga-Kama cascade. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 157–168. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.157.

– разрушения (обрушения) элементов транспортной и инженерной инфраструктуры (если разрушению подверглись мосты и тоннели – из них попадают под критерии ЧС длинной 500 м и более);

– аварии на системах жизнеобеспечения (объектах тепло- и водоснабжения, электроэнергетики, газораспределения, аварии на очистных сооружениях);

– оползни, обвалы и осыпи на прибрежных участках;

– овражные (плоскостные) и речные эрозии;

– сгонно-нагонные явления;

– критическое снижение уровня воды (низкая межень);

– вызванные последовательно селевые потоки;

– ЧС, последовательно связанные с биологической опасностью;

– комплексные или многоступенчатые ЧС, предысторией или составляющими которых являются названые выше события.

Игнорирование потенциальной опасности приводит к ЧС, которая в свою очередь инспирирует другие опасности, и как правило, не одну. При этом, утверждённые МЧС России критерии информации о ЧС не содержат квалификации некоторых ситуаций (например, для русловой эрозии – захвата и выноса потоком или ветровым волнением частиц грунта, образующего речные отложения, на реках – во время половодий, паводков, селей) и их дезавуирование не относится к задачам федерального уровня государственной системы предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

Прогноз возможных ЧС на объектах водного хозяйства включает в себя несколько комплексных итераций, к которым, в частности, относятся:

1) сбор сведений о гидрокомлексах, находящихся в их составе объектах энергетики или иных составляющих, обуславливающих водный режим;

2) оценка условий и причин формирования паводка, связанного с этим риска нарушения постоянного режима функционирования водного объекта (подтопления, обмеления и др.), и далее – риска возникновения ЧС;

3) учёт основных характеристик управления водным объектом;

4) исторический обзор и основные параметры постоянного режима выпуска воды, а также анализ регулирования стока на очередной квартал текущего года;

5) основные выводы, предложения и рекомендации.

Объект исследования

Волжско-Камский каскад **(**ВКК) – это взаимосвязанная между собой, объединённая глобальными географическими и социально-экономическими объектами сеть объектов гидроэнергетики, водохранилищ, являющаяся инфраструктурным инженерным стержнем функционирования и устойчивого развития социально-хозяйственного комплекса и жизнеобеспечения населения центра Европейской части России.

На р. Волге и её притоке р. Каме эксплуатируется каскад из 13 водохранилищ, из них 12 имеют в своём составе ГЭС: (Иваньковское, Угличское, Шекснинское, Чебоксарское, Камское, Воткинское, Нижнекамское Горьковское, Саратовское, Волгоградское, а также Верхневолжское водохранилища), обеспечивающих сезонное регулирование стока. Кроме того, Рыбинское и Куйбышевское водохранилища, имеют наибольший полезный объем и, практически влияют на регулирование всего стока воды в масштабе ВКВБ (Волжско-Камского водного бассейна).

Общая полезная ёмкость водохранилищ составляет 80 км^3 при среднемноголетнем объёме годового стока р. Волги 257 км^3. Резервных водохранилищ в ВКВБ нет, что приводит к ежегодным и кратковременным подтоплениям на территории Республики Марий Эл, Чувашской республики и Республики Татарстан, Вологодской, Ивановской, Костромской, Московской, Нижегородской, Самарской, Ульяновской и Ярославской областей.

ВКК – крупнейшая транспортно-водно-энергетическая система в Европе, основная часть сооружений которой, построенных ещё в советский период, так и не была окончательно завершена. Так Чебоксарский и Нижнекамский гидроузлы и сейчас

остаются недостроенными до проектных параметров. Вододелитель в дельте р. Волги введён с временным ограниченным режимом эксплуатации. Не завершены масштабные планы по реконструкции сельского и рыбного хозяйства для адаптации к условиям работы каскада в Волго-Ахтубинской пойме и волжской дельте.

Гидроэлектростанции каскада, покрывающие пиковую часть графика электропотребления, являются основой Единой энергетической системы России (ЕЭС). Выработка электроэнергии, находящимися в ведении ПАО «РусГидро», ГЭС на Волге и Каме позволяет ежегодно экономить 12–13 млн тонн условного топлива, сохранить около 30 млн тонн атмосферного кислорода.

(а)

(б)



Рисунок 1. Вид на Волжско-Камский каскад: комплекс гидросооружений Саратовской ГЭС. Авиаразведка границы Среднего и Нижнего Поволжья (а) и Рыбинская ГЭС. Авиаразведка при весеннем половодье Верхней Волги (б) (май 2020 года, фото: О.И. Рожко)

Figure 1. View of the Volga-Kama Cascade: the complex of hydraulic structures of the Saratov HPP. Aerial reconnaissance of the border of the Middle and Lower Volga region () (a) and Rybinsk hydroelectric power station. Aerial reconnaissance in the spring flood of the Upper Volga (b) (May 2020, photo: Oleg I. Rozhko)

Результаты и обсуждение

Режимы работы водохранилищ ВКК уже неоднократно подвергались комплексной научной оценке в целях прогнозирования ЧС [Анализ рисков…, 2022]. Согласно научным рекомендациям, они планируются с учётом оценки гидрометеорологической и водохозяйственной обстановки [О некоторых

вопросах…, 2022], прогнозов по объёмам притока воды в водохранилища на предстоящие декаду и квартал, гарантированного обеспечения водой населения и объектов экономики регионов Поволжья, а также с учётом выполнения требований правил использования водных ресурсов. Для ВКК в целом усматривается следующий набор общих вопросов для прогнозирования ЧС:

1) обзор общих сведений об объектах ВКВБ, расположенных в его пределах гидроэлектростанциях (ГЭС), которые – содержатся в правилах использования водных ресурсов, утверждённых Росводресурсами [6] для каждого из водных комплексов (водохранилище и гидроэлектростанция и т.д.);

2) условия и причины формирования паводка и риска возникновения ЧС (подтопления, обмеления и др.), постоянно присутствующие, временные и сезонные риски возникновения ЧС;

3) основные характеристики и показатели управления ВКК;

4) исторический обзор и стабильные показатели выпуска воды на этапах (участках) ВКК;

5) анализ регулирования стока на очередной квартал текущего года: факторы и условия, определяющие объем и график спецвыпуска;

6) основные выводы, предложения и рекомендации по аналитическим итогам вопросов 1–5.

Основным фактором стабильного функционирования энергетической, сельскохозяйственной, рыбной отраслей и судоходства является максимальное сохранение водного объёма верхней части ВКК после наполнения его в осенне-зимний период. При этом важнейшее значение при разработке методов расчёта и прогноза весеннего половодья, формировании расхода водных ресурсов, эксплуатации и проектировании водохозяйственных систем имеют процессы таяния снежного покрова – основного источника водонакопления [Лавров, 2024]. Соответственно, одним их основных условий наполнения (переполнения) водных объектов является устанавливаемое по мониторинговым данным Росгидромета количество воды в снежном покрове, накопленное в период снегонакопления. В качестве информационной основы в этих целях принимается максимально возможный (до 20 лет) период гидрологического наблюдения. На рисунке 2 приведены данные об объеме запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги за период с 1999 по 2023 гг.

Разнонаправленные критические колебания водности, обусловленные происходящими климатическими изменениями, являются природным фактором, оказывающим негативное влияние на значительной территории страны [7]. Происходящие глобальные климатические изменения, особенно в последнее десятилетие, формирующие существенные положительные аномалии температур на Европейской части России, привели к интенсификации таяния снега и значительному дополнительному притоку в приточные реки ВКВБ. Неблагоприятным фактором признаются обильные дождевые осадки, выпадающие на протяжении всего осенне-зимнего периода и в период весеннего половодья.

Следует отметить, что, учитывая действующие критерии отнесения событий к источникам ЧС, вопросы риска возникновения ЧС вследствие паводков или обмеления, не типичны, в системе управления носят фрагментарный характер. Первопричинами, влияющими на подтопления в верхних и средних участках ВКВБ и эффективность обводнения Нижней Волги, являются как естественные, так и антропогенные факторы: просадка уровней, ухудшение состояния инженерных водохозяйственных систем, неконтролируемая фрагментация водопроводящих трактов, отсутствие резервных ёмкостей.

---

[6] Положение о разработке, согласовании и утверждении правил использования водохранилищ, в том числе типовых правил использования водохранилищ, утверждённое постановлением Правительства Российской Федерации от 22.04.2009 № 349 // Собрание законодательства Российской Федерации, 2009, № 18, ст. 2247.

[7] Водная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (проект для общественного обсуждения), Разд. 2 // Официальный сайт Минприроды России / https://www.mnr.gov.ru/docs/proekty_pravovykh_aktov/vodnaya_strategiya_rossiyskoy_federatsii_na_period_do_2035_goda/?ysclid=lvp8ohkchy562473261, дата обращения 02.05.2024.

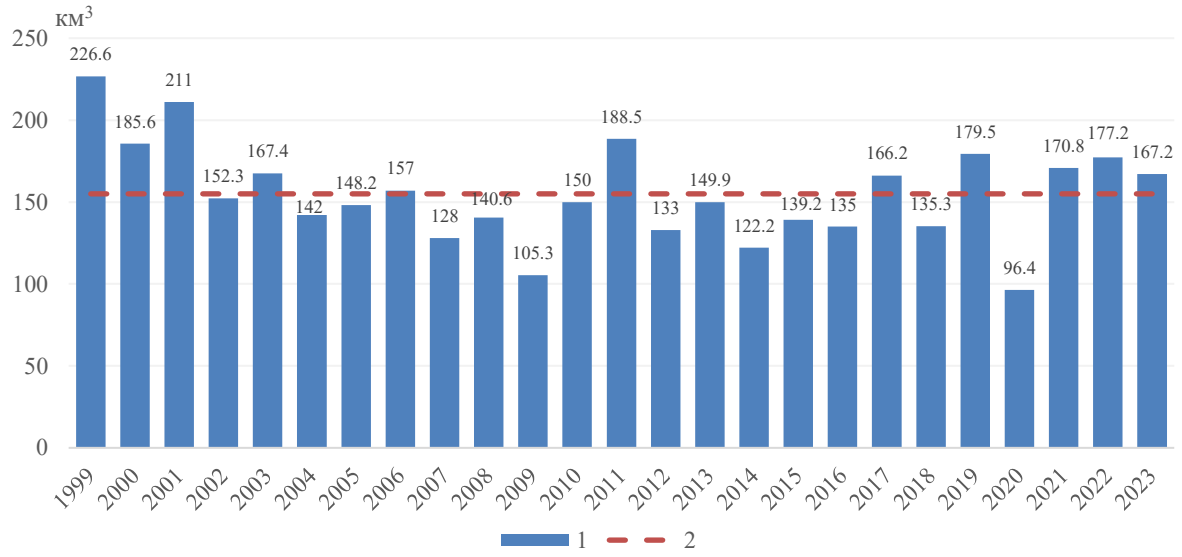


Рисунок 2. Запасы воды в снежном покрове в бассейне р. Волга (по данным Гидрометцентра России), км^3: 1 – измеренные значения, 2 – норма

Figure 2. Water reserves in snow cover in the Volga River basin (according to the Hydrometcenter of Russia), km^3: 1 – measured values, 2 – norm

После ввода в начале второй половины XX века в строй нижневолжских гидроузлов ВКК водохранилищ ГЭС (Куйбышевского и Волгоградского) гидрологические условия на протяжении всей р. Волги изменились кардинальным образом. Особенно это отобразилось на самом нижнем участке р. Волги – Волго-Ахтубинской пойме и дельте р. Волги. Изменение характера внутригодового стока (уменьшение стока в период половодья и соответствующее увеличение меженного стока, перекрытие путей миграции на нерест ценнейших и уникальных видов проходных и полупроходных рыб, и т. п.) создало угрозу существованию целых отраслей народного хозяйства на Нижней Волге.

В качестве компенсационных мер, позволяющих сохранить сельскохозяйственный рыбопромысловый потенциал региона, предусматривались весьма значительные гидростроительные работы по реконструкции всего сельского и рыбного хозяйства низовий Волги, однако к моменту ввода в эксплуатацию замыкающего каскад Волгоградского гидроузла планировавшиеся работы так и не были проведены.

Ещё с 1959 г. в качестве временной меры «до завершения реконструкции сельского и рыбного хозяйства Нижней Волги» было принято решение ежегодно во втором квартале осуществлять весенний попуск через Волгоградский гидроузел по специальному графику в целях обеспечения потребности сельского хозяйства в заполнении поймы, её пойменных водоёмов (ильменей), нереста ценных (прежде всего осетровых) промысловых видов рыб. Но поскольку реконструкция сельского и рыбного хозяйства Нижней Волги так и не выполнена, весенний спецпропуск продолжает осуществляться до сих пор в течение уже 65 лет.

Оценка всего продолжительного периода эксплуатации водохранилищ ВКК свидетельствует, что имеющаяся полезная ёмкость водохранилищ недостаточна для устойчивого обеспечения возрастающих потребностей водопользователей, в результате чего в периоды маловодья (маловодные годы) возможны ограничения водопользования, ухудшение качества воды, а также состояния прилежащих экосистем. В условия пикового водосбора в условиях паводков или обильных осадков, при отсутствии резервных ёмкостей, экстренные водосбросы способствуют риску возникновения ЧС (подтопление).

При высокой наполняемости водохранилищ имеют место риски негативной динамики пропуска весеннего половодья и

дождевых паводков по аналогии с 1991 и 2005 гг., включая необходимость повышенных сбросов через гидроузлы с последующим условно контролируемым подтоплением в нижних бьефах низкопойменных участков рек, дачных участков, несанкционированных построек и тому подобных объектов.

В гидрометеорологических условиях 2020 г. сохранялся повышенный риск подтоплений населённых пунктов, обусловленных необходимыми повышенными сбросами при превышении максимальных уровней воды из ГЭС-водохранилищ ВКК на территории Республик Марий Эл, Республики Татарстан, Чувашской Республики, Вологодской, Ивановской, Костромской, Московской, Нижегородской, Самарской, Ульяновской и Ярославской областей.

Для организаций, эксплуатирующих Ковжскую плотину, Шекснинский гидроузел и образуемые ими водохранилища Вологодской области, расположенные на них гидротехнические сооружения, регулирующим документом являются Правила использования водных ресурсов Ковжского (с сезонным регулированием стока) и Шекснинского водохранилищ от 14.09.2017. Эти документы в достаточной мере дают представление о мерах в случаях возникновения ЧС, включая действие средств автоматического противоаварийного управления.

Изменение режима работы этих водохранилищ производится с одновременным уведомлением об этом Росводресурсов, Верхне-Волжского и Двинско-Печорского бассейнового водного управления, Главного управления МЧС России по Вологодской области, Северо-Западного управления Росэкологии, Северо-Западного управления государственного морского и речного надзора Ространснадзора, комиссии по чрезвычайным ситуациям (КЧС) Правительства Вологодской области и заинтересованных водопользователей [8]. Аналогичным образом должны доводиться и разработанные прогнозы ЧС.

При превышении отметки 123,89 мБС в верхнем бьефе у плотины Иваньковского гидроузла в 2020–2022 гг. повышался риск подтоплений части территорий, прилегающих к г. Дубна Московской области. Соответственно, в целях снижения рисков опасного гидрометеорологического явления необходимо осуществлять транзитный пропуск воды через Иваньковский гидроузел до его планируемого наполнения до нормального подпорного уровня (НПУ) не позднее 17–20 мая.

Минимизации рисков ЧС при использовании водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге заложена в нормативных Правилах, установленных Росводресурсами 31.05.2019 со сроком действия до 31.12.2030 [9]. Данные Правила содержат указания о режимах функционирования водохранилища при возникновении аварий и иных ЧС (раздел X Правил), однако мер предупреждения ЧС Правилами не приводится.

Оценка сезонной обстановки в течение последних лет (2020–2023 гг.) в Угличском районе Ярославской области, Калязинском и Кашинском районах Тверской области показала стабильность штатной водохозяйственной обстановки, режим ЧС по гидрологическим явлениям не потребовался. В границах подпора Угличского водохранилища подтоплений населённых пунктов не возникало. Работа Угличского водохранилища организуется в соответствии с установленными Росводресурсами аналогичными Правилами эксплуатации водохранилища от 26.01.2022[10].

[8] Приказ Росводресурсов от 14.09.2017 № 194 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Ковжского и Шекснинского водохранилищ» (зарегистрирован Минюстом России 14.11.2017 за № 48881) // Сайт «Кодификация.РФ» https://www.rulaws.ru/acts/Prikaz-Rosvodresursov-ot-14.09.2017-N-194/, дата обращения 02.05.2024.

[9] Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 № 125 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге» (зарегистрирован Минюстом России 14.08.2019 за № 55596) // Интернет-портал «Официальное опубликование правовых актов», http://publication.pravo.gov.ru дата опубликования 15.08.2019 за № 0001201908150014, дата обращения 02.05.2024.

[10] Приказ Росводресурсов от 26.01.2022 № 15 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Угличского водохранилища на р. Волге» (Зарегистрировано в Минюсте России 27.09.2022 № 70237) // Интернет-портал «Официальное опубликование правовых актов», http://publication.pravo.gov.ru дата опубликования 27.09.2022 за № 0001202209270031, дата обращения 03.05.2024.

Причинами постоянно наблюдаемых подтоплений участков территории Ивановской, Костромской, Ярославской и Нижегородская областей является транзитный пропуск вод через Рыбинский гидроузел с доведением воды до НПУ (на который, собственно, рассчитаны сооружения водохранилища), но при котором, тем не менее, обеспечивается устойчивая стабильная работа устройств и сооружений гидроузла.

В последние годы в связи с возможным превышением уровня у плотины Нижегородского гидроузла на отметке выше НПУ 84,0 мБС прогнозировались подтопления объектов в городах и пригородах Рыбинска и Ярославля, залив побережья Горьковского водохранилища. Так, например, анализ подтоплений приусадебных участков в г. Ярославль и набережной г. Рыбинска в мае 2020 г. показал, что это неблагоприятное гидрологическое явление произошло в результате выпадения обильных осадков в первой и второй декадах мая в сочетании с высоким уровнем грунтовых вод и, соответственно, резкого увеличения бокового притока воды в Рыбинское водохранилище, которое наполнилось до максимально установленной отметки форсированного подпорного уровня (ФПУ) 101,91 мБС.

В связи со стоянием уровня вод у плотины Чебоксарского гидроузла на отметке выше допустимой в период весеннего половодья 63,3 м, в течение 42 суток (с 16 мая по 06 июня) повышаются риски подтоплений объектов, расположенных на побережье Чебоксарского водохранилища. С целью снижения риска подтопления территории г. Кокшайск Республики Марий Эл необходимо увеличение транзитного пропуска потока воды через Чебоксарский гидроузел после его возможного наполнения до НПУ 63,0–63,3 мБС.

Ещё один риск ЧС может реализоваться на Верхней и Средней Волге.

В связи с возможным ограничением наполнения Чебоксарского водохранилища до проектной отметки 68,0 метров, между населёнными пунктами Городец и Нижний Новгород Нижегородской области существует участок с лимитированными судоходными глубинами. Судоходство на этом участке обеспечивается путём повышенных попусков воды из Рыбинского водохранилища, возможности которого из-за маловодья могут быть исчерпаны уже к концу августа. Таким образом, режим судоходства на этом участке должен быть скорректирован.

В Самарской области повышены риски активизации склоновых процессов (оползни и обвалы), обусловленных микросейсмическими колебаниями грунтов, в связи с работой Жигулёвской ГЭС. Колебания усиливаются при расходах воды свыше 12 000 м^3/с, а при расходах свыше 16 000 м^3/с – возникает опасная ситуация, практически, не поддающаяся регулированию. Весной 2005 г. максимальные расходы воды составили 29 814 м^3/с. При этом, признаки неравномерной деформации оснований, трещины строительных и внутренних конструкций, межпанельных стыков, сверхнормативный крен и иные значимые дефекты были зафиксированы у 122 домов. Всего в зоне потенциальной угрозы находилось 309 домов (общей жилой площадью 1,2 млн м^2, из которых 50 % – дома, высотой 9 и более этажей).

В случаях критического повышения уровня в Куйбышевском водохранилище возможен прорыв находящейся на реконструкции Красноключинской дамбы в г. Нижнекамск Республики Татарстан[11].

Во избежание затопления набережной г. Жигули рекомендовано снижать уровень воды в Куйбышевском водохранилище до 63,0–63,5 мБС.

Чем выше предполоводный уровень у г. Астрахани, тем больше возможностей для наилучшего обводнения территории Нижней Волги. Но с целью продления «рыбной полки» до конца мая и недопущения переполнения нерестилищ Астраханской области сбросы с верхних водохранилищ ВКК свыше 18 000 м^3/с ограничиваются. При этом, в условиях высокой наполняемости водохранилищ возрастают риски

[11] Приказ Росводресурсов от 28.10.2014 № 270 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме» (зарегистрирован Минюстом России 20.02.2015 за № 36159) // Интернет-портал «Официальное опубликование правовых актов», http://publication.pravo.gov.ru дата опубликования 26.02.2015 за № 0001201502260007, дата обращения 03.05.2024.

повреждения гидромеханического оборудования гидротехнических сооружений (ГТС) при воздействии сверх расчётной гидростатистической нагрузки.

В условиях маловодья в нижнем течении Волги пропуск половодья может привести к невозможности обеспечения установленных параметров судоходства по р. Волга (на протяжении Волго-Ахтубинской поймы), критическому обмелению р. Ахтубы и к засухе прилегающих к ней территорий. Целый комплекс связанных с этим задач неоднократно ставился научным сообществом перед управлением (управляющими организациями) [Барабанов, 2015] При оптимизации режима весеннего паводка на ВКК необходимо предусматривать обводнение Волго-Ахтубинской поймы с целью создания благоприятных условий жизни людей, функционирования сельского, рыбного (в том числе обеспечения условий нереста рыбы в соответствии с её биологией), коммунального хозяйства (с нормальным забором воды) и энергетической системы.

Устанавливаемый уровень воды в р. Волге ниже плотины ГЭС предполагает нормальное судоходство, заполнение всех водохранилищ ВКК до НПУ. Факторами предполоводного стояния уровней воды в р. Волга, которые следует учитывать, являются:

– интенсивность нарастания и спада уровней в начале и конце попуска (интенсивность нарастания сброса воды Волгоградского гидроузла, исходя из реальной ситуации, на максимуме должна быть не менее шести дней и достигать 26000±500 м^3, выход на показатель так называемой «рыбной полки» – 16000±500 м^3/с, обводнённость поймы после весеннего паводка тогда может составить около 85 %), что подтверждается указанием Росводресурсов[12];

– температурный режим (как в самом русле р.Волга, так и на полях раннего заливания, где начинается нерест рыбы) имеющий большое значение для определения сроков начала попуска;

- используемая Росгидрометом система «Метеопредупреждения» представляет информацию о гидрометеорологических угрозах на срок до 36 часов [13] (при оперативной и чёткой работе в системе единой государственной системы предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), это время используется для своевременного принятия решения Росводресурсами при определении сбросовых объёмов).

Заключение

В качестве заключения данного обзорного исследования, по результатам приведённого анализа режимов работы водохранилищ ВКК, подтверждаются ранее сделанные выводы [Исмайылов и др. 2021], что именно второй квартал года для этого каскада является наиболее ответственным периодом, связанным с пропуском весеннего половодья, когда к водохранилищам приходит до 2/3 годового стока р. Волги, формируются запасы воды для использования в последующую межень, а также осуществляется специальный весенний попуск воды в низовья р. Волги.

По результатам данного исследования сформулированы рекомендации, адресуемые подразделениям Росводресурсов и других участвующих ведомств РСЧС, о необходимости:

1) дальнейшего развития общей теории безопасности и прикладных методов анализа и управления рисками ЧС на водных объектах с учётом отечественного и международного опыта,

2) перехода от стратегии индивидуальной защиты объектов к комплексной системе мер, включая оценку и управление рисками ЧС на основе технико-экономической оценки вариантов защиты, с учётом факторов уязвимости объектов водохозяйственной инфраструктуры;

3) выстраивания системной и согласованной подготовки водных объектов к возможным ЧС (включая создание условий для предотвращения ЧС, минимизации их

[12] *Бородин С.* График сброса воды на Волжской ГЭС в 2024 году: когда ждать максимум и минимум половодья? / «Волжская правда», 01.04.2024 WWW.VOLGOGRAD.KP.RU: https://www.volgograd.kp.ru/daily/27590/4917145, дата обращения 03.04.2024.

[13] Положение о системе информирования населения и других заинтересованных пользователей об угрозах возникновения опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации с использованием информационно-телекоммуникационной сети Интернет, приказ Росгидромета от 03.04.2019, п. 1.4.

последствий, обеспечение работы на акватории водных объектов с учётом риска возникновения и/или при возникновении ЧС[14];

4) предпаводковых обследований водных, находящихся в водоохранных зонах и иных расположенных в опасной близости объектов, представляющих экологическую опасность, возможных источников загрязнения водохранилищ и водоохранных зон, а также тщательной работы с сообщениями граждан и организаций в этот период;

5) обязательной разработки и осуществления мер по предупреждению аварий на ГТС, максимального снижения риска возникновения ЧС на ГТС в соответствии с законодательством [15];

6) программы обязательного страхования водных объектов, с учётом результатов оценки рисков ЧС;

7) повышения эффективности территориальных и ведомственных подсистем РСЧС, а также качества ориентированной подготовки специалистов в сфере прогнозирования ЧС на водных объектах, их оснащённости современными техническими средствами и технологиями, с учётом отраслевой специфики;

8) научно-методического обеспечения совершенствования задействуемых функциональных и территориальных подсистем РСЧС, с учётом уникальности и особенностей географических объектов, масштаба, возможных последствий ЧС, создания и совершенствования технологического, физико-математического, программного и информационного обеспечения, средств автоматизации управления, связи и оповещения;

9) создания информационной (цифровой) среды для управления водохозяйственным комплексом с использованием данных космического мониторинга и наблюдения за состоянием водных объектов;

10) своевременного выявление угроз, обеспечения качественной подготовки к защите от опасностей, а также выработки единых подходов и заранее скоординированных (слаженных) действий при обеспечении безопасности функционирования водных объектов;

11) совершенствования взаимодействия между органами исполнительной власти, функциональными службами РСЧС и организациями при предотвращении гидрологических ЧС или реагировании на них;

12) разработки и сооружения систем межбассейновой и внутрибассейновой переброски стока, водохранилищ, водозаборной и водораспределительной инфраструктуры с учётом режимов регулирования в особые периоды, прогностического расчёта возможных ЧС.

Реализация данных предложений как в отношении ВКК, так и в отношение всего водохозяйственного комплекса России, может рассматриваться как составляющая деятельности по сохранению суверенитета страны в обладании и эффективном управлении ею своими водными ресурсами, предотвращение риска утраты потенциала этих ресурсов или их перехода под регулятивное воздействие транснационального капитала и вне отечественных интересов.

Литература

Акимов В.А. Моделирование чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Монография / Акимов В.А., Бедило М.В., Шишков Ю.А., Иванова Е.О., Ростовцев Д.И., Сериков В. В. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. 144 с.

References

Akimov V.A., Bedilo M.V., Shishkov YU.A., Ivanova Ye.O., Rostovtsev D.I., Serikov V. V. *Modelirovaniye chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: Monografiya [Modeling of emergency situations of natural and man-made nature: Monograph]*.

[14] ГОСТ Р 22.0.09—2022 Безопасность в чрезвычайных ситуациях Чрезвычайные ситуации на акваториях. Термины и определения. Стр. 2 п. 10 // М., Российский институт стандартизации. 2022. С. 2.

[15] Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», абз. 7 ст. 8 // Собрание законодательства Российской Федерации от 28.07.1997 № 30 ст. 3589.

Анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах Волжско-Камского каскада в весенне-летний период / Е.А. Бац, А.И. Петрученко, О.И. Рожко, В.В. Татаринов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 26–27 октября 2021 г. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. С. 15–19. EDN DRVGWD.

Барабанов А. Т. Прогнозирование поверхностного стока талых вод с целью управления весенним паводком в Волжско-Камском каскаде водохранилищ / А. Т. Барабанов // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК-2015): Материалы 9-й Международной научно-практической конференции, Москва, 12–14 октября 2015 г. Том 2. Москва: Российский университет дружбы народов, 2015. С. 37-42. EDN UWGTLB.

Исмайылов Г.Х., Перминов А.В., Измайлова И.Г. Методика анализа функционирования сложных водохозяйственных систем на примере Волжско-Камского каскада гидроузлов // Природообустройство. 2021. № 2. С. 136. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-131-140.

Лавров С.А. Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на процессы таяния снежного покрова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 46–70. DOI:10.35567/19994508-2024-1-46-70.

О некоторых вопросах прогнозирования гидрометеорологической обстановки в Волжско-Камском бассейне в 2022 году / О. И. Рожко, В. В. Татаринов, Ю. Д. Лекарев [и др.] // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвящённой Всемирному дню гражданской обороны. В 4-х частях, Москва, 1 марта 2022 г. / Сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный [и др.]. Том Часть II. Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. С. 131–135. EDN ILMPWF.

Moscow, Publ. of FGBU VNII GOCHS (FTS), 2023, 144 p. (In Russian).

Bats E.A., Petruchenko A.I., Rozhko O.I., Tatarinov V.V. Analiz riskov vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gidrouzlakh Volzhsko-Kamskogo kaskada v vesenne-letniy period [Analysis of the risks of emergency situations at the hydraulic structures of the Volga-Kama cascade in the spring-summer period] *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem : Sbornik trudov VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf. Moskva, 26–27 oktyabrya 2021 g. [Technologies for the development and debugging of complex technical systems: Collection of works of the VIII All-Russian scientific and practical conf. Moscow, Oct. 26–27, 2021].* Moscow, Publ. of Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2022, pp. 15–19 (In Russian). EDN DRVGWD.

Barabanov A. T. Prognozirovaniye poverkhnostnogo stoka talykh vod s tsel'yu upravleniya vesennim pavodkom v Volzhsko-Kamskom kaskade vodokhranilishch [Forecasting surface runoff of melt water for the purpose of spring flood management in the Volga-Kama reservoir cascade] *Analiz, prognoz i upravleniye prirodnymi riskami v sovremennom mire (GEORISK-2015): Materialy 9-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 12–14 oktyabrya 2015 g. [*Analysis, forecast and management of natural risks in the modern world (GEORISK-2015): Proceedings of the 9th International scientific and practical conference, Moscow, October 12–14, 2015*],* Moscow, Publ. of RUDN, 2015, vol.2, pp. 37–42. (In Russian). EDN UWGTLB.

Ismailov G.Kh., Perminov A.V., Izmailova I.G. Metodika analiza funktsionirovaniya slozhnykh vodokhozyaystvennykh sistem na primere Volzhsko-Kamskogo kaskada gidrouzlov [Methodology for analyzing the functioning of complex water management systems using the Volga-Kama cascade of hydraulic structures as an example]. *Prirodoobustroystvo [Nature management].* 2021, vol. 2, p. 136. (In Russian). DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-131-140.

Lavrov S.A. Vliyaniye meteofaktorov, svoystv snega i klimaticheskikh izmeneniy na protsessy tayaniya snezhnogo pokrova [Influence of meteorological factors, snow properties and climate changes on the processes of snow cover melting]. *Vodnoye*

khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water management of Russia: problems, technologies, management]. 2024, vol. 1, pp. 46–70. (In Russian). DOI:10.35567/19994508-2024-1-46-70.

Rozhko O. I., Tatarinov V. V., Lekarev Yu. D. [at el.] O nekotorykh voprosakh prognozirovaniya gidrometeorologicheskoy obstanovki v Volzhsko-Kamskom basseyne v 2022 godu [On Some Issues of Forecasting the Hydrometeorological Situation in the Volga-Kama Basin in 2022] *Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfer., posvyashchonnoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony. V 4-kh chastyakh, Moskva, 01 marta 2022 g. [Civil Defense on Guard of Peace and Security: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conf. Dedicated to the World Civil Defense Day. In 4 parts, Moscow, March 01, 2022]*, Moscow, Publ. of. Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022, vol. II, pp. 131–135 (In Russian). EDN ILMPWF.

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 556.16

DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.169

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И НЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ БИТЮГ

Е.В. Гуревич

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gewita@yandex.ru

Аннотация. В результате исследования выявлены особенности тенденций изменения характеристик регионального водного баланса на примере бассейна р. Битюг, являющего крупным притоком р. Дон. Произошли существенные изменения приходной и расходной составляющих водного баланса, а также соотношения поверхностных и подземных вод на рассматриваемой территории.

Выявлено снижение количества эффективных осадков, обусловливающих поверхностный сток, на ~18 % и годового слоя стока р. Битюг на 10−20 мм. Суммарный слой стока весеннего половодья р. Битюг уменьшился в среднем в 1,6 раза. Эффект повышения зимнего стока за счет увеличения талой составляющей и зимних жидких осадков, улучшение питания подземных вод в зимний период в результате увеличения инфильтрационной способности почвогрунтов достиг своего предела к 2007 г., вызванного длительными маловодными периодами, после чего наблюдается снижение уровней речных и подземных вод.

Продолжительность периода между минимальными осенне-зимними и минимальными предвесенними уровнями воды и периода наибольшего пополнения подземных вод сократилась в среднем на 29−30 дней, что

CLIMATIC AND NON-CLIMATIC FACTORS OF RUNOFF FORMATION IN THE BASIN OF THE BITYUG RIVER

Elena V. Gurevich

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

e-mail: gewita@yandex.ru

Abstract. As a result of the study, the peculiarities of trends in changing the characteristics of the regional water balance have been revealed on the example of the Bityug River basin, which is a large tributary of the Don River. Significant changes have occurred in the inflow and outflow components of the water balance, as well as in the ratio of surface and groundwater in the territory under consideration.

The amount of effective precipitation causing surface runoff decreased by ~18 % and the annual runoff layer of the Bityug River by 10−20 mm. The total runoff layer of the spring flood of the Bityug River decreased by an average of 1.6 times. The effect of increasing winter runoff due to the increase in the melt component and winter liquid precipitation, improvement of groundwater supply in winter as a result of increased infiltration capacity of soils reached its limit by 2007, caused by prolonged low-water periods, after which there is a decrease in river and groundwater levels.

The duration of the period between the minimum fall-winter and minimum pre-spring water levels and the period of highest groundwater recharge decreased by 29−30 days on average, indicating accelerated depletion of groundwater storage during the off-season period of the year due to decreased recharge.

Significant intra-seasonal changes in the regime of snow accumulation and snowmelt have

Гуревич Е.В. Климатические и не климатические факторы формирования стока в бассейне реки Битюг // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. Вып. 2. С. 169−190. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.169.

указывает на ускорение истощения запасов подземных вод в межсезонный период года в связи со снижением объемов питания.

Произошли существенные внутрисезонные изменения режима снегонакопления и снеготаяния. Продолжительность существования запирающего слоя с 1990-х годов уменьшилась в 2−3 раза. По данным наблюдений на воднобалансовой станции Каменная Степь увлажнение верхнего метрового слоя в последнее десятилетие уменьшилось в среднем на 35−40 мм. Основными причинами наблюдаемых изменений являются внутригодовое перераспределение осадков и повышение температуры воздуха, в результате чего возросла продолжительность периода испарения с поверхности почвы.

С 1981 г. годовое подземное питание р. Битюг стало сопоставимо с максимальным стоком и даже превышает его в отдельные годы после 2007 г. Вклад годового подземного питания рек в годовой сток увеличился с 1980 г. в 1,7−2 раза.

Интенсивная антропогенная нагрузка разного характера на поверхностные и водные объекты препятствует их восстановлению после периодов с дефицитом водности.

Ключевые слова: изменения климата; многолетние колебания; гидрометеорологические характеристики.

occurred. The duration of the locking layer has decreased 2−3 times since the 1990s. According to observations at the Kamennaya Steppe water balance station, the moisture content of the upper meter layer has decreased by 35−40 mm on average in the last decade. The main reasons for the observed changes are intra-annual redistribution of precipitation and increase in air temperature, as a result of which the duration of the period of evaporation from the soil surface has increased.

Since 1981, the annual groundwater supply of the Bityug River has become comparable to the maximum runoff and even exceeds it in some years after 2007. The contribution of annual groundwater supply of rivers to the annual runoff has increased since 1980 by 1.7−2 times.

Intensive anthropogenic load of different nature on surface and water bodies prevents their restoration after water deficit periods.

Keywords: climate change; multiyear fluctuations; hydrometeorological characteristics

Введение

Глобальное потепление изменило все компоненты гидрологического цикла. Несмотря на многие научные исследования в последние десятилетия, по-прежнему сохраняется неопределенность в отношении возможных последствий изменения климата для водных ресурсов. Поэтому существует необходимость в оценке и понимании происходящих перемен, влияющих на устойчивость ресурсов поверхностных и подземных вод, на основе анализа реальных гидрометеорологических данных.

Регулярный анализ обновляемой информации, основанный на данных специализированной сети Росгидромета, позволяет отслеживать, какие тенденции потеряли актуальность или наоборот, вышли на первый план. В данном комплексном исследовании предпринята попытка выявить особенности тенденций изменения характеристик регионального водного баланса на примере бассейна р. Битюг, являющего крупным притоком р. Дон. Актуальность исследования подтверждается прогнозной оценкой дефицита воды в бассейне р. Дона[1].

Материалы и методы

Район исследований расположен в степной зоне Европейской территории России. В верховье р. Битюг действует воднобалансовая станция (ВБС) Каменная степь (рисунок 1), регулярные

[1] Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – Санкт-Петербург. 2017 – 106 с.

Gurevich E.V. Climatic and non-climatic factors of runoff formation in the basin of the Bityug river. *Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 169–190. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.169.

наблюдения на которой за элементами водного и теплового баланса зоны аэрации характеризуют гидрометеорологический фон потенциального воздействия изменения климата на рассматриваемый речной бассейн.

ВБС Каменная степь организована в 1950 г., находится в южной части Таловского района Воронежской области, на водосборе р. Чигла, являющейся левобережным притоком р. Битюг. Площадь водосбора р.Битюг 8840 км^2, длина 379 км. Действующие гидрологические посты: р. Чигла – п. Первомайский А=508 км^2, р. Битюг – пгт. Мордово А=903 км^2, р. Битюг – г. Бобров А=7342 км^2.

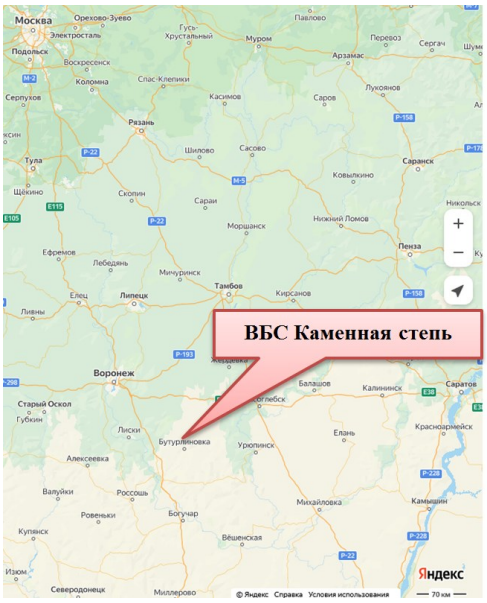


Рисунок 1. Местоположение воднобалансовой станции Каменная степь

Figure 1. Location of Kamennaya steppe water balancing station

Оценка многолетних изменений выполнена с помощью хронологического, сравнительного и корреляционного методов анализа гидрометеорологических характеристик за общий период наблюдений 1939–2022 гг.

Результаты и обсуждения

Температура воздуха, сезонные осадки. Анализ многолетних изменений сезонных температур воздуха и количества осадков показал следующее:

Повышение средних за календарные сезоны температур воздуха началось с весеннего потепления в 1950-х гг., которое затем «усилилось» осенним потеплением с 1960-х гг., зимним – с 1980-х гг., летним – с 1990-х гг. (рисунок 2). На хронологических графиках полиномиальным трендом прослеживается последняя фаза потепления сезонов с историческими температурными максимумами или близкими к ним в период 2007–2022 гг. Тепловая характеристика периодически выходит за пределы естественной изменчивости в формат «непривычной».

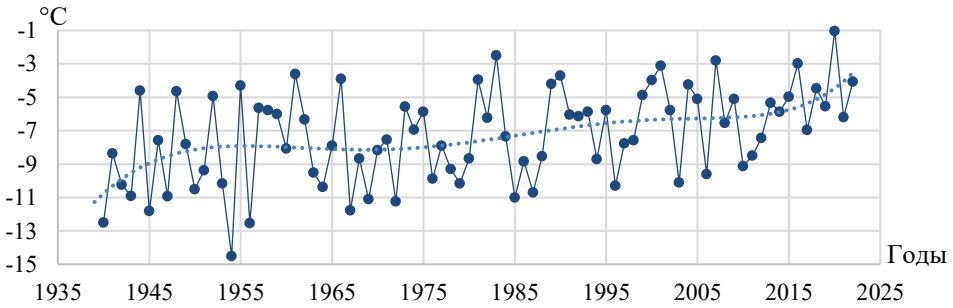
Изменения термических характеристик связаны с началом меридиональной южной циркуляционной эпохи с 1957 г., а «начало современного активного потепления (с 1970-х гг.) с переходом к зональным формам циркуляции на фоне продолжающейся южной циркуляционной эпохи» [Лебедева, 2017].

Годовое количество осадков к 1980-м гг. выросло на 26 % (на 120 мм) – в среднем с 380 мм до 500 мм (рисунок 3а). С 1980-х гг. чередование засушливых лет с средним и повышенным количеством осадков поддерживает слабовосходящий характер многолетних колебаний, но с более широким диапазоном изменений, чем в 1950–1970 гг. Средние значения годовых сумм осадков за период 1950–1980 гг. составляли 458 мм, за 1981–2022 гг. – 519 мм, т.е. выросли на 62 мм.

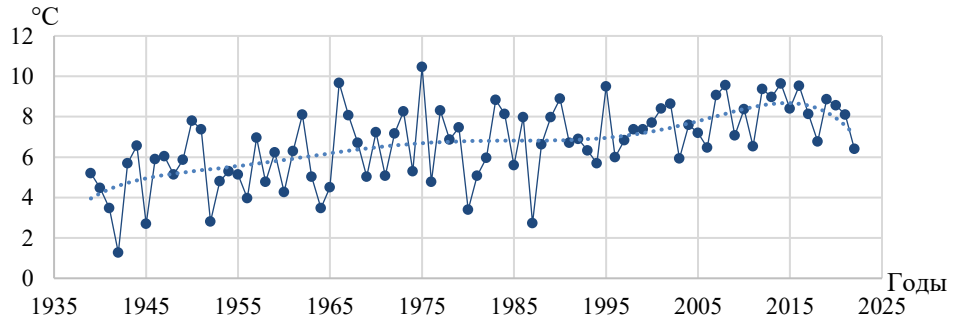
Многолетние колебания сумм осадков за календарные сезоны характеризуются чередованием серий лет различной водности с тенденциями их небольшого роста зимой и весной в последнее десятилетие (рисунок 3). При этом обращает на себя внимание период 2007–2014 гг. с низкими летними и осенними осадками.

Годовой сток. Анализ динамики многолетних колебаний коэффициента годового стока р. Битюг в верхнем течении у пгт. Мордово и нижнем у г. Бобров показал длительную тенденцию его снижения с 1950 г. к 1981 г., после чего выраженные разнонаправленные изменения наблюдаются уже в короткие серии лет (рисунок 4а). Количество осадков, участвовавших в формировании годового стока, снизилось к 1980-м гг. в два раза – в среднем с 35 % до 15–17 %. При этом годовое количество осадков к 1980-м гг. выросло (рисунок 3а).

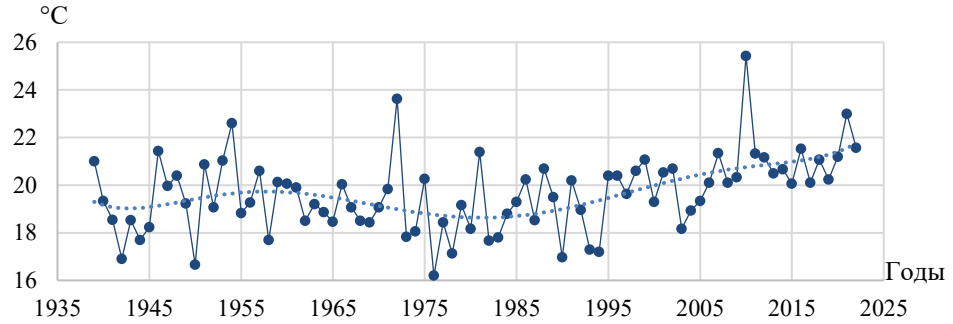
а)



б)



в)



г)

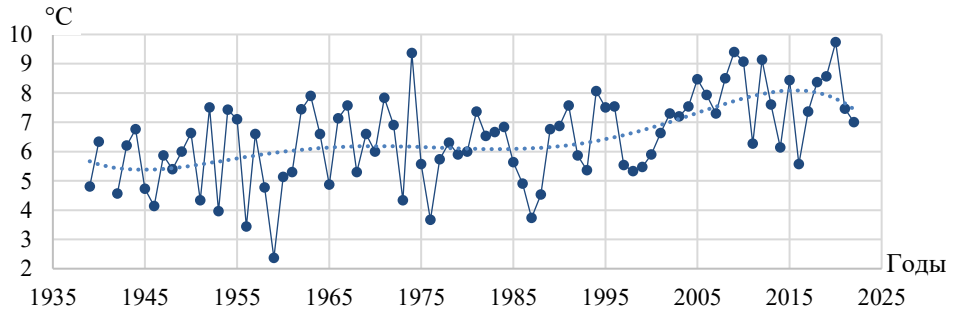


Рисунок 2. Многолетние изменения средних за сезон температур воздуха за календарные сезоны на ВБС Каменная степь: а) зима; б) весна; в) лето; г) осень

Figure 2. Multiyear changes in mean per season air temperatures for calendar seasons of Kamennaya Steppe station: winter; b) spring; c) summer; d) autumn

Многолетние изменения речного стока в 1971–2021 гг., несмотря на исторические максимумы 1979, 2005–2007 гг. из-за более частых и низких минимумов создают слабонисходящую тенденцию, при которой годовой слой стока р. Битюг снизился со средней величины 90 мм 1950-х гг. до 70–80 мм в 1982–2000, 2008–2021 гг. При этом минимумы 1984, 1991, 1994, 2008, 2014, 2020 гг. превышали низкие величины годовых осадков до 1959 г.

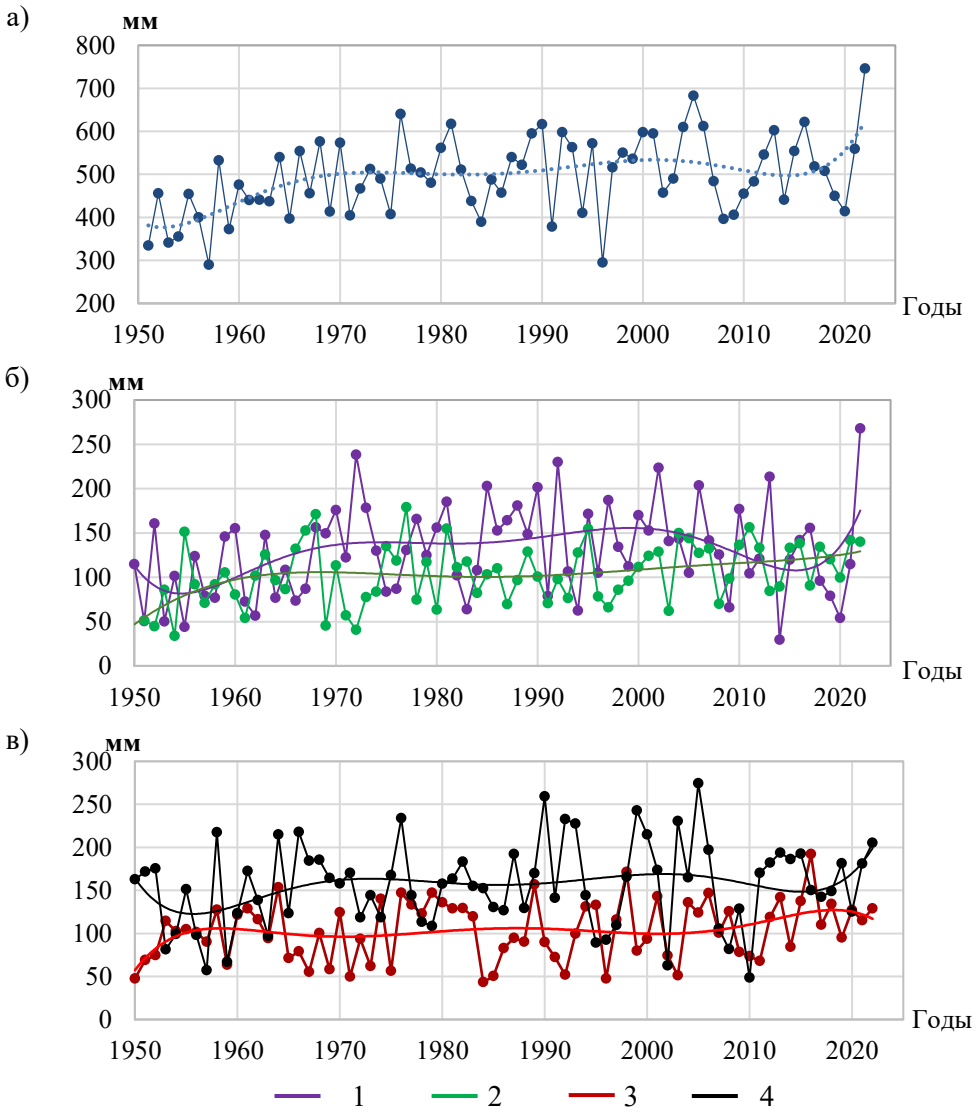


Рисунок 3. Многолетние изменения сумм осадков на ВБС Каменная степь за календарные сезоны: а) за год; б-в) по сезонам: 1 – осень, 2 – зима, 3 – весна,4 – лето

Figure 3. Multiyear variations of precipitation amounts over calendar seasons of Kamennaya Steppe station: a) per year; b-c) by seasons: 1 –autumn, 2 – winter, 3 – spring, 4 – summer

Средние величины годового слоя стока р.Битюг у пгт. Мордово и г. Бобров за период 1950−1980 гг. составляли 102 мм и 86 мм, а за 1981–2021 гг. – 81 мм и 72 мм, т.е. снизились на 21 и 15 мм, соответственно.

Таким образом, несмотря на признаки достаточности приходной части в виде осадков (рисунок 3) произошло снижение количества эффективных осадков, обусловливающих поверхностный сток, на ~18 % и годового слоя стока р. Битюг на 10–20 мм (рисунок 4). Хотя количество осадков играет очевидную доминирующую роль, другие характеристики осадков (вид, интенсивность, продолжительность, периодичность их выпадения) влияют на количество влаги, выделяемой для стока [Czikowsky и др., 2004]. Изменения в количестве, интенсивности и характере выпадения осадков во взаимосвязи между влажностью почвы и режимами суммарного испарения могут привести к аномальному речному стоку [Omar и др., 2024].

Весеннее половодье, снежный покров. Наибольшая часть годового стока формируется в весеннее половодье. Процессы снижения максимальных расходов воды, как и коэффициента годового стока начались в 1950-х гг. Доля весеннего половодья в годовом стоке в начале наблюдений составляла в среднем 60−80 % и к современному периоду снизилась в 2 раза − до 30−40 % (рисунок 5а). Максимальные расходы воды, усредненные за периоды, уменьшились в

несколько раз с 1950–1960 гг. к 2010–2021 гг. на р. Битюг – пгт. Мордово с 220 до 29 м^3/с, на р. Битюг – г. Бобров с 556 до 90 м^3/с, на р. Чигле с 1960–1970 гг. к 2005–2015 гг. – с 59 до 9 м^3/с (рисунок 5б).

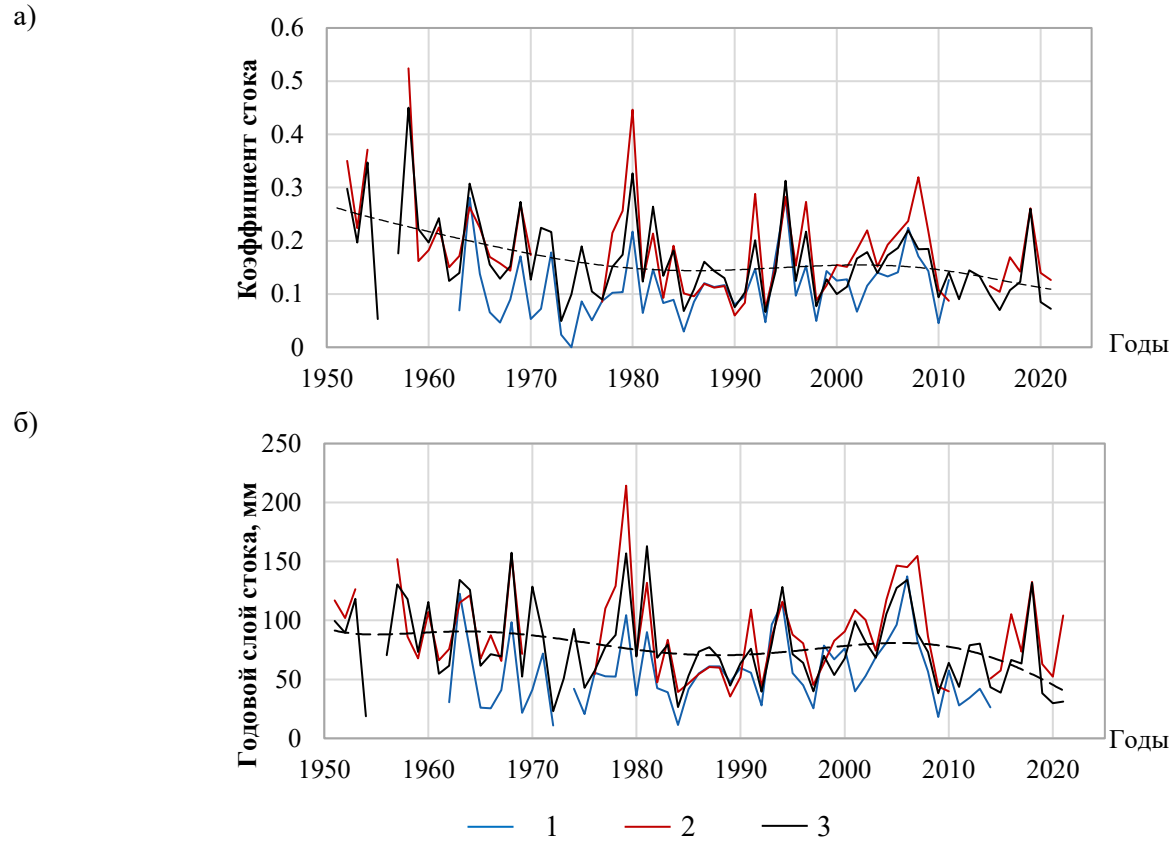


Рисунок 4. Многолетние изменения характеристик стока в бассейне р. Битюг:
а) коэффициент стока, б) годовой слой стока:
1 – р. Чигла – пос. Первомайский А=508 км ^{2}, 2 – р. Битюг – пгт. Мордово А=903 км ^{2},
3 – р. Битюг – г. Бобров А=7340 км^2

Figure 4. Multiyear variations of runoff characteristics in the Bityug River basin:
a) runoff coefficient, b) annual runoff layer:
1 – p. Chigla – pos. Pervomaisky A=508 km ^{2}, 2 – r. Bityug – village. Mordovo A=903 km ^{2},
3 – r. Bitug – Bobrov A=7340 km^2

По данным наблюдений за снежным покровом на водосборах балок ВБС Каменная степь в ходе многолетних колебаний максимальной высоты снежного покрова и запаса воды в снеге не отмечается значительных изменений, что косвенно указывает на достаточность приходной воднобалансовой составляющей (рисунок 6), но эффект количественного влияния этих факторов практически сводится к нулю изменениями временных характеристик и водопоглотительной способности почвогрунтов.

Произошли существенные внутрисезонные изменения режима снегонакопления и снеготаяния. По имеющимся данным за 1974–2019 гг. на водосборах балок Степной и Солонцы со второй половины 1990-х гг. даты начала снегонакопления сдвинулись в среднем на 1 месяц позднее – с конца ноября на конец декабря. Наблюдается тенденция смещения сроков начала водоотдачи из снега на 2 недели раньше с середины марта на его начало. Период от начала снегонакопления до начала водоотдачи из снега сократился в среднем на 40 дней, при этом с 1990-х гг. наблюдается его наиболее интенсивное и последовательное сокращение. За период 1950–2019 гг. даты максимума негозапасов сдвинулись в среднем на 10 дней раньше – с конца первой пентады марта на начало последней пентады февраля.

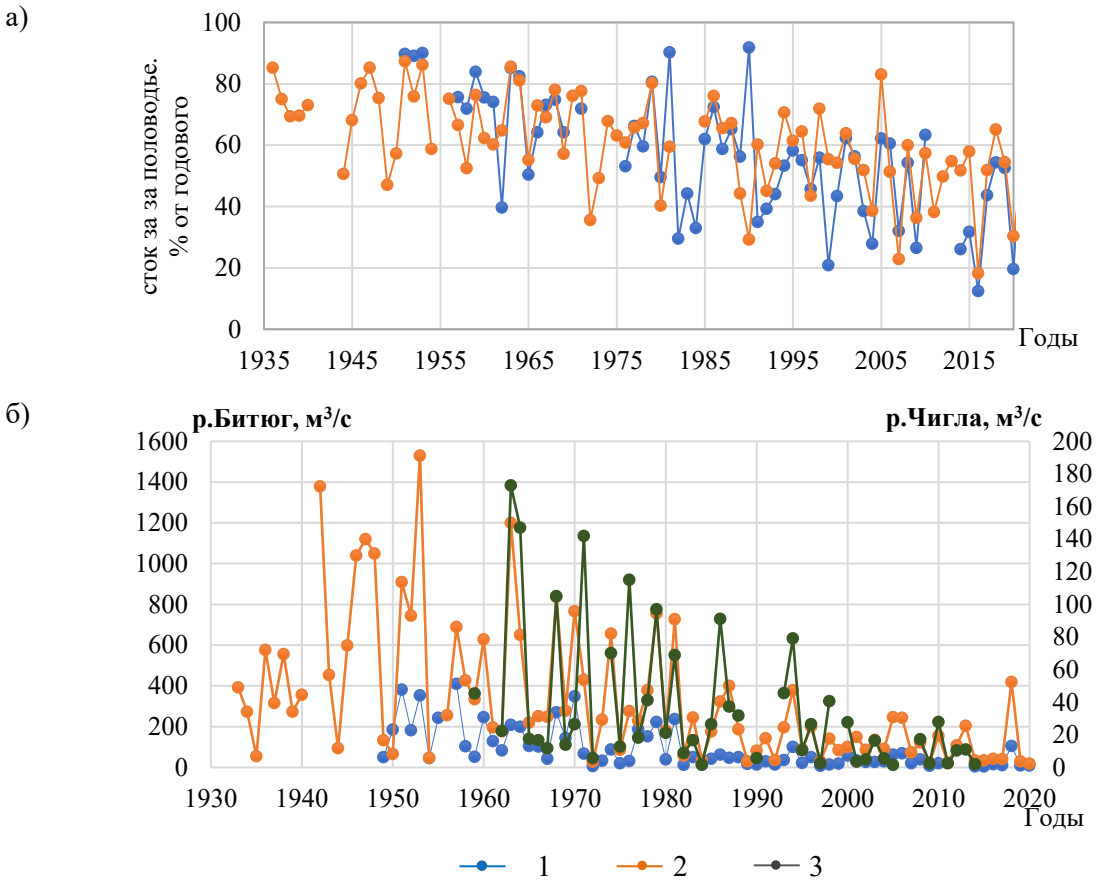


Рисунок 5. Многолетние изменения характеристик стока р. Битюг:
а) доли стока за половодье в годовом; б) максимальных расходов воды весеннего половодья
1 – р. Битюг – пгт. Мордово А=903 км^2, 2 – р. Битюг – г. Бобров А=7340 км^2, 3 – р. Чигла – пос. Первомайский А=508 км^2

Figure 5. Multiyear variations of flow characteristics of the Bityug River:
a) the share of runoff for the annual flood; b) maximum spring flood water discharge
1 – p. Bitug – Mordovo settlement A=903 km^2, 2 – r. Bitug – Bobrov A=7340 km^2, 3 – p. Chigla – post. A=508 km^2

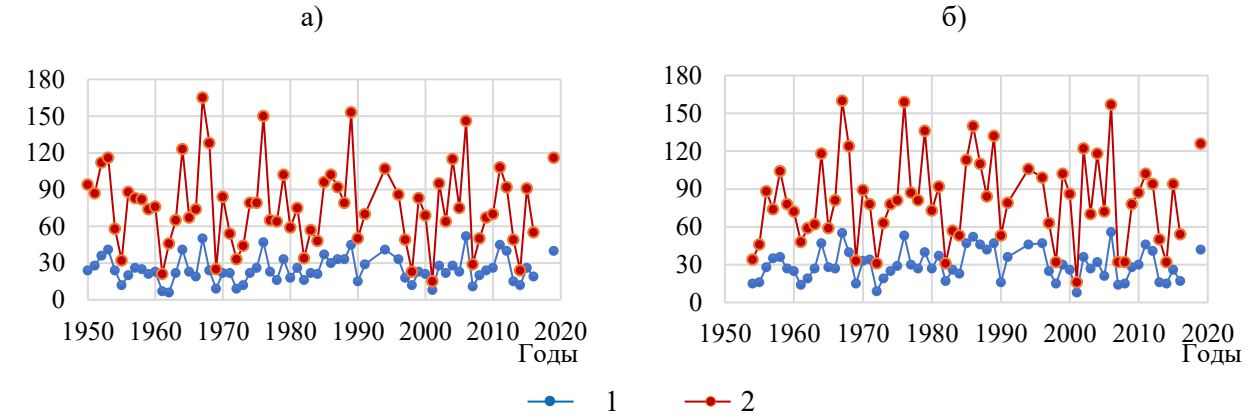


Рисунок 6. Многолетние изменения максимальной высоты снежного покрова и запаса воды в снеге на ВБС Каменная степь: а) балка Степная; б) балка Солонцы
1 – высота (см), 2 – запас воды в снеге (мм)

Figure 6. Multiyear variations of maximum snow cover height and snow water storage in the Kamennaya Steppe VBS: a) Stepnaya gully; b) Solontsy gully
1 – height (cm), 2 – water reserve in snow (mm)

Снижение вклада стока весеннего половодья в годовую величину обусловлено уменьшением максимальных расходов воды и продолжительности периода отрицательных температур воздуха, существенным изменением временны́х характеристик формирования снежного покрова, уменьшением глубины промерзания почвогрунтов, а также изменениями других не наблюдаемых факторов, сопутствующих указанным процессам (формирование запирающего слоя, ледяной корки и запасов влаги в зоне аэрации на глубине ниже 1 м, испарение со снега на разных ландшафтах и др.).

Важным обстоятельством в снижении максимального стока рек в бассейне р. Битюг является создание большого количества прудов. Таким образом, в формировании стока рек весеннего половодья участвуют процессы климатического и антропогенного характера.

Промерзание почвогрунтов. Указанные выше изменения характеристик снежного покрова происходят на фоне уменьшения глубины промерзания почвогрунтов и, соответственно, улучшения водопоглотительной способности почвенного горизонта. Интенсивное уменьшение глубины промерзания наблюдается с 1986–1987 гг. По данным наблюдений по 7 мерзлотомерам на балках Степная и Солонцы максимальная глубина промерзания почвогрунтов, усредненная за 1969–1987 гг., составляла 36–59 см, а за 1988–2019 гг. – 21–33 см, т.е. уменьшилась в среднем на 15–25 см. «Это свидетельствует о существенном сокращении случаев возникновения водонепроницаемого слоя почвы на водосборах, который, возникает при средних глубинах промерзания на водосборе в диапазоне от 40 до 60 см и более. При средней глубине промерзания на водосборе менее 30 см водонепроницаемый слой не образуется» [Журавин, 2022]. Следует отметить, что в ранний период в холодные зимы происходило промерзание почвогрунтов на 1–1,5 м.

Согласно работе [Ресурсы..., 1973] «потери на инфильтрацию могут составлять от 50–60 мм (если запирающий слой образовался на глубине 20–30 см) до 70–80 мм (если образуется водоупор на глубине 30–40 см). При этом, если бы в слоях почвы 20–30 и 30–40 см начальная влажность была меньше 0,4 и 0,38 (в долях от объемного веса) или же температура была выше (-1,6 °С) и (-2,0 °С), запирающий слой не мог образоваться и наблюдалась бы провальная инфильтрация».

Увеличение частоты оттепелей повлияло на сокращение продолжительности мерзлых состояний почвогрунтов, характерных для холодных зим, в результате чего улучшение водопоглотительной способности почв стало проявляться в более ранние сроки, что также сказалось на увеличении инфильтрационных потерь. Продолжительность существования запирающего слоя с 1990-х гг. уменьшилась в среднем более, чем в 2 раза (рисунок 7).

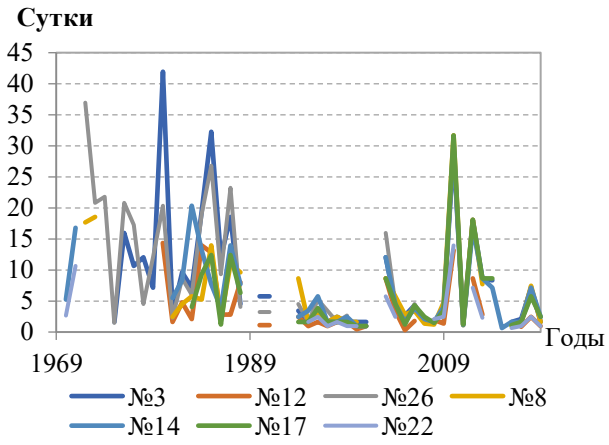


Рисунок 7. Изменения продолжительности существования запирающего слоя (№ мерзлотомеров на балках Степной и Солонцы, расчет по методике из работы [Бажин, Химин, 1980])

Figure 7. Changes in the duration of the locking layer existence (№ of permafrost gauges on the Stepnoy and Solontsy girders, calculation according to the method from [Bazhin, Himin, 1980])

В результате сокращения периода аккумуляции воды в снежном покрове, речном льду и мерзлых грунтов при потеплении зим [Журавин, 2022; Научно-прикладной справочник...2021] изменились сроки и объемы задержки воды в речном бассейне в твердой фазе к началу половодья. А улучшение дренирующей способности рек и водопоглотительной способности почвенных горизонтов повлияли на межсезонное распределение стока рек зимне-весеннего периода с потерей весенних объемов поверхностного питания рек на инфильтрационное питание подземных вод.

Запасы влаги в почвогрунтах. Влияние потепления зимних сезонов на водный режим почвогрунтов проявилось двояко – как в зимнем повышении, так и в летне-осеннем понижении влагосодержания. На рисунке 8 приведены сравнения запасов почвенной влаги на водосборах балок Степной и Солонцы в феврале при их одинаковых предзимних величинах в ноябре (45 мм и 32 мм, соответственно), но в разные по суровости зимы. Средняя температура воздуха в период декабрь-февраль была в 1986−1987 гг. (-10,7 °С) и в 1989−1990 гг. (-3,7 °С), то есть зима 1989−1990 гг. была почти в три раза теплее. К концу более теплой зимы запасы влаги в нижнем 50-сантиметровом слое на балке Степной (залежь) были выше в среднем на 8–9 мм (по слоям). Сравнительная оценка почвенных влагозапасов по балке Солонцы (поля севооборота) показала также повышенные запасы влаги (на 5–6 мм) в более мягкую зиму по всему профилю метровой толщи.

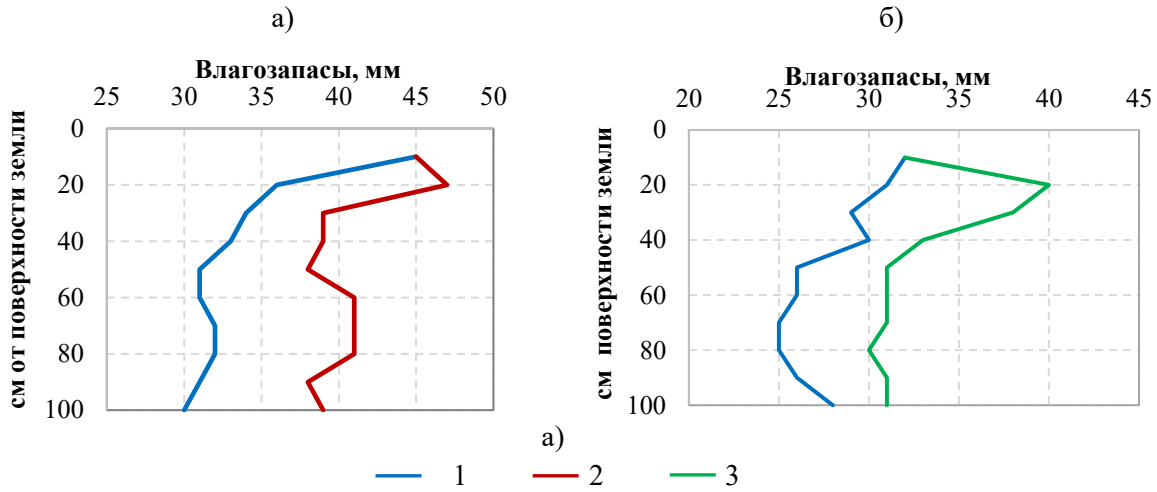


Рисунок 8. Изменение запасов влаги в феврале в метровой толще почвогрунтов в разные по суровости зимы при одинаковых влагозапасах в ноябре:а) балка Степная; б) балка Солонцы: 1 – зима 1986–1987 г. (T_{XII-II} 1986–1987 гг.= -10,7 °С), 2 – зима 1989–1990 г. (T_{XII-II} 1989–1990 гг.= -3,0 °С), 3 – зима 1990–1991 г. (T_{XII-II} 1989–1990 гг.= -6,1 °С)

Figure 8. Change of moisture reserves in February in a metre thick soil stratum in different winter severity with the same moisture reserves in November: a) Stepnaya gully; b) Solontsy gully: 1 – winter 1986–1987 (TXII-II 1986–1987 = -10.7 °C); 2 – winter 1989–1990(TXII-II 1989–1990 = -3,0 °C); 3 – winter 1990–1991(TXII-II 1989–1990 = -6,1 °C

По данным наблюдений на ВБС Каменная Степь увлажнение верхнего метрового слоя в последнее десятилетие уменьшилось в среднем на 35–40 мм. Основными причинами наблюдаемых изменений являются внутригодовое перераспределение осадков и повышение температуры воздуха, в результате чего возросла продолжительность периода испарения с поверхности почвы. Промерзание почво-грунтов в зимний период в последнее десятилетие не наблюдается или оно незначительно, что во-первых, не вызывает миграцию влаги в верхний слой к фронту промерзания [Калюжный, Лавров 2012], и, во-вторых, создает благоприятные условия для фильтрации влаги в более глубокие горизонты в зимний и весенний периоды» [Журавин, 2022].

В период 2011−2019 гг. отмечаются наиболее низкие величины увлажнения верхних слоев почв глубиной до 30 см во все сезоны, а в слоях до 50 см и 70 см − зимой и весной, соответственно (рисунок 9). Особенно сильно в 2011−2019 гг., по сравнению с ранними периодами, во все сезоны уменьшилось влагосодержание почвы в приповерхностном 10-сантиметровом слое: зимой с 43 мм до 34 мм – на 9 мм; весной с 34 см до 27 мм – на 7 мм; летом с 24 мм до 20 мм – на 4 мм; осенью с 30 мм до 25 мм – на 5 мм.

«В последнее десятилетие в полуаридной зоне происходит иссушение верхнего метрового

слоя почво-грунтов в теплый период года. В 2008–2017 гг. снижение осредненного увлажнения верхнего слоя почво-грунтов наблюдается начиная с апреля, достигает минимальных значений в 240–250 мм в июле-августе и восстанавливается только к концу декабря. Основными причинами наблюдаемых изменений являются внутригодовое перераспределение осадков и повышение температуры воздуха, в результате чего возросла продолжительность периода испарения с поверхности почвы, а питание верхнего слоя почво-грунтов капиллярной влагой в условиях снижения уровней верхнего водоносного горизонта на 3–5 м прекратилось или снизилось до незначительных величин [Журавин, 2022].

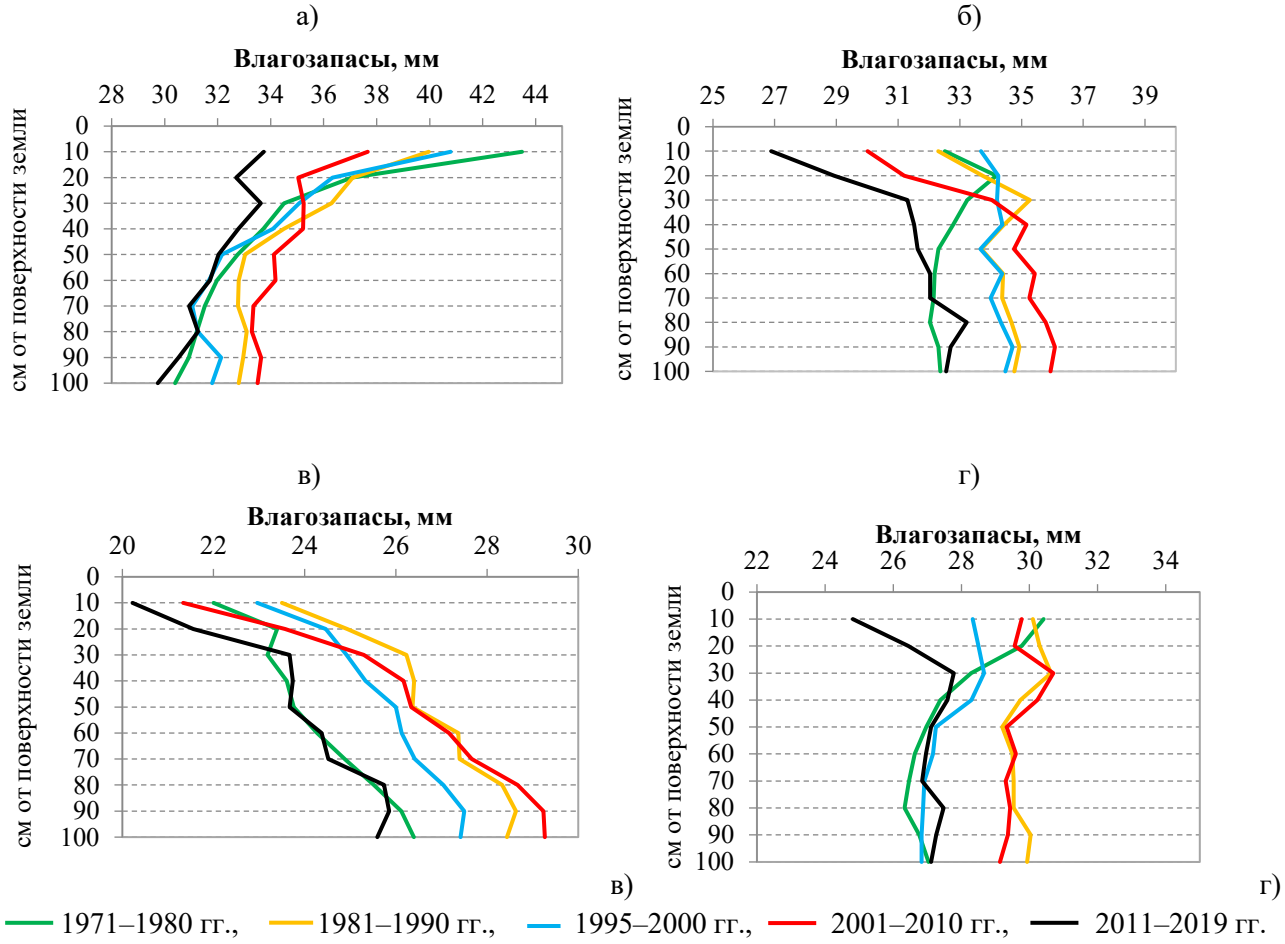


Рисунок 9. Средние за календарный сезон запасы влаги в метровой толще почвогрунтов на балке Степной: а) зима, б) весна, в) лето, г) осень

Figure 9. Average for the calendar season moisture reserves in a metre thick soil stratum on the Stepnoi gully: a) winter, b) spring, c) summer, d) autumn

Внутригодовое распределение осадков. Так как в теплый период года выпадает осадков в среднем на 35 % больше, чем в холодный период, осадки теплого периода являются более сильным стокообразующим фактором формирования стока рек, чем температурный, хотя не исключается чередование их ролей в отдельные годы или серии лет.

На существенное снижение предзимнего и зимнего увлажнения почвы, питание поверхностных и подземных вод в последние десятилетия повлияло уменьшение количества осадков летне-осеннего периода. В июне и июле обычно выпадает самое большое количество осадков, которое могло бы участвовать в пополнении водных ресурсов, однако, в следующие месяцы летне-осенней межени происходит их истощение из-за дефицита осадков. Так, даже усредненные за многолетний период величины осадков за август показывают сильное падение за четыре десятилетия (рисунок 10), к которому присоединились тенденции

снижения осенних осадков с 2003 г. Довольно редкие случаи повышенных осадков не смогли изменить суммарный многолетний эффект снижения приходной составляющей, который оказал негативное влияние на запасы почвенной влаги, поверхностный сток и уровни подземных вод.

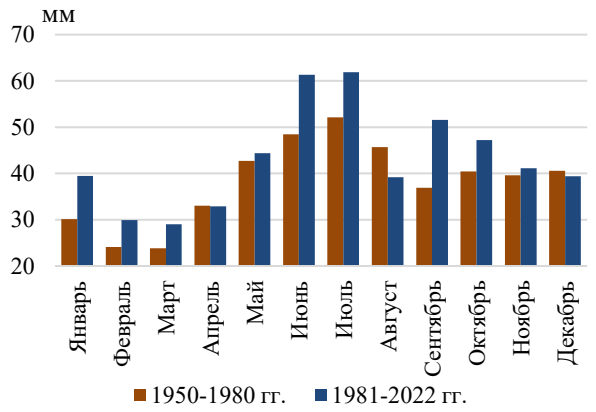


Рисунок 10. Внутригодовое распределение осадков за разные периоды
Figure 10. Intra-annual distribution of precipitation for different periods

В таблице 1 приведены средние величины осадков за общий период наблюдений за осадками и влагозапасами в почвогрунтах. После 2010 г. сумма осенних осадков снизилась в среднем на 30 мм, и такое существенное снижение предзимнего увлажнения территории отразилось дефицитом зимней влаги (рисунок 9), так как вклад фактора предзимнего увлажнения в такие сезоны оказался сильнее температурного.

Таблица 1. Средние за период суммарные осадки за сезон (мм)
Table 1. Period average total precipitation for the season (mm)

Период	Осень	Зима	Весна	Лето
1971–1980 гг.	142	95	109	148
1981–1990 гг.	151	108	99	166
1995–2000 гг.	135	95	103	150
2001–2010 гг.	148	117	105	147
2011–2019 гг.	118	120	120	172

Довольно длительный период пониженного количества осадков отмечается в последний зимний месяц, а также в летние и осенние месяцы периода 2007–2015 гг. со снижением до исторических минимумов или близких к ним.

За период 1950–1980 гг. среднее количество дней с осадками составляло 149 дней, за период 1981–2021 гг. оно уменьшилось до 135 дней, а в период 2008–2021 гг. было еще меньше – 129 дней. При этом увеличение количества дней без осадков отмечается с мая-июня по декабрь (рисунок 11), что характеризует уменьшение продолжительности приходной составляющей и, соответственно, увеличения продолжительности истощения поверхностных и подземных вод в результате отсутствия питания.

Подземное питание рек, уровни речных и подземных вод. Годовое подземное питание оценено по методике из работы [Методические рекомендации...,1991] по оценке подземного притока в реки» как полусумма минимальных 30-суточных расходов воды зимней и летне-осенней межени.

Многолетняя динамика минимальных 30-суточных расходов воды р. Битюг показывает их неравномерный рост в интенсивной фазе с 1981 г. и последующим снижением после 2007 г. (рисунок 12). По данным наблюдений на р. Битюг у г. Боброва за наиболее длительный период с 1933 г. начальный период слабого роста минимального стока можно отнести к концу 1950-х – началу 1960-х гг. (таблица 2, рисунок 12).

Минимальные 30-суточный речной сток от начала наблюдений на постах вырос в несколько раз. Средние величины расходов воды в зимнюю межень увеличились с периода 1950–1980 г. в период 1981–2020 гг.: на р.Чигле с 0,07 до 0,3 м^3/с; на р. Битюг – пгт. Мордово – с 0,3 до 0,95 м^3/с; р. Бирюг – г. Бобров с 3,7 до 7,8 м^3/с. Летне-осенний минимальный 30-сутоный сток повысился на р. Чигле с 0,04 до 0,12 м^3/с, р. Битюг – пгт. Мордово – с 0,2 м^3/с до 0,7 м^3/с; р. Бирюг – г. Бобров с 2,4 до 5,2 м^3/с.

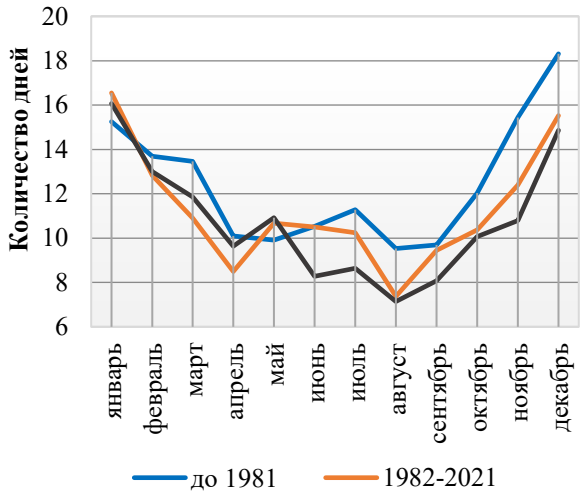


Figure 11. Average number of days with precipitation in different periods
Рисунок 11. Среднее количество дней с осадками в разные периоды

Таблица 2. Средние за период минимальные 30-суточные расходы воды в створе р. Битюг – г. Бобров ($м^3/с$)
Table 2. Average for the period minimum 30-day water discharge at the Bityug River – Bobrov (m^3/s)

Период	Зимние	Летне-осенние
1930–1940 гг.	2,5	1,4
1941–1950 гг.	3,8	2,0
1951–1960 гг.	2,7	1,6
1961–1970 гг.	4,0	2,6
1971–1980 гг.	4,4	3,3
1981–1990 гг.	7,8	4,0
1991–2000 гг.	6,4	5,2
2001–2010 гг.	9,90	6,4
2011–2021 гг.	7,10	5,2

Ход многолетних колебаний максимальных и минимальных расходов воды имеют выраженную противоположную направленность, характеризуя изменения условия формирования поверхностных и подземных вод (рисунки 5б и 12). С 1981 г. годовое подземное питание р. Битюг стало сопоставимо с максимальным стоком и даже превышать его в отдельные годы после 2007 г. (рисунок 13).

Вклад годового подземного питания рек в годовой сток увеличился с 1980 г. в 1,7–2 раза. На р. Чигле он вырос на 9 %, на р. Битюг у пгт. Мордово – на 18 % и у г. Боброва – на 21 %, а в 6 случаях периода 2007–2020 гг. он достигал 69–78 %.

В 2007–2021 гг. усредненная величина вклада годового подземного питания в годовой сток рек увеличилась в 2 раза по сравнению с ранним периодом до 1980 г. (таблица 3, рисунок 14).

Таблица 3. Усредненная величина вклада годового подземного питания (%) в годовой сток рек за разные периоды
Table 3. Average contribution of annual underground power supply (%) in the annual flow of rivers for different periods

Река - пост	до 1980 г.	1981–2006 гг.	2007–2021 гг.
р. Чигла – пгт. Первомайский	9	10	18
р. Битюг – пгт. Мордово	19	32	37
р. Битюг – г. Бобров	29	45	50

Коэффициент подземного стока, характеризующий отношение годового подземного питания к осадкам, также существенно повысился (рисунок 15) за счет увеличения степени участия эффективных осадков на формировании преимущественно не поверхностного, а подземного питания рек. При этом с 2008 г. наблюдается резкий спад участия осадков в формировании поверхностных и подземных вод (рисунки 4а, 15), что может свидетельствовать о начале нового стационарного периода [Журавин, 2022].

В 1970-х гг. наблюдается существенное увеличение минимального стока рек в зимнюю и летне-осеннюю межени. Это обусловлено как повышенными средними величинами осадков в периоды январь-апрель, июнь-июль и сентябрь-октябрь (рисунок 11), так и ростом участия талых и дождевых вод в питании подземных вод в результате учащения случаев оттепелей и

смягчения криогенных условий в зимние сезоны за последние десятилетия.

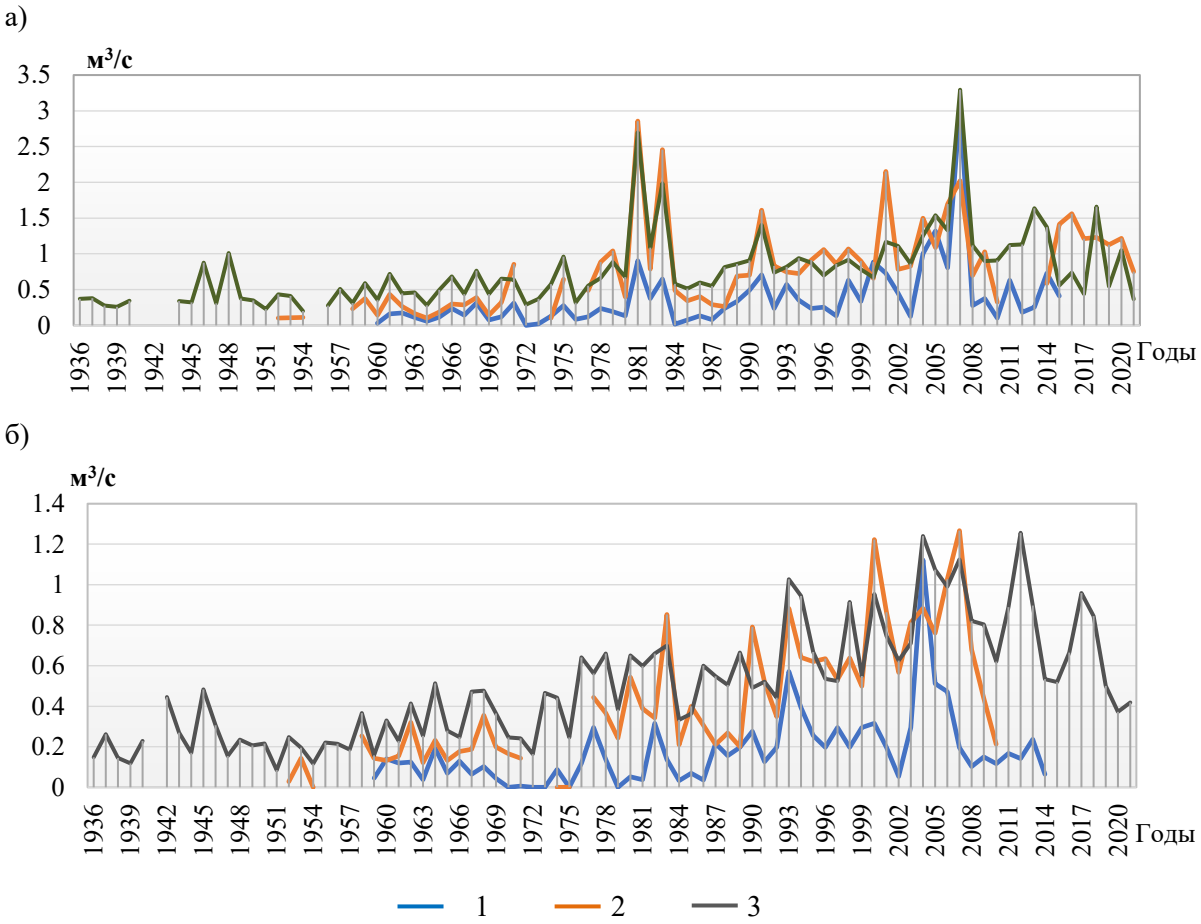


Рисунок 12. Многолетние изменения минимального 30-суточного стока рек в бассейне р. Битюг: а) зимнего, б) летне-осеннего

1 – р. Чигла – пос. Первомайский, 2 – р. Битюг – пгт. Мордово, 3 – р. Битюг – г. Бобров

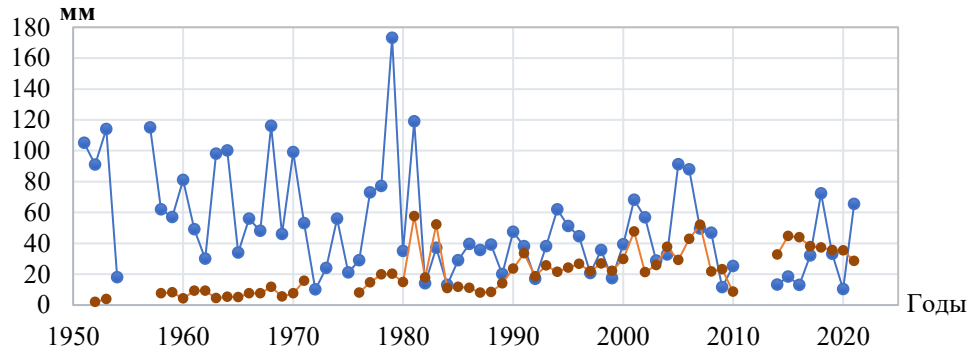
Figure 12. Multiyear variations of the minimum 30-day river flow in the basin of the Bityug river – Bobrov city: a) winter, b) summer-autumn

1 – Chigla River – Pervomaisky village, 2 – Bitug River – Mordovo settlement, 3 – Bitug River – Bobrov town

Если раньше наибольшее подземное питание реки получали в конце весеннего половодья, а наименьшее в конце зимней и летней межени [Ресурсы..., 1973], то в последние два десятилетия вклад весенней составляющей существенно снизился и реки перестали получать повышенное питание в конце весеннего половодья. Максимальный срочный расход по всей территории Донского района уменьшился в среднем в несколько раз. Суммарный слой стока весеннего половодья р. Битюг уменьшился в среднем в 1,6 раза. Повышение зимнего стока за счет увеличения талой составляющей и зимних жидких осадков, улучшение питания подземных вод в зимний период в результате увеличения инфильтрационной способности почвогрунтов уже перестало поддерживать многолетний рост уровней подземных вод. Такая многолетняя восходящая тенденция могла сохраняться более длительное время при условиях продолжения увеличения количества осадков и снижения водопотребления из поверхностных и подземных источников. Однако, наблюдается обратная картина. В целом, многолетняя динамика осадков теплого и холодного периода не показывает значимого роста (рисунок 3б, в), а минимальный зимний сток повышался до 2007 г. (рисунок 13а) с последующей сменой направления многолетней положительной тенденции на отрицательную. Отражением данного процесса является понижение уровней речных вод р. Битюг как средних годовых, так и низших в зимней и летне-осенней межени (рисунок 16) и уровней подземных вод (рисунок 17).

Следует отметить, что в зимнюю межень на р. Битюг у пгт. Мордово в 2006 и 2007 гг. наблюдался минимальный 30-суточный сток 7 % и 8 %-ных обеспеченностей, соответственно, а в летнюю межень 2007–г. – 5 %-ной обеспеченности. На р. Битюг у г. Боброва в 2007 г. в зимнюю межень наблюдали исторический максимум минимального 30-суточного стока – близкие к 1%-ной обеспеченности, то есть наибольшие почти за век величины редкой повторяемости. многолетняя тенденция. После этой серии многоводных лет можно было ожидать с большой долей вероятности «отката» на понижение. Теоретические предпосылки к такому закономерному развитию гидрологической ситуации заложены в концепции кривой вероятностей превышения стока, когда величина стока с разной вариацией поднимаясь до максимума, через какое-то время возвращается в зону минимальных значений.

а)



б)

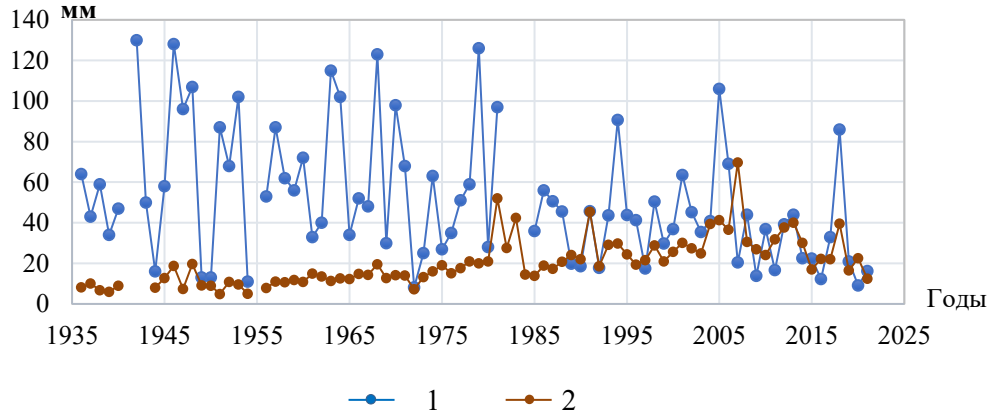


Рисунок 13. Многолетние изменения суммарного слоя стока весеннего половодья и слоя годового подземного питания р. Битюг:
а) пгт. Мордово А=903 км^2; б) г. Бобров А=7340 км^2
1 – суммарный слой стока за половодье, 2 – годовое подземное питание

Figure 13. Multiyear variations of the total layer of spring flood runoff and the layer of annual groundwater supply of the Bityug River:
a) Mordovo settlement A=903 km^2; b) Bobrov town A=7340 km^2
1 – total runoff layer for floods, 2 – annual groundwater supply

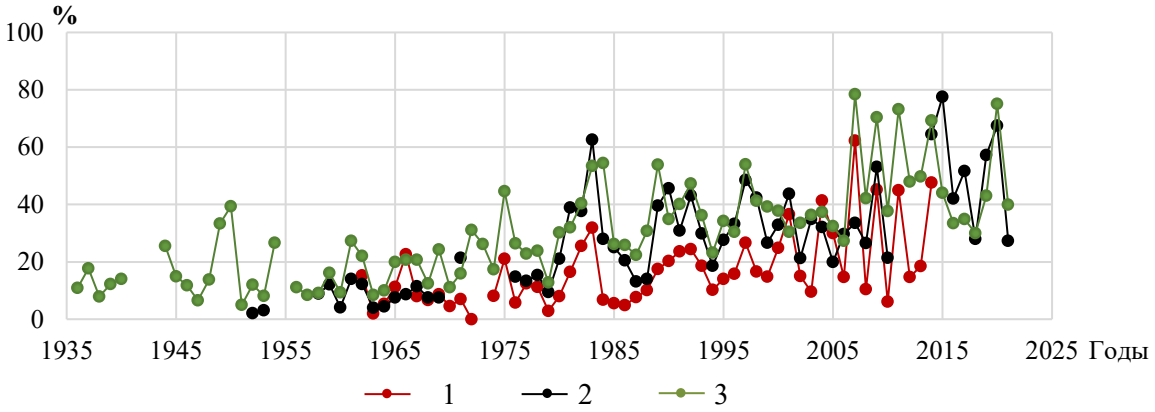


Рисунок 14. Изменение вклада годового подземного питания в годовой сток рек
1 – р. Чигла - пос. Первомайский, 2 – р. Битюг – пгт. Мордово, 3 – р. Битюг – г. Бобров
Figure 14. Change in the contribution of annual groundwater supply to annual river runoff
1 – Chigla River – Pervomaisky village, 2 – Bitug River – Mordovo settlement, 3 – Bitug River – Bobrov town

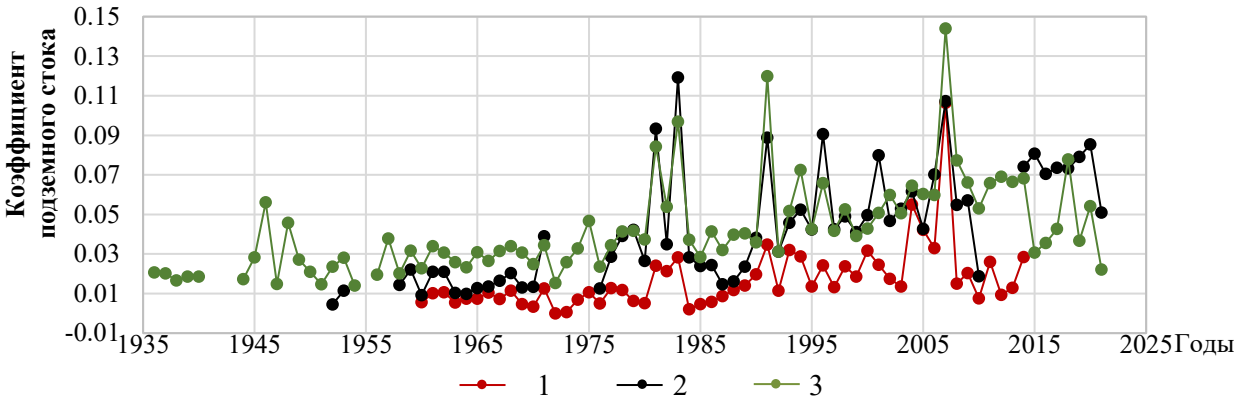


Рисунок 15. Многолетние изменения коэффициента подземного стока
1 – р. Чигла - пос. Первомайский А=508 км ^{2}, 2 – р. Битюг – пгт. Мордово А=903 км ^{2},
3 – р. Битюг – г. Бобров А=7340 км^2
Figure 15. Multiyear variations of the groundwater flow coefficient
1 – Chigla River – Pervomaisky village A=508 km^2, 2 – Bitug River – Mordovo settlement A=903 km^2,
3 – Bitug River – Bobrov town

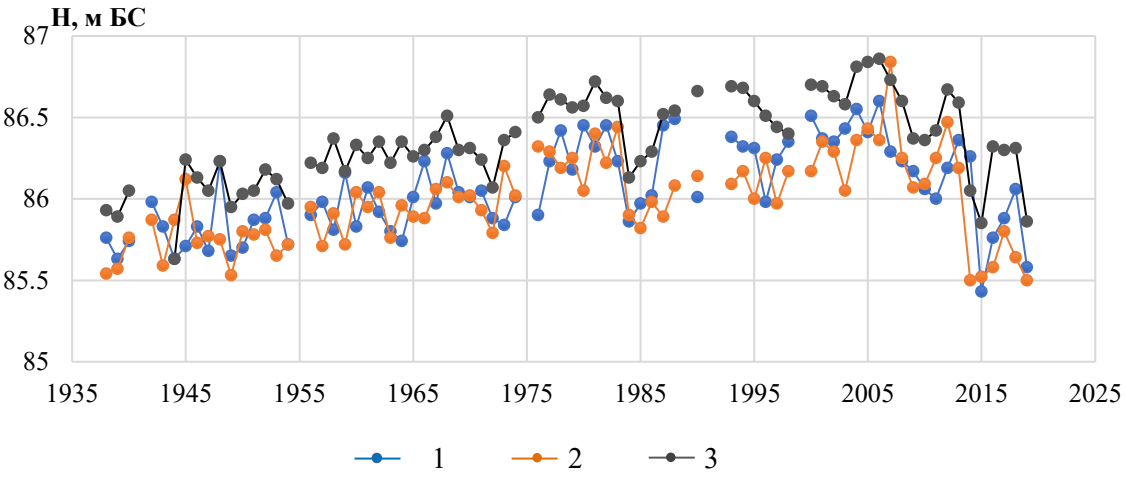


Рисунок 16. Многолетние изменения средних годовых уровней воды р. Битюг – г. Бобров
1 – низший зимний, 2 – низший летне-осенний, 3 – средний годовой
Figure 16. Multiyear variations of mean annual water levels Bityug River – Bobrov City
1 – lowest winter, 2 – lowest summer-autumn, 3 – average annual

Влияние колебаний уровней подземных вод на уровенный режим в реке показывает наличие связи между средними годовыми уровнями воды в р. Битюг и в Докучаевском колодце (рисунок 18), которая в то же время характеризует общие условия питания поверхностных и подземных вод в речном бассейне. Коэффициент корреляции связи 0,79.

На рисунке 18 приведены многолетние колебания уровней подземных вод в скв. 20109181 (Докучаевском колодце), за имеющийся период наблюдений 1930−1934, 1940−2011 гг. Колодец был создан в 1892 г., и впервые за 128 лет в 2021 г. он пересох. С 1950 по 2007 гг. происходило повышение уровней воды, а с 2008 года – понижение до пересыхания к настоящему времени. «В период 2020−2022 гг. оказалось, что по фактическим замерам в 2020 г. уровень был выше дня колодца только весной, в 2021 г. колодец был сухой весь год, а в 2022 г. только несколько летних фактических замеров показали минимальный слой воды над его дном в марте 2023 г. в колодце появилась вода, и ее уровень на конец марта поднялся на 48 см над дном» [Поздняков и др., 2023]. Осмотр колодца специалистами Государственного гидрологического института в сентябре 2023 г. показал отсутствие в нем воды, а 21 мая 2024 г. – уровень 1,18 м.

Здесь следует обратить внимание, что одной из причин высыхания колодца является не только дефицитное питание подземных вод, но и повышение его дна на 2 метра. «В момент сооружения в 1892 г., согласно архивным материалам, его глубина была 10 м. Сейчас по фактическим замерам глубина колодца составляет 8–8,05 м» [Поздняков и др., 2023], т.е. произошло поднятие дна на 2 м, что обычно происходит при заиливании колодцев.

Наиболее длительные снижения уровней воды в колодце наблюдали в период 1944−1957 гг. (14 лет), более кратковременные – в 1984−1986 гг. (3 года) и 1995−1997 гг. (3 года) (рисунок 17а). Но такое резкое и продолжительное падение уровней подземных и речных вод в 2008−2023 гг. (16 лет) до высыхания колодца отмечается впервые.

Предвесенние наименьшие уровни подземных вод с 1980 г. стали не в декабре-январе как в 1959−1979 гг., а в более поздние сроки – часто в марте (рисунок 19). До 1965 г. весеннее пополнение подземных вод до максимальных отметок обычно происходило в июне, в последующий период до 2001 г. оно стало все чаще смещаться на более ранние майские даты, в 2002−2007 гг. – это уже апрель.

Таким образом, продолжительность периода наибольшего пополнения подземных вод сократилась в среднем на 29 дней – со средней продолжительности 132 дней за 1930−1980 гг. до 103 дней за 1981–2011 гг. Что указывает на дефицит приходной составляющей для питания подземных вод в поздний период времени, когда произошло падение уровней подземных вод (рисунок 20). Сравнение выполнено за имеющийся период наблюдений до 2011 г.

Наиболее низкие уровни подземных вод в осеннюю межень до 1975 г. наблюдались обычно в сентябре–октябре, с 1976 г. иногда в сентябре, и чаще в октябре–декабре (рисунок 19). Продолжительность периода между минимальными осенне-зимними и минимальными предвесенними уровнями воды сократилась в среднем на 30 дней – со средней продолжительности 106 дней за 1930−1980 гг. до 76 дней за 1981–2011 гг. Данные изменения также указывают на ускорение истощения запасов подземных вод в межсезонный период года в связи со снижением объемов питания.

Не климатические факторы формирования поверхностных и подземных вод. Есть мнение, что «климатически обусловленные изменения нормы стока оказались существенно меньше его естественных изменений, а также изменений, обусловленных антропогенным воздействием на водосборах и в руслах рек [Георгиади А.Г., 2020]. На формирование гидрологического режима влияют и другие природные и антропогенные процессы. Их роль во взаимодействии поверхностных и подземных вод может как усиливаться, так и ослабевать в результате изменения климата.

С целью изыскания способов регулирования лесного и водного хозяйства в конце XIX века была начата разработка стратегии полного перехвата атмосферной влаги, поступающей в степной ландшафт, в последствии – агроландшафт. Итогом работы Особой экспедиции должно было стать установление на основе научных данных «возможно правильное

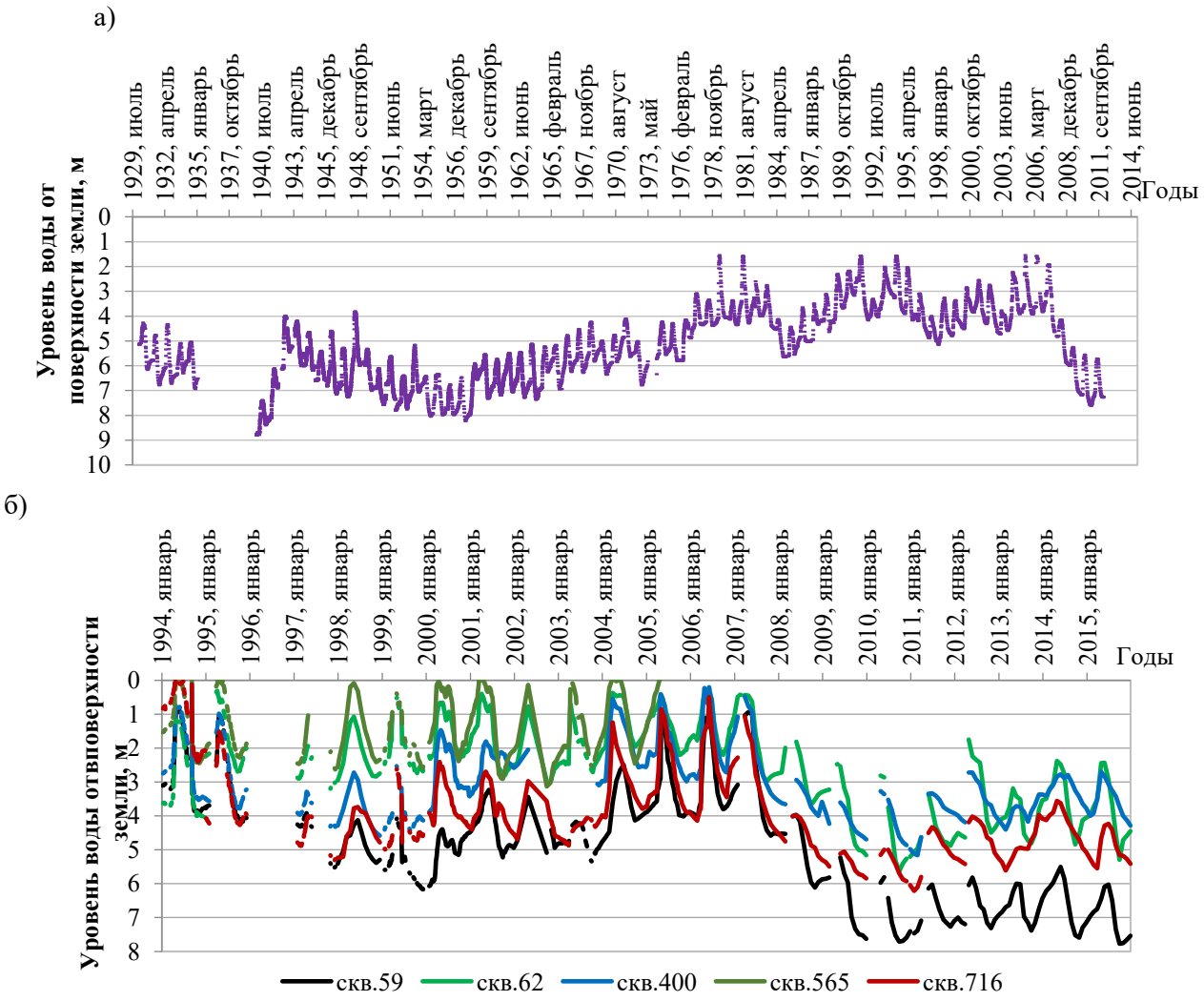


Рисунок 17. Суточные уровни подземных вод:
а) скважина № ГВК 20109181 за 1930–1934, 1940–2011 гг.; б) скважины ВБС Каменная степь за 1994−2015 гг.

Figure 17. Daily groundwater levels:
a) well No. GVK 20109181 for 1930–1934, 1940−2011; b) Kamennaya Steppe VBS wells for 1994−2015

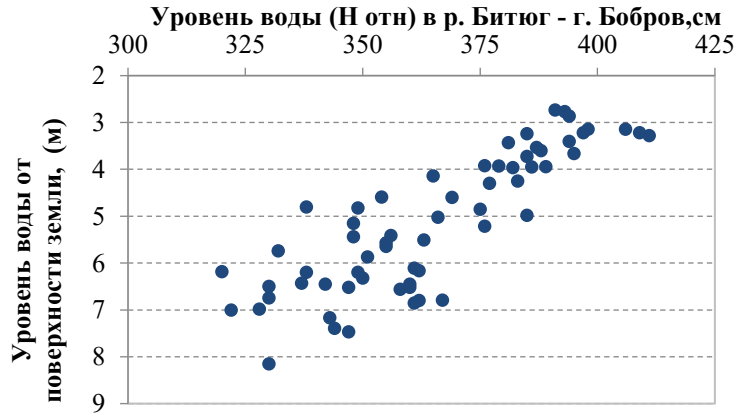


Рисунок 18. Связь средних годовых уровней воды в р. Битюг у г. Боброва и уровнями воды в скв. 20109181 (Докучаевский колодец)

Figure 18. Relationship between mean annual water levels in the Bityug River near Bobrov and water levels in well 20109181 (Dokuchaevsky well)

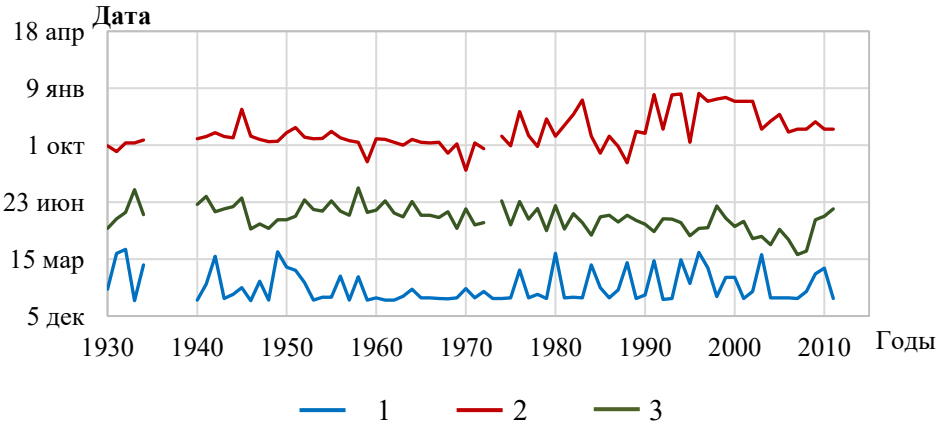


Рисунок 19. Изменения дат прохождения максимальных и минимальных уровней воды в скв.20109181 (Докучаевский колодец):
1 –предвесенний минимум, 2 – осенне-зимний минимум, 3 – весенний максимум

Figure 19. Changes in the dates of maximum and minimum water levels in well 20109181 (Dokuchaevsky well): 1 – pre-spring minimum, 2 – fall-winter minimum, 3 – spring maximum

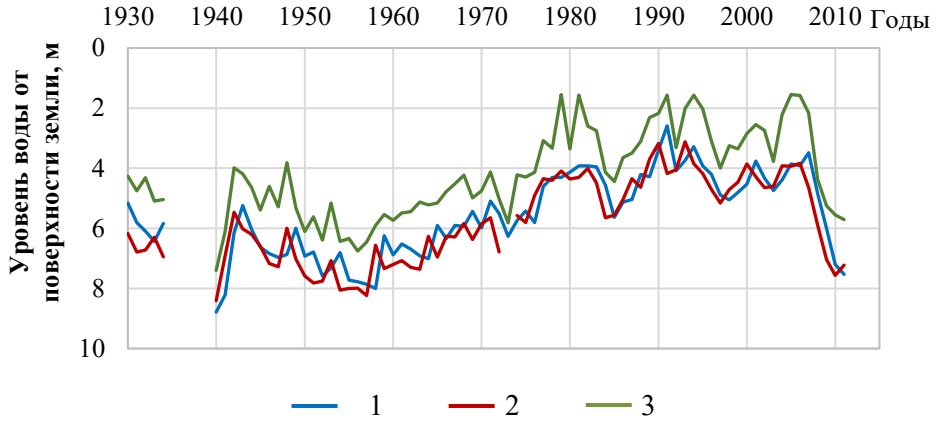


Рисунок 20. Многолетние изменения минимальных и максимальных уровней подземных вод скважине № ГВК 20109181 (Докучаевский колодец):
1 – предвесенний минимум, 2 – осенне-зимний минимум 3 – весенний максимум

Figure 20. Multiyear fluctuations of minimum and maximum groundwater levels of well № GVK 20109181 (Dokuchaevsky well):
1 – pre-spring minimum, 2 – fall-winter minimum, 3 – spring maximum

соотношение между водой, лесом, полями, лугами и другими хозяйственными угодьями». В ряду первоначальных работ было строительство прудов. Эта программа получила развитие и оправдала себя в первой половине XX века [Абанина, 2022], но дальнейшее практически полное преобразование ландшафта в агроландшафт при несбалансированных сверхэксплуатации водных ресурсов и воздействии на поверхностные и подземные водные объекты привели к современным негативным последствиям.

Создание прудов и гидротехнических сооружений (ГТС) на реках бассейна р. Битюг внесло большие изменения в их естественный гидрологический режим. На рисунке 21 показано расположение прудов, плотность которого (или количество которых) отражает степень антропогенного воздействия на территорию. Пруды и ГТС создавались в разное время с различной интенсивностью и стали неотъемлимой составляющей внутрисезоного и внутригодового регулирования климатического стока рек, наряду с изъятием воды из поверхностных и подземных источников для хозяйственных нужд. Такая ситуация сложилась не только в бассейне р. Битюг. При создании прудов и водохранилищ происходит срезка

максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков с аккумуляцией воды в водоемах. Поэтому в многолетнем снижении максимального стока рек присутствует не только климатических фактор, но и указанный. Кроме того, большое количество малых прудов и водохранилища играют огромную преобразующую роль в формировании процессов и баланса подземных вод, образуя искусственные запасы подземных [Боревский и др., 1989]. Можно предположить, что в длительном подъеме уровней подземных вод в 1960−1980 гг. (рисунки 17а, 20) искусственные запасы сыграли немалую роль.

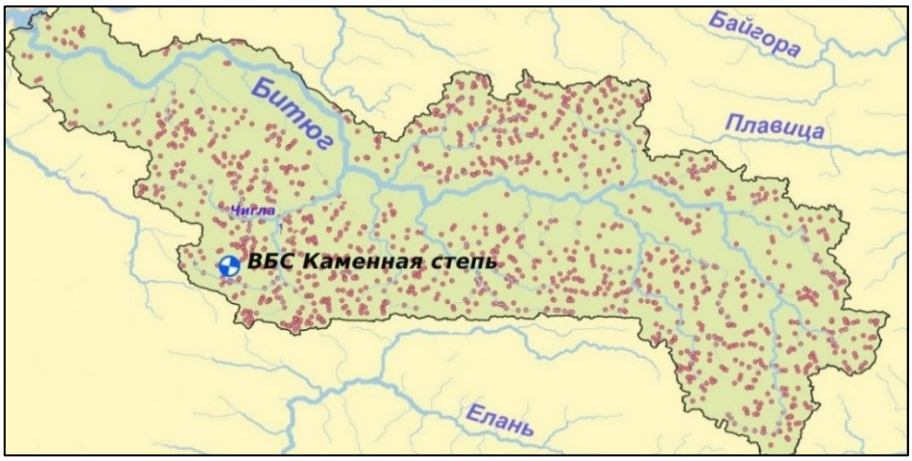


Рисунок 21. Схема расположения прудов в бассейне р. Битюг (рисунок выполнен Л.С. Курочкиной)
Figure 21. Scheme of ponds location in the Bityug River basin (drawing by L.S. Kurochkina)

В условиях, когда максимальные расходы воды на реках снизились в несколько раз, естественная расчистка водным потоком русел практически прекратилась [Дмитриева, 2020]. На реках бассейна р. Дон в летний период уже произошло и продолжается зарастание русел рек. На заросших участках происходит существенный подъем воды в реках [Шарина, 2017]. Это особенно проявляется на малых реках, что приводит к снижению пропускной способности русел застаиванию и перегреву воды, а как следствие потерям речного стока на испарение и питание плантаций водной растительности.



Рисунок 22. Многолетние изменения объемов забора воды в Воронежской области
Figure 22. Multi-year changes in water withdrawal volumes in Voronezh Oblast

Основные антропогенные мероприятия, оказывающие в разной степени, но в целом существенное изменение естественных условий формирования поверхностных и подземных вод: создание прудов и ГТС, водопотребление. В основном водные ресурсы используются на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды (подземные воды) и производственные нужды

(как правило, поверхностные воды). В эту же группу факторов, влияющих на формирование речного стока, следует отнести зарастание речных русел, так как оно носит природно-антропогенный характер. В результате частичного, но в течение длительного периода времени, смыва удобрений с сельскохозяйственных полей в реки создаются благоприятные условия для развития водной растительности. Зарастание русел, также как и ГТС, способствовало созданию дополнительного подпорного сопротивления для прохождения русловых масс воды. В результате многолетнего эффекта искусственного изменения уклонов продольного профиля реки и водной поверхности произошло изменений условий разгрузки подземных вод.

На рисунке 22 приведены изменения объемов забора воды из водных объектов по материалам докладов о состоянии окружающей среды Воронежской области[2,3,4] и работы [Дмитриева, 2010].

Общая величина забора воды интенсивно снижалась до 2013 г., после которого также снижалась, но не ежегодно и значительно меньшими темпами. В период 2002–2010 гг. объемы забора воды из подземных водных объектов стали превышать объемы из поверхностных. Водозабор из подземных, как и поверхностных источников, снизился к 2011 г., но затем величина изъятия существенно не менялась. Следует напомнить, что летние сезоны 2000−2003 гг. были маловодными по осадкам. Таким образом, к началу маловодной фазы реки и подземные водосборы оказались «ослабленными» в результате интенсивного изъятия ресурсов поверхностных и подземных вод в предшествующий период. А продолжение эксплуатации поверхностных и подземных источников с сохранением примерно одних и тех же (в среднем) объемов изъятия не позволяет им восстановиться, так как изымаются выпадающие малоэффективные осадки, как было рассмотрено выше, и дополнительные объемы.

Выводы

Произошли существенные изменения приходной и расходной составляющих водного баланса, а также соотношения поверхностных и подземных вод на рассматриваемой территории.

Выявлено снижение количества эффективных осадков, обусловливающих поверхностный сток, на ~18 % и годового слоя стока р. Битюг на 10−20 мм

Суммарный слой стока весеннего половодья р. Битюг уменьшился в среднем в 1,6 раза. Эффект повышения зимнего стока за счет увеличения талой составляющей и зимних жидких осадков, улучшение питания подземных вод в зимний период в результате увеличения инфильтрационной способности почвогрунтов достиг своего предела к 2007 г., вызванного длительными маловодными периодами, после чего наблюдается снижение уровней подземных вод.

Продолжительность периода между минимальными осенне-зимними и минимальными предвесенними уровнями воды и периода наибольшего пополнения подземных вод сократилась в среднем на 29−30 дней, указывает на ускорение истощения запасов подземных вод в межсезонный период года в связи со снижением объемов питания.

Произошли существенные внутрисезонные изменения режима снегонакопления и снеготаяния. Продолжительность существования запирающего слоя с 1990-х гг. уменьшилась в 2−3 раза. По данным наблюдений на ВБС Каменная Степь увлажнение верхнего метрового слоя в последнее десятилетие уменьшилось в среднем на 35–40 мм. Основными причинами наблюдаемых изменений являются внутригодовое перераспределение осадков и повышение температуры воздуха, в результате

[2] Доклад о состоянии окружающей среды на территории Воронежской области в 2019 году. URL: https://2uch.ru/textbooks/bes/onours/vearsngobie?ysclid=lo1k83n0r9649957157#A14 (дата обращения 22.10.2023)

[3] Доклад о состоянии окружающей среды на территории Воронежской области в 2021 году.URL: http://ooptvrn.ru›video/3.pdf (дата обращения 22.10.2023).

[4] Воронежская область в цифрах. Краткий статистический сборник. Воронеж. 2022. 84 с. URL: 36.rosstat.gov.ru›storage/mediabank/Воронежская (дата обращения 22.10.2023

чего возросла продолжительность периода испарения с поверхности почвы.

С 1981 г. годовое подземное питание р. Битюг стало сопоставимо с максимальным стоком и даже превышает его в отдельные годы после 2007 г. Вклад годового подземного питания рек в годовой сток увеличился с 1980 г. в 1,7−2 раза.

Нет никаких сомнений в том, что изменения в тепловых и водных характеристиках будут продолжать влиять на изменения в водном балансе территорий, однако, интенсивная антропогенная нагрузка разного характера на поверхностные и водные объекты препятствует их восстановлению после периодов с дефицитом по водности.

Литература

Абанина О. А., Киввa С. Ю. К 130-летию организации «Особой экспедиции…» // Воронежский агровестник, 2022. № 5 (230). С. 31−32.

Бажин Н.А, Химин Н.М. Влияние водопоглотительной способности почв на потери весеннего половодья на балых водосборах басс.р.Дон). // Труды ГГИ, 1980. Вып. 268. С.99−105.

Боревский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Монография. 2-е изд., перераб. И до.-К.: Выща шкл.Головное изд-во, 1989. 407 с.

Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662.

Дмитриева В.А. Структура использования водных ресурсов в Воронежской области. //Водное хозяйство. 2010. №5. С. 28-39.

Дмитриева В.А. Современные изменения водного режима и морфометрии рек Верхнедонского бассейна. Известия РАН. Серия географическая, 2020, Т. 84, № 1, стр. 103-113. DOI: 10.31857/S2587556620010070

Журавин С.А. Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России. Монография. СПб.: ООО «РИАЛ», 2022. 224 с.

*Калюжный И.Л., Лавров С.*А. Гидрофизические процессы на водосборе. Монография. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.

Лебедева М.Г. и др. Изменения условий атмосферной циркуляции и региональные климатические характеристики на рубеже XX-XXI вв. (на примере Белгородской области) Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки, 2017. №18(267), вып.40. С. 157-163.

References

Abanina O. A., Kivva S. Y. K 130-letiyu organizatsii «Osoboy ekspeditsii…» [On the 130th anniversary of the organization of the "Special Expedition ..."]. *Voronezhskiy agrovestnik [Voronezh Agricultural Bulletin],* 2022, no. 5 (230), pp.31−32.

Bazhin N.A., Khimin N.M. The influence of soil water absorption capacity on the loss of spring flood in the Baltic basin catchments R. Don. *Trudy GGI [The works of GGI],* vol. 268, 1980, pp. 99−105.

Borevskiy B.V., Drobnokhod N.I., Yazvin L.S. Estimation of groundwater reserves. *Monografiya [the Monograph],* 2nd ed., revision. And up-K.: Vyshcha shkl.Golovnoe izdvo, 1989, 407 p.

Czikowsky, M.J. and D.R.Fitzjarral. Evidence of seasonal changes in evapotranspiration in Eastern U. S. hydrological records. *J. Hydrometeorol [J. Hydrometeorol],* no 5, 974–988, DOI:10/1175/1525-7541(2004)005<0974:EOSCIE> 2.0.CO:2/

Dmitrieva V.A. The structure of water resources use in the Voronezh region. *Vodnoe hozyajstvo [Water management],* no.5, 2010, pp.28−39.

Dmitrieva V.A. Modern changes in the water regime and morphometry of the rivers of the Upper Don basin. *Izvestiya RAN [News of the Russian Academy of Sciences],* Geographical series, 2020, vol. 84, no 1, pp. 103−113. DOI: 10.31857/S2587556620010070

Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Modern and scenario changes in river flow in the Don basin. *Vodnye resursy [Water resources],* 2020, vol. 47, no 6, pp. 651−662.

Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A. Hydrophysical processes in the catchment area. *Monografiya [Monograph].* St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2012, 615 p.

Lebedeva M.G. et al. Changes in atmospheric circulation conditions and regional climatic

URL:http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/22405/1/Lebedeva_Izmeneniya.pdf (дата обращения 1.12.2023)

Методические рекомендации по оценке подземного притока в реки. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 94 с.

Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. Научно-прикладной справочник. СПб.: ООО «Риал», 2021. 202 с.

Ресурсы поверхностных вод. Том 7. Донской район. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 459 с.

Поздняков С.П. и др. Ретроспективный анализ многолетних колебаний уровней воды в Докучаевском колодце в Каменной степи/ Вестник МГУ. Серия 4, Геология 2023. С.110-126. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-4-110-126.

Шарина Ю.В. Методика оперативного учета стока в условиях зарастания русла (на примере реки Матыра в створе села Крутое). Водное хозяйство России. №2, 2017. С.73-92. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-2-6.

Czikowsky, M.J. and D.R.Fitzjarral. Evidence of seasonal changes in evapotranspiration in Eastern U. S. hydrological records. J. Hydrometeorol, no 5, 974–988. DOI:10/1175/1525-7541(2004)005<0974: EOSCIE>2.0.CO:2.

River flow in the near future: a global perspective in the context of a high-emission climate change scenario/ Omar V. Müller, Patrick C. McGuire, Pier Luigi Vidale, and Ed Hawkins. Articles. Volume 28, issue 10. HESS, 28, 2179–2201, 2024. DOI:10.5194/hess-28-2179-2024.

characteristics at the turn of the XX-XXI centuries (on the example of the Belgorod region) *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific Bulletin of the Belarusian State University]. Ser*. Natural Sciences, 2017, no 18(267), issue 40, pp. 157−163, URL: http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/22405/1/Lebedeva_Izmeneniya.pdf (accessed 1.12.2023)

Metodicheskie rekomendacii po ocenke podzemnogo pritoka v reki [Methodological recommendations for the assessment of underground inflow into rivers], L.: Hydrometeoizdat, 1991, 94 p.

Pozdnyakov S.P. et al. A retrospective analysis of long-term fluctuations in water levels in the Dokuchaevsky well in the Stone Steppe. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Moscow State University]*. Series 4, Geology 2023, pp.110−126. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-4-110-126.

R Omar V. Müller et al. River flow in the near future: a global perspective in the context of a high-emission climate change scenario. *Articles.* vol. 28, issue 10, HESS, 28, 2179–2201, 2024, DOI:org/10.5194/hess-28-2179-2024

Long-term changes in the elements of the water balance at water balance and swamp stations. *Nauchno-prikladnoj spravochnik. [Scientific and applied reference book].* St. Petersburg: Real LLC, 2021, 202 p.

Sharina Yu.V. The methodology of operational flow accounting in the conditions of overgrowth of the riverbed (using the example of the Matyr River in the village of Krutoe). *Vodnoe hozyajstvo Rossii [The water industry of Russia],* no.2, 2017, pp.73−92, DOI: 10.35567/1999-4508-2017-2-6

Resursy poverhnostnyh vod [Surface water resources]. vol. 7, Donskoy district, L. Hydrometeoizdat, 1973, 459 p.

Zhuravin S.A. Investigation of moisture turnover processes at water balancing stations in Russia. *Monografiya [Monograph],* St. Petersburg: REAL LLC, 2022, 224 p.

УДК 556.535.3; 556.542; 551.468.6 DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.191

ОЦЕНКА СТОКА РЕК ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА С УЧЕТОМ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Р.Я. Миньковская[1]*, С.В. Наривончик[1], И.А. Свищева[1], Д.А. Антоненков[1], А.Н. Демидов [2]**

[1] Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, Россия; [2]Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова г. Севастополь, Россия

e-mail: *rosmink@yandex.ru, **sev-oazis@mail.ru

Аннотация. Изменчивость стока рек юго-западного Крыма зависит от природных и антропогенных бассейновых факторов, которые в основном не учитываются при оценке норм стока и поступления воды на устьевые взморья рек. Данные гидропостов Росгидромета (по 2 на каждой реке), находящихся в 7–38 км от вершин морских устьев рек, недостаточны для получения достоверных оценок стока, балансовых расчетов, а также прогноза опасных процессов и явлений ниже пунктов стационарных наблюдений.

Цель работы – выявить закономерности изменчивости стока рек Черная, Бельбек, Кача и Альма от истоков до вершин устьев с начала регулярных наблюдений до настоящего времени.

Материалы и методы. Использовались статистические методы анализа и математическое моделирование на основе гидравлической модели стока, разработанной в МГИ РАН. Обобщались данные гидрометеорологических наблюдений сетевых подразделений Крымского УГМС в бассейнах рек за 1931–2020 гг. и результаты специальных исследований МГИ РАН в 2017–2024 гг. в низовьях рек. При этом учитывались природная цикличность речного стока и изменение уровня антропогенной нагрузки.

ASSESSMENT OF RIVER FLOW IN SOUTHWESTERN CRIMEA GIVEN NATURAL AND ANTHROPOGENIC CHANGES

Roza Ya. Minkovskaya[1] *, Svetlana V. Narivonchik[1], Irina A. Svishcheva[1], Dmitriy A. Antonenkov[1], Alexander N. Demidov [2]**

[1] Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences", Sevastopol, Russia; [2] Sevastopol branch of the Federal State Budgetary Institution "State Oceanographic Institute named after N.N. Zubov" Sevastopol, Russia

e-mail: *rosmink@yandex.ru, **sev-oazis@mail.ru

Abstract. The variability of river flow in southwestern Crimea depends on natural and anthropogenic basin factors that are often overlooked when assessing the standards of water flow and inflow to the estuaries of the rivers. Data from Russian Hydrometeorological Service's gauging stations (2 on each river), located 7–38 km upstream from the tops of the sea estuaries, are insufficient to obtain reliable estimates of flow, balance calculations, and forecasts of dangerous processes and phenomena below the stationary observation points.

The aim of the study is to identify patterns of variability in the flow of the Chernaya, Belbek, Kacha and Alma rivers from the sources to the tops of the estuaries from the beginning of regular observations to the present.

Materials and methods. Statistical analysis methods and mathematical modeling based on the hydraulic flow model developed at the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences were used. The data of hydrometeorological observations of the network units of the Crimean Hydrometeorological Service in river basins for 1931–2020 and the results of special studies of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences in 2017-2024 in the lower

Выводы. В современный климатический период (1991–2020 гг.) зарегулированный сток рек значимых тенденций не имел. Модуль стока уменьшался на 40–85 % при увеличении площади бассейна из-за закарстованности, дефицита боковой приточности, потепления климата и увеличения антропогенной нагрузки. Установлено, что в последние годы невязки стока между нижними гидропостами Росгидромета и створами в вершинах морских устьев указанных рек изменялись от 25 до -90 %. Удовлетворительное совпадение результатов моделирования изменчивости речного стока с натурными данными позволяет оценить его трансформацию в любом створе русловой сети, давать прогноз паводочного стока, а также повысить качество балансовых оценок состояния устьев рек и прилегающей части моря при увеличении водозабора, вариациях стока и изменении климата.

Ключевые слова: Севастопольский регион; река Альма; река Кача; река Бельбек; река Черная; норма и изменчивость стока; тенденции водоносности; обводненность водосборов; гидравлическое моделирование стока.

reaches of rivers were summarized. At the same time, the natural cyclicity of river flow and changes in the level of anthropogenic load were taken into account.

Conclusions. In the actual climatic period (1991–2020) the regulated river flow had no significant trends. The flow modulus decreased by 40–85 % with an increase in the basin area due to a continuous karst formation, lack of lateral inflow, climate warming and an increase in anthropogenic load. It has been established that in recent years, the flow discrepancies between the lower hydrometeorological posts and the openings at the tops of the sea mouths of these rivers have varied from 25 to -90 %. The satisfactory results agreement of the river flow variability modeling with field data makes it possible to assess its transformation in any site of the riverbeds, predict peak flow and improve the quality of balance assessments of the conditions of the river mouths and the adjacent part of the sea with increased water intake, flow variations and climate change.

Keywords: Sevastopol region; the Alma river; the Kacha river, the Belbek river; the Chernaya river; flow rate and variability; water content trends; river basin water cut; hydraulic flow modeling.

Введение

Режим и качество воды разнотипных морских устьев паводко- и селеопасных рек юго-западного Крыма (рисунок 1) формируются под влиянием моря, рек, суши, атмосферы и хозяйственной деятельности. Водная среда Черного моря, в силу ее инерционности, в меньшей степени подвержена природно-антропогенным изменениям, чем бассейны и сток малых рек, являющийся интегральным фактором функционирования геоэкосистем, эволюции устьев, основным предиктором для балансовых и прогнозных оценок. Процессы, изменяющие водосбор малой реки, быстрее отражаются на ее стоке и водном режиме устьевого участка, чем медленно развивающиеся климатические процессы или морские факторы. Поэтому состояние бассейна малой реки, подвергающегося антропогенным преобразованиям, является одним из приоритетных факторов формирования стока, его трансформации и транзита в устье [Водогрецкий, 1990; Бортновский 2021].

Расход (сток) воды, измеряемый и рассчитываемый в гидрометрических створах гидропостов (г/п) Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» Росгидромета (КрымУГМС), не всегда тождественен количеству воды, поступающей в морские устья рек. Измерения расхода воды в вершинах устьев рек юго-западного Крыма ранее не производились, поэтому вынос реками воды, тепла, веществ и гидробионтов в устья и море может оцениваться только приближенно: либо в «замыкающих» створах (самых нижних) г/п Росгидромета (рисунок 1), либо приниматься по результатам физико-математического моделирования [Иванов, Прусов, 2006; Беликов, Алексюк, 2020].

Minkovskaya R. Ya., Narivonchik S. V., Svishcheva I. A., Antonenkov D. A., Demidov A. N. Assessment of river flow in southwestern Crimea given natural and anthropogenic changes. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 2, pp. 191–213. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.191

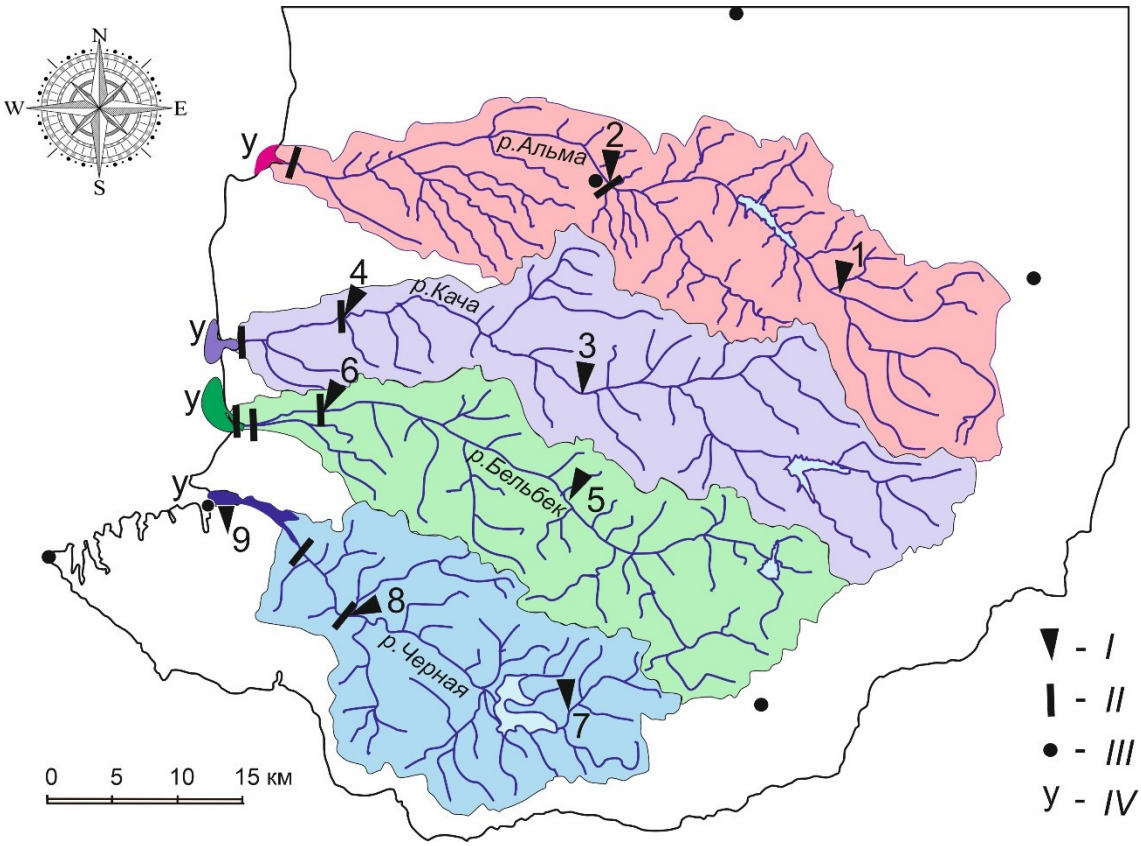


Рисунок 1. Сеть гидрометеорологических наблюдений в районе исследований
I – пункты наблюдений Росгидромета: 1 – выше вдхр. Партизанского; 2 – пгт. Почтовое; 3 – с. Баштановка; 4 – с. Суворово; 5 – пгт. Куйбышево; 6 – с. Фруктовое; 7 – с. Родниковское; 8 – с. Хмельницкое; 9 – г. Севастополь; *II* – гидростворы в устьях рек в период экспедиций МГИ РАН в 2017–2024 гг.; *III* – метеостанции Росгидромета; *IV* – морские устья рек

Figure 1. Network of hydrometeorological observations in the research area
I – observation points of Russian Hydrometeorological Service: 1 – above the Partizanskoe water basin; 2 – uts. Pochtovoe; 3 – v. Bashtanovka; 4 – v. Suvorovo; 5 – uts. Kuibyshevo; 6 – v. Fruktovoe; 7 – v. Rodnikovskoe; 8 – v. Khmelnitsky; 9 – c. Sevastopol; *II* – hydraulic structures in river mouths during the expeditions of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences in 2017–2024 years; *III* – weather stations of Russian Hydrometeorological Service; *IV* – sea estuaries

Недостаток знаний об изменчивости стока малых рек и ее причинах снижает достоверность оценок состояния устьев рек, возможных изменений количества и качества воды, поступающей в них и прилегающую часть моря, что может привести к негативному влиянию экстремального стока на природную и социальную среду в условиях климатических и антропогенных изменений [Магрицкий, 2014].

Цель работы – выявить закономерности изменчивости стока рек юго-западного Крыма под влиянием природно-антропогенных факторов. Для этого анализировались изменения руслового стока рек Альма, Кача, Бельбек и Черная в створах г/п Росгидромета в разные климатические периоды, а также трансформация стока между ними и вершинами морских устьев рек (рисунок 1) в последнее десятилетие по натурным данным Отдела гидрофизики шельфа Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт» РАН (МГИ РАН) и с помощью математического моделирования.

Малые реки юго-западного Крыма имеют идентичную экспозицию водосборов (рисунок 1) и сходные условия формирования стока. До его зарегулирования водохранилищами, в нижнем течении реки иногда пересыхали, а при катастрофических паводках уровень воды поднимался на 2–4 м, и затопления пойм приносили существенный ущерб. В настоящее время сток всех рек зарегулирован водохранилищами и поэтому более равномерно распределяется внутри года.

Исследование стока крымских рек актуализируется в связи с проблемами водообеспечения растущего населения полуострова [Олиферов, 2015], включая Севастопольский регион, климатическими изменениями, имеющими циклический характер, и катастрофическими явлениями, отражающимися на состоянии как бассейнов рек, так и на их устьях, а также прилегающих частях Черного моря [Миньковская, 2020].

Оценка ресурсного потенциала рек юго-западного Крыма и анализ изменчивости их стока по длине русел усложняется особенностями формирования и транзита речной воды, обусловленными наличием карста и специфическими условиями взаимосвязи поверхностного и подземного стока на различных участках водотоков [РПВ СССР, 1966]. Снижают качество оценки модулей стока и их изменений от истоков к морским устьям рек следующие основные факторы: чередование зон поглощения поверхностного стока на участках русел, сложенных закарстованными или водопроницаемыми породами, с участками выхода карстовых вод или дренирования реками водоносных горизонтов; наличие зон затопления пойм и одамбованных участков русел; водозаборы и сбросы сточных вод в реки, которые не всегда контролируются и учитываются; сложность в определении площадей водосборов рек, питающихся родниковыми и карстовыми водами, имеющими свои значительные подземные водосборы, площади которых не поддаются точному определению.

Запросы хозяйственной деятельности, активизирующейся на побережье, не удовлетворяются из-за отсутствия гидрологических данных в низовьях рек. Это приводит к размыву дамб, заилению русел, ущербу при затоплении и подтоплении застроенных территорий, коммуникаций и сооружений при паводках, осушке водозаборов и ухудшению экологических условий при засухе, что требует финансовых затрат на ликвидацию последствий негативных природных явлений. Недостаток наблюдений или некачественное обобщение натурных данных снижают достоверность приводимых в литературе норм стока и физико-математического моделирования [Иванов, Прусов, 2006], особенно в случаях, когда на различных участках малой реки нарушается связь между модулем стока и площадью водосбора или она изменяется в зависимости от фазы водного режима реки [РПВ СССР, 1966; Устойчивый Крым, 2003]. Широкий спектр математических моделей, представленный в фундаментальной работе [Беликов, Алексюк, 2020], в МГИ РАН для малых рек Крыма не реализован из-за сложности их водного режима, рельефа водосборов, ограниченных вычислительных мощностей и недостатка натурных данных.

Исследования стока рассматриваемых рек многочисленны ([РПВ СССР, 1966; Тимченко, 2002, 2008, 2009; Устойчивый Крым, 2003; Поверхностные водные объекты Крыма, 2004; Олиферов, 2005; Иванов, Прусов, 2006; Олиферов, 2015; Болгов, Зайцева, 2017; Иванютин, 2019; Богуцкая и др., 2020; Обязов, Виноградов, 2022; Косицкий, Богуцкая, Гречушникова, 2022; Табунщик, 2022] и другие), но в основном ограничены обобщением характеристик стока (расхода воды, модуля и слоя стока, экстремумов) в отдельных створах, за различные периоды, чаще всего без учета климатической цикличности гидрометеорологических характеристик, от которых зависит водоносность рек и обводненность их водосборов, а также длины и однородности рядов наблюдений, нарушенной хозяйственной деятельностью или переносом гидрометрических створов. Зачастую период обобщения не указывался. Рассчитанные по таким рядам нормы стока иногда вызывают сомнение.

Взаимозависимость и взаимосвязь между бассейновыми (стоком, ландшафтом) и морскими факторами (уровнем моря, состоянием побережья) в зоне контакта суша–море обусловливают необходимость использования

бассейнового подхода при анализе изменчивости стока рек, поступающего в устья и море. Климатические и антропогенные изменения, происходящие в бассейнах рек, отражаются на их устьях, а изменение базиса эрозии или хозяйственная деятельность в устьях рек и прибрежной зоне моря приводят к изменению русловых процессов на значительном протяжении малой реки [Schumm, 1993]. Поскольку речной сток – основной геосистемно-бассейновый фактор, влияющий на устья, данная работа ограничена исследованием изменчивости в пространстве и времени только русловой составляющей стока, что представляет интерес для развития науки о морских устьях рек, гидрологии, океанологии, геоэкологии и смежных наук. Полученная современная характеристика изменчивости стока рек юго-западного Крыма может использоваться в качестве базы для верификации моделей трансформации стока малых рек, организации и усовершенствования природопользования в Севастопольском регионе, проектных разработок, планирования мероприятий по предотвращению социально-экономических ущербов, риски которых в устьях рек во время паводков и засух максимальны.

Материалы и методы

Для обобщения использовались материалы наблюдений на 8 г/п КрымУГМС на реках Альма (выше Партизанского водохранилища, пгт. Почтовое), Кача (с. Баштановка, с. Суворово), Бельбек (пгт. Куйбышево, с. Фруктовое) и Черная (с. Родниковское, с. Хмельницкое) с 1931 по 2020 гг., а также результаты специальных экспедиционных исследований МГИ РАН в девяти створах указанных рек в 2017–2024 гг. (рисунок 1). Данные наблюдений за стоком крымских рек как ранее [РПВ СССР, 1966], так и теперь [Поверхностные водные объекты Крыма, 2004; Обязов, Виноградов, 2022] считаются ориентировочными.

На стационарных гидропостах учитывается только поверхностный русловой сток. Однако по данным исследований [РПВ СССР, 1966] в верховьях рек на него приходится менее 30 % годового стока. Большая часть выпадающих осадков питает подземный и подрусловой сток. В нижнем течении рек и в вершинах их устьев количество воды, поступающее в русловую сеть, подземные горизонты и пойму (при паводках и половодье), неизвестно.

В разные годы наблюдения на этих реках и их притоках осуществляли 46 гидропостов, но, после оптимизации системы наблюдений Росгидромета, их количество сократилось почти в 6 раз. С 1991 г. на каждой из указанных рек действует по 2 гидропоста (рисунок 1), нижние из которых (Нг/п) расположены, по данным [ГВК, 1980], на расстоянии 6,5–38 км от устьев (таблица 1). В вершинах морских устьев рек гидрометрические измерения ранее не производились. Это было одной из причин недостаточно точной оценки речного стока, поступающего в устья и прилегающие к ним части моря.

Исследовались следующие основные характеристики русловой составляющей многофакторного процесса стока: средний многолетний, средний месячный, средний суточный и измеренный расходы воды ($м^3/с$) – показатели водоносности реки; средний многолетний модуль стока ($л/с\ км^2$), характеризующий среднюю многолетнюю обводненность водосбора реки.

В вершинах устьев рек юго-западного Крыма МГИ РАН выполнено 30 измерений расхода воды. При этом, на пониженный и повышенный сток рек пришлось по 22 % измерений, а 56 % измеренных расходов воды (ИРВ) были близки к средним многолетним значениям. Максимальные расходы воды р. Черной, измеренные на г/п Хмельницкое в период паводка 19–23.01.2024, в построении зависимостей не использовались, так как из-за прорыва дамбы (принятой за вершину морского устья реки), затопления и подтопления поймы ниже с. Хмельницкого, нарушилась однородность рядов наблюдений.

Метеорологические данные, репрезентативные для оценки изменчивости климатических условий низовьев и устьев рек, анализировались по материалам наблюдений морской гидрометеостанции Севастополь (МГ-II Севастополь). Для анализа метеорологических характеристик в области формирования стока рек юго-западного Крыма использовались данные

наблюдений на метеостанции, расположенной на горе Ай-Петри (МСТ Ай-Петри), входящей в состав Ай-Петринской яйлы Крымских гор. С целью обеспечения достоверности оценки изменчивости метеорологических факторов стока рек в рассматриваемом регионе дополнительно оценивались тенденции средней годовой температуры воздуха и годовой суммы осадков по материалам наблюдений на ближайших метеостанциях: Симферополь, Почтовое, Ангарский Перевал и Херсонесский Маяк (рисунок 1).

Таблица 1. Перечень гидрологических постов Росгидромета в бассейнах рек по данным, приведенным в [Государственный водный кадастр, 1980]

Table 1. List of hydrological posts of Russian Hydrometeorological Service in river basins according to the data given in [State Water Cadastre, 1980]

Река – пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Отметка нуля поста, м БС	Период действия
Альма – выше вдхр. Партизанское*	55,0	184	290,10	01.11.1966–03.06.2014
Альма – пгт. Почтовое	38,0	374	150,47	с 01.02.1927
Кача – с. Баштановка	36,0	321	155,13	с 18.02.1928
Кача – с. Суворово	10,0	525	19,60	с 21.07.1915
Бельбек – пгт. Куйбышево	35,0	270	145,69	с 06.07.1924
Бельбек – с. Фруктовое	6,50	493	9,80	с 22.10.1915
Черная – с. Родниковское*	32,6	47,6	260,50	с 01.07.1916
Черная – с. Хмельницкое	11,0	342	14,49	с 01.06.1941

* Квазиестественные условия формирования стока.

Ошибки средних многолетних значений расхода воды, температуры воздуха и осадков за рассматриваемые периоды составляли 5–16 %.

Проверка рядов наблюдений на нормальность распределения выполнялась с помощью теста Shapiro–Wilk [Shapiro, Wilk, 1965], анализ однородности и стационарности – по критериям Стьюдента и Фишера при 5 %-м уровне значимости [Методические рекомендации, 2010]. Временные ряды среднего годового расхода воды, длиною 75–100 лет, на основе генетического и статистического анализа исходных данных, были разделены на отдельные однородные статистические совокупности, границы которых соответствовали периодам, рекомендованным Всемирной метеорологической организацией [Руководство по климатологической практике, 2018]. Такой выбор периодов осреднения данных обоснован: анализом естественной цикличности гидрометеорологических характеристик; различной направленностью тенденций средней годовой температуры воздуха и годовой суммы осадков в области формирования стока; различиями в уровне использования водных ресурсов рек юго-западного Крыма в рассматриваемый 90-летний период.

Первый климатический период, с начала регулярных наблюдений до сооружения на реках или их притоках крупных водохранилищ, характеризовался режимом стока, близким к естественному. В этот период не на всех реках были непрерывные ряды наблюдений, поэтому пропуски в них восстанавливались по корреляционным зависимостям, имеющим коэффициенты корреляции (0,86–0,98). Обобщение гидрологических характеристик выполнялось за 1931–1960 гг. для всех пунктов наблюдений, кроме г/п Хмельницкое (р. Черная), так как однородность ряда наблюдений здесь была нарушена из-за сооружения Чернореченского водохранилища в 1956 г. Подтвердилось, установленное специалистами КрымУГМС, нарушение однородности рядов гидрологических наблюдений в результате сооружения, наполнения и стабилизации работы водохранилищ и прудов на исследуемых реках, отразившееся на гидрологических характеристиках во втором периоде. Этот период, 1961–1990 гг., с установившимся режимом зарегулированного

стока рек, на 100 % однороден только на р. Черной, так как сооружение водохранилищ на других реках происходило в разные годы второго периода. Поэтому обобщались ряды средних годовых и средних месячных расходов воды рек за: 1964–1990 гг. (р. Бельбек), 1966–1990 гг. (р. Альма) и 1983–1990 гг. (р. Кача). Третий, 30-летний климатический период, 1991–2020 гг., рассмотрен более подробно. Его выбор обусловлен рекомендациями ВМО [Руководство по климатологической практике, 2018], анализом изменчивости гидрометеорологических характеристик и гелиофизических факторов [Наривончик и др., 2022; National Weather Service, 2024[1]], значительными изменениями средней месячной и средней годовой температуры воздуха в Крыму[2] по сравнению с предыдущим периодом. Правильность выбора современного периода для обобщения данных подтверждается авторами работы [Косицкий и др., 2022], установивших, с помощью "Pettitt's test" [Pettitt, 1979] и анализа разностных интегральных кривых годового стока крымских рек, значимое нарушение стационарности рядов среднего многолетнего стока рек Черная и Альма, предположительно с 1991 г. Последний период, ограниченный 2020 г. (так как начался новый, 25-й солнечный цикл[2], обусловливающий изменение гидрометеорологического режима в будущем), полностью охвачен наблюдениями за исключением г/п выше вдхр. Партизанского на р. Альме, закрытом в 2014 г. (таблица 1). В каждом климатическом периоде отмечалось по три совокупности маловодных и многоводных лет. В границах выбранных временных интервалов ряды наблюдений за стоком рек однородные, стационарные и подчиняются нормальному закону распределения. Оценка значимости тенденций выполнялась по критерию Фишера для вероятности неравенства нулю углового коэффициента линейного тренда на уровне 95 % [Пановский, Брайер, 1972].

Для оценки тесноты связи использовался коэффициент корреляции Пирсона, его достоверность оценивалась по *t*-критерию для уровня значимости 0,01 [Елисеева, Юзбашев, 2004], и корреляционное отношение, оцениваемое по шкале Эванса [Лучшева, 1983].

Вершины устьев рек установлены приближенно, по дальности распространения нагонных явлений в межень. При этом уровень воды измерялся уровнемером, а на г/п – по футштокам. При определении расположения гидрометрических створов в вершинах устьев рек учитывались геоморфологические особенности устьевых участков, наличие на них мостовых переходов и плотин, препятствующих влиянию морских факторов на водотоки.

Расстояния определялись по спутниковым картам Yandex.ru[3] и картам Севастопольского участка гидрографической службы Черноморского флота Российской Федерации, а гидрометрические характеристики низовьев рек измерялись во время проведения натурных исследований сотрудниками МГИ РАН. Уточненные данные несколько отличаются от данных Государственного водного кадастра [ГВК, 1980], приведенных в таблице 1.

Модули стока в верховьях закарстованных рек могут быть завышены из-за неточного определения водосборных площадей, информация о которых взята из [ГВК, 1980]. Например, в верховьях р. Черной, истоком которой считается Скельский источник, площадь его водосбора может быть существенной, но она не включается в площадь водосбора реки, что, возможно, приводит к завышению значения модуля стока на г/п в с. Родниковском (рисунок 1). Следовательно, зависимость модуля стока этой реки от площади водосбора может быть недостаточно точной.

Расход воды в период натурных исследований определялся методом «скорость–площадь» [Лучшева, 1983]. Для измерения

[1] National Weather Service. NOAA US Department of Commerce. // Hello Solar Cycle 25. URL: https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle (дата обращения: 06.09.2024).

[2] Сравнительный анализ изменения температуры воздуха на территории Крыма за два последовательных 30-летних климатических периода [Электронный ресурс] // Федеральное государственное бюджетное учреждение "Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды". URL: https://meteo.crimea.ru/?page_id=7898&ysclid=lvf12vqj3k9822245 (дата обращения: 02.05.2024).

[3] Яндекс Карты. URL: https://yandex.ru/maps (дата обращения 22.01.2024).

скорости течения в вершинах морских устьев рек и на ближайших к ним г/п Росгидромета применялся упрощенный метод. Скорость течения измерялась гидрометрической вертушкой, маркерами-поплавками, а также методом видео-регистрации, апробированном при измерении на реках юго-западного Крыма и подробно изложенным в [Antonenkov, 2024]. Обработка файлов изображений поверхности потока, полученных видеокамерой, выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения, основанного на *PIV*-методе (Particle Image Velocimetry) [4]. Этапы такой обработки натурных данных за 26.06.2024, полученных методом видео-регистрации скорости потока в вершине устья р. Качи, показаны на рисунке 2. Сходимость результатов измерений скорости течения поплавками-маркерами, вертушкой и методом видео-регистрации удовлетворительная, ошибки в основном не превышали ±10 %.

Сравнение расходов воды на гидропостах Росгидромета, измеренных МГИ РАН в период экспедиций, с ежедневными расходами воды, определяемыми КрымУГМС по зависимостям $Q = f(H)$ расхода воды (Q) от уровня воды (H), показало, что отклонения между ними находятся в пределах от -3 до +20 %, а средняя ошибка составляет -1,4 %.

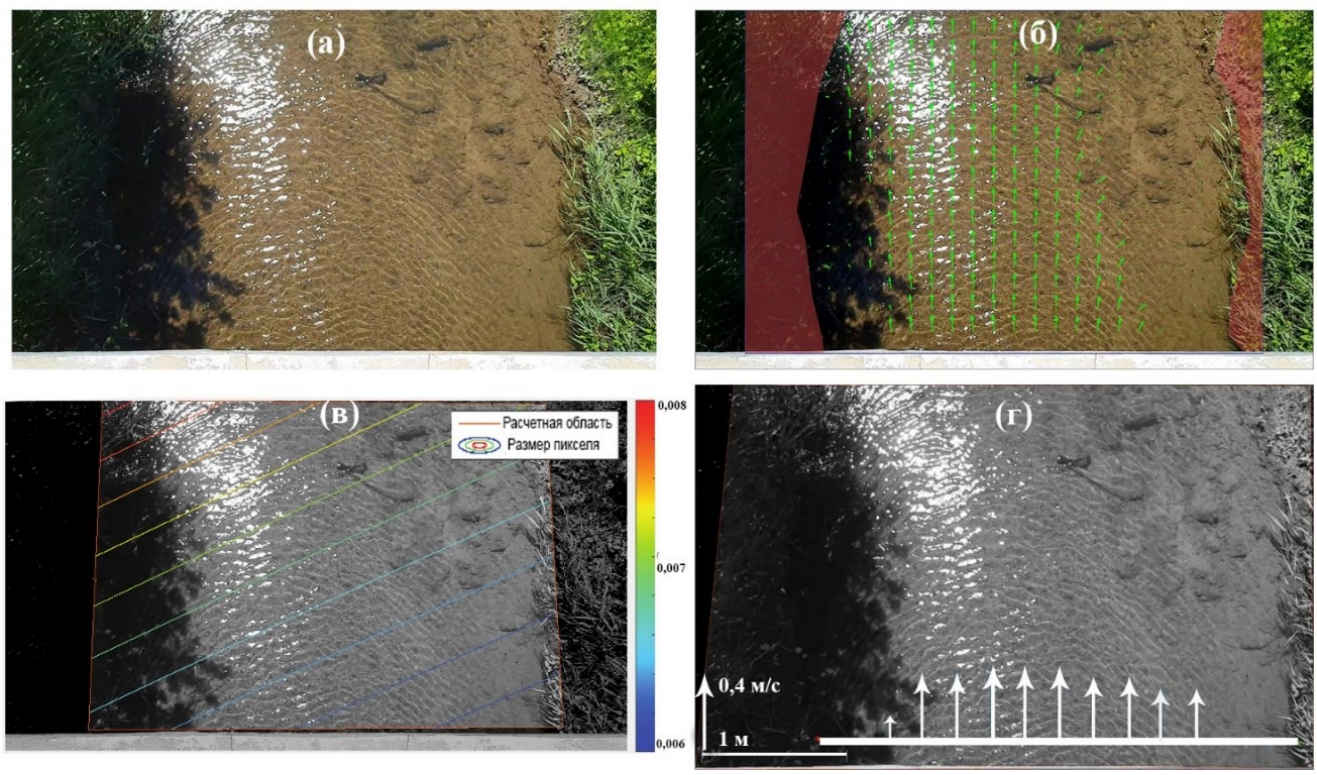


Рисунок 2. Определение скорости течения поверхностного слоя воды в вершине устья р. Качи 26.06.2024 методом видео-регистрации: (а) – полигон в вершине устья реки; (б) – распределение скорости течения; (в) – определение размера пикселя; (г) – эпюра скорости в гидростворе, м/с

Figure 2. Determination of the flow velocity of the surface layer of water at the top of the mouth of the Kacha River on 26.06.2024 by video recording method: (a) is the testing area at the top of the river mouth; (b) is the distribution of the current velocity; (c) is the determination of the pixel size; (d) is the velocity plot in the hydraulic fluid, m/s

Расчет трансформации стока выполнялся с помощью гидравлической модели в редакции А. В. Прусова [Иванов, Прусов, 2006]. В качестве информационной базы использовалась цифровая

[4] Руководство пользователя программы *"ActualFlow"*. Версия 1.18. [Электронный ресурс] / ООО *"СигмаПРО"*. 2016. URL: http://polis-instruments.ru/ (дата обращения: 05.11.2024).

модель рельефа Digital Terrain Elevation Data (Level 1)[5]. Каждой ячейке равномерной сетки с пространственным разрешением 3″ соответствовала система трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, составленных для склоновой, русловой и подземной составляющих стока. В качестве входных данных гидравлической модели принимались: средние годовые суммы осадков в единицу времени на метеостанциях рассматриваемого региона (рисунок 1), сведения об испарении, инфильтрации [Миньковская, 2020], типе подстилающей поверхности [Иванов, Прусов, 2006] и использовании водных ресурсов[6]. Выходные данные модели включали: средний годовой расход воды в любом створе реки, среднюю скорость течения и «время добегания» воды между створами. Полученное распределение стока рек согласуются с композитными полями средних годовых величин стока, представленными в [Fekete, Vörösmarty, Grabs, 1999]. Предпринятое математическое моделирование трансформации среднего многолетнего стока рек от области формирования до области его разгрузки в устьях рек показало удовлетворительную сходимость рассчитанных и наблюденных значений.

Результаты и их обсуждение

Применение геосистемного подхода [Бортновский, 2021] для исследования влияния бассейновых факторов на устьевые процессы на первом этапе реализовано путем анализа изменчивости стока в речных системах юго-западного Крыма на участках, длина которых приведена в таблице 2. Номера гидрометрических створов на границах участков (таблица 2) соответствуют их нумерации на рисунке 1. Некоторые отличия приведенных в таблице 2 размеров рассматриваемых участков от сведений из таблицы 1 обусловлены разными способами определения расстояний и включением в работе [ГВК, 1980] в длину рек их устьевых участков, из-за неопределенности расположения вершин морских устьев рек в 1970–1980-е годы.

Таблица 2. Протяженность исследуемых участков рек (Вг/п – верхний гидроствор; Нг/п – нижний гидроствор; ВМУР – вершина морского устья реки; нумерация г/п по рисунку 1)
Table 2. The length of the studied river sections (Ug/s – the upper gauging station; Lg/s – the lower gauging station; RSMT (ВМУР) – the river sea mouth top; numbering g/s according to Figure 1)

Река	Длина реки, км	Участок от Вг/п до Нг/п	Длина участка, км	Участок от Нг/п до ВМУР	Длина участка, км
Альма	88	1–2	17	ниже 2	37
Кача	69	3–4	26	ниже 4	7,7
Бельбек	63	5–6	28	ниже 6	6,4
Черная	35	7–8	22	ниже 8	7,7

Степень влияния бассейновых факторов на разнотипные устьевые взморья зависит не только от величины стока, но и от соотношения площади устья к площади водосбора реки. Водосборы рассматриваемых рек (рисунок 1) в 330–530 раз больше площадей их устьев. Наибольшее влияние бассейновые факторы (природные и антропогенные) оказывают на устье р. Альмы, наименьшее – на устье р. Бельбек.

Изменчивость климата. Водный режим рек рассматриваемого региона формируется под влиянием гелиофизических, зональных и местных климатических факторов – в основном осадков и температуры воздуха, которые обусловливают другие бассейновые факторы.

В период естественного режима стока, 1931–1960 гг., значимых тенденций средней годовой температуры воздуха и годовой суммы

[5] Digital Terrain Elevation Data (Level 1). 1966. U.S. Geological Survey. URL: http://edc2.usgs.gov/geodata/index.php
[6] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов. 2014. URL: https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505 (дата обращения 19.07.2023).

осадков, по данным МГ-II Севастополь и МСТ Ай-Петри, не обнаружено.

Во втором климатическом периоде, 1961–1990 гг., средняя годовая температура воздуха в области формирования стока рек юго-западного Крыма (МСТ Ай-Петри) тенденций не имела, а на побережье (МГ-II Севастополь) – в среднем уменьшалась на 0,03 °С в год. В этот период на соседних метеостанциях Крыма (Херсонесский Маяк, Почтовое, Симферополь, Ангарский Перевал) отмечалось похолодание. При этом сумма осадков за год увеличивалась на 3,67 мм/год в Севастополе и уменьшалась на 11,8 мм/год на Ай-Петри (на соседних метеостанциях Крыма она либо не имела тенденций, либо уменьшалась).

В 1991–2020 гг. в результате потепления климата средняя годовая температура воздуха увеличивалась на 0,09 °С в год в верховьях рек и на 0,07 °С в их низовьях [Наривончик и др., 2022], значимых тенденций суммы осадков не выявлено (рисунок 3). Но в 1961–1990 гг. зимы были более снежными, чаще выпадали твердые осадки и формировалось половодье, чем в 1991–2020 гг., когда из-за частых оттепелей зимой преобладали жидкие осадки и паводки.

Увеличение температуры воздуха привело к увеличению испарения как с водной поверхности, так и с суши. Однако это не вызвало увеличения местных осадков, выпадающих на предгорья и северные склоны Крымских гор. Из-за усиления западного переноса воздушной массы, участившихся зимой средиземноморских циклонов, больше осадков стало выпадать на юго-восточном и восточном побережьях Крыма, где и отмечалась тенденция роста осадков [Гидрометеорологические условия морей Украины, 2012].

Для последних 10–15-ти лет характерно уменьшение количества осадков (рисунок 3) и сокращение пресноводных ресурсов на континенте[7], но за-за регулирования стока водохранилищами уменьшение суммы осадков за год на среднем годовом расходе воды рек юго-западного Крыма не сказалось.



Рисунок 3. Изменчивость климатических характеристик на метеостанции Ай-Петри в современный период. T_a – температуры воздуха; h – суммы осадков за год

Figure 3. Variability of climatic characteristics at the Ai-Petri weather station in the actual period. T_a is the air temperature; h is the amount of precipitation per year

Антропогенные факторы изменчивости стока. Реки Кача, Бельбек и Черная (рисунок 1) – основные источники пресной воды в Севастопольском регионе, а р. Альма имеет большое хозяйственно-питьевое и сельскохозяйственное значение для Крыма [Иванютин, 2019]. Сток рек зарегулирован, он питает 57 прудов и 8 водохранилищ. Со второй половины XX в., когда

[7] Chronicling the Active Cosmos. URL: https://www.nasa.gov/ (дата обращения: 12.10.2024).

на реках были сооружены наиболее крупные водохранилища Крыма, однородность рядов наблюдений нарушилась. Сток р. Черной зарегулирован Чернореченским водохранилищем в среднем на 61 %, а в маловодные периоды на 96 % [Олиферов, 2015]. Сведения об основных водохранилищах в бассейнах рек юго-западного Крыма представлены в таблице 3. Бассейны этих рек (рисунок 1) в разной степени преобразованы. Наибольшим антропогенным изменениям подвергся бассейн р. Альмы, наименьшим – бассейн р. Черной [Табунщик, 2022].

Общий объем стока, аккумулированного в водохранилищах сезонного и компенсационного регулирования, составляет около 90 % от суммарного стока в замыкающих створах рек (Нг/п).

Таблица 3. Сведения о водохранилищах в бассейнах рек юго-западного Крыма
Table 3. Information on reservoirs in the river basins of southwestern Crimea

Бассейн реки	Река, ручей	Название	Год наполнения	Объем, млн м^3
Альма	Альма	Альминское	1934	6,20
	Альма	Партизанское	1966	34,4
Кача	Кача	Бахчисарайское	1935	6,89
	Кача, Стиля	Загорское	1983	27,9
Бельбек	Биюк-Узенбаш	Счастливое-1	1964	11,8
	Манаготра	Счастливое-2		
	Карстовый	Ключевское	1956	64,2
Черная	Черная	Чернореченское		

Кроме регулирования стока водохранилищами и прудами, осуществляется водозабор поверхностного и подрусловой стока рек и их притоков, а также сброс сточных вод пятью канализационно-очистными сооружениями. Для водоснабжения Севастопольского региона забирается около 90 % воды из р. Черной.

Изменчивость стока рек по данным гидропостов. В более ранних исследованиях изменчивости среднего многолетнего расхода воды рек юго-западного Крыма приводятся разнородные, иногда противоречивые сведения по одним и тем же гидропостам Росгидромета (таблица 4). Из этих данных вывод о современных нормах стока, в последний климатический период, 1991–2020 гг., сделать затруднительно. По данным таблицы 4 сток рек в основном увеличивался по направлению к устьям, исключая р. Альму, сток которой существенно уменьшался [ГВК, 1980].

Обычно сток рек закономерно увеличивается от истоков к устью, так как увеличивается боковая приточность и врез русла, дренирующего подземные воды. Однако для некоторых малых рек Крыма это не характерно из-за засушливости климата, зарегулированности стока и водозабора, незначительной обводненности овражно-балочной сети в нижнем течении рек в период межени, которая лишь иногда нарушается паводками. Кроме того, в области питания рек, в горных районах, выпадает в 2,5 раза больше осадков, чем в низовьях, а водопотребление меньше. Сток аккумулируется в прудах и водохранилищах, расположенных в горных и предгорных районах, в межень они подпитывают санитарными попусками русловой сток в нижних бьефах. Поэтому после сооружения прудов и водохранилищ в бассейнах рек Черная, Бельбек, Кача и Альма низовья рек перестали пересыхать и масштабы затопления пойм уменьшились.

Обобщение данных наблюдений по трем смежным периодам (1 – 1931–1960 гг., 2 – 1961–1990 гг. и 3 – 1991–2020 гг.), отличающимся климатическими условиями и уровнем хозяйственного освоения водных ресурсов (таблица 5), выявило несоответствие сведениям, приведенным в таблице 4. Во втором климатическом периоде (1961–1990 гг.), после сооружения водохранилищ и прудов, нарушилась однородность рядов наблюдений за стоком рек, поэтому расчетные интервалы в таблице 5 для этого периода были разными и начинались с года (в соответствии с таблицей 3), когда на режим стока стала оказывать влияние эксплуатация водохранилищ.

В первый период, при отсутствии тенденций годовых сумм осадков, сток был близок к естественному и по направлению к устьям водоносность рек увеличивалась.

Таблица 4. Средний многолетний расход воды рек юго-западного Крыма по литературным данным, м^3/с (периоды осреднения – в пределах указанных лет; н.у. – период осреднения не указан)

Table 4. Average long-term water consumption of the rivers of the southwestern Crimea according to the published data, m^3/s (averaging periods are within the specified years; n.s. – the averaging period is not specified)

Река – пункт (рисунок 1)	Литературный источник						
	[ГВК, 1980]	[Тимченко, 2002]	[Поверхностные водные объекты Крыма, 2004]	[Иванов, Прусов, 2006]	[Тимченко, 2008/ /Тимченко, 2009]	[Косицкий и др., 2022]	[Обязов, 2022]
Период осреднения	1915–1975	н.у.	1933–1997	н.у.	н.у. /н.у.	1963–2019	1981–2010
Альма – выше вдхр. Партизанского	1,06		1,20		1,20	1,21**	1,37
Альма – пгт. Почтовое	0,67	1,25*	0,71	1,20	0,71		0,69
Кача – с. Баштановка	1,48		1,18		1,27		
Кача – с. Суворово	1,59	1,64*	1,24	1,70	1,44		1,16
Бельбек – пгт. Куйбышево	1,83		2,07		2,08/2,05		2,02
Бельбек – с. Фруктовое	1,90	2,52*	2,08	2,70	2,08/1,94		2,05
Черная – с. Родниковское	1,44		1,56		1,56	1,75	1,96
Черная – с. Хмельницкое	1,85	2,21*	1,79	1,90	1,78/1,81		1,87

* Сток рек рассчитан для устьевого створа

** Гидропост закрыт в 2014 г.

Сток рек во втором периоде, характеризующемся уменьшением годовой суммы осадков в области его формирования, в разные годы был зарегулирован водохранилищами (таблица 3). В результате внутригодового перераспределения стока и его изъятий, с увеличением водосбора, сток рек Альма и Бельбек уменьшался, а рек Кача и Черная – увеличивался.

В третий период, в условиях существенного увеличения температуры воздуха, отсутствия значимых тенденций сумм осадков (рисунок 3) и стабилизации работы водохранилищ (рисунок 4), с увеличением водосбора отмечалось уменьшение стока р. Альмы на 45 %, р. Качи – на 7 %, а на реках Бельбек и Черная он увеличивался на 4 и 14 % соответственно.

Наиболее изменчив средний годовой расход воды в низовье р. Альмы, наименее – в верховье р. Черной (таблица 5).

В современный период (1991–2020 гг.) по сравнению с периодом естественного режима стока (1931–1960 гг.), из-за испарения с водохранилищ и увеличения водозабора, произошло существенное, на 11–65 %, уменьшение водоносности рек (таблица 5), отмечаемое на всех гидростворах Росгидромета (рисунок 1), кроме г/п Родниковское. Здесь режим и нормы стока по рассматриваемым периодам практически не изменились за последние 100 лет. Следовательно, этот опорный пункт, с длинным и однородным рядом наблюдений, репрезентативен для расчета надежных климатических норм естественного речного стока в рассматриваемом регионе.

В 1991–2020 гг. зарегулированный сток рек значимых тенденций не имел (рисунок 4), хотя в первые 10 лет сток был больше, чем в последнее десятилетие. Отмеченное ранее уменьшение пресноводной составляющей баланса суши [Chronicling the Active[8]] пока не сказалось на стоке рек юго-западного Крыма в нижних бьефах водохранилищ, так как оно компенсировалось искусственным регулированием стока.

При этом очевидно, что регулирование стока р. Черной в последние 10 лет отличалось от регулирования стока остальных рек юго-западного Крыма (рисунок 4) – сбросы воды из Чернореченского водохранилища были более равномерными. Возможно, это связано с возрастающими потребностями г. Севастополя из-за роста населения, отмечающегося с 2014 г. [Миньковская, 2020], что потребовало дополнительного резервирования стока в водохранилище в многоводные годы и лимитирования водопотребления в периоды дефицита водных ресурсов, для минимизации рисков ухудшения экологической ситуации в регионе во время засухи.

Таблица 5. Изменчивость водоносности рек юго-западного Крыма за 1931–2020 гг. (1 – до зарегулирования стока рек; 2 – после зарегулирования стока рек; 3 – современный период; Q – расход воды, м^3/с; M – модуль стока, л/с км^2; ΔQ (ΔM) – изменение среднего многолетнего расхода воды и модуля стока между периодами, %; C_v – коэффициент вариации стока рек в 1991–2020 гг., %)

Table 5. Water content variability of the rivers of the southwestern Crimea in 1931–2020 (1 – before river flow regulation; 2 – after river flow regulation; 3 – actual period; Q – discharge of water, m^3/s; M – flow modulus, l/s km^2; ΔQ (ΔM) – change in the long-term average discharge of water and flow modulus between periods, %; C_v is the coefficient of variation of river flow in 1991–2020, %)

Река – пункт (см. рисунок 1)	Средний годовой расход воды, м^3/с			Изменчивость стока рек и обводненности водосборов, %									
				ΔQ (ΔM)			C_v	ΔQ вдоль рек			ΔM вдоль рек		
Период осреднения	1	2	3	1–2	2–3	1–3	3	1	2	3	1	2	3
Альма – выше вдхр. Партизанского	–	1,02	0,88**	–	-14	–	54						
Альма – пгт Почтовое	1,36	0,58	0,48	-57	-17	-65	91	–	-43	-45	–	-72	-73
Кача – с. Баштановка	1,32	0,74	1,18	-44	–	-11	67						
Кача – с. Суворово	1,37	0,81	1,10	-41	–	-20	72	4	9	-7	-37	-33	-43
Бельбек – пгт Куйбышево	2,13	1,99	1,82	-7	-9	-15	42						
Бельбек – с. Фруктовое	2,59	1,89	1,89	-27	0	-27	50	22	-5	4	-33	-48	-43
Черная – с. Родниковское*	1,48	1,42	1,49	-4	5	1	41						
Черная – с. Хмельницкое	2,07	1,81	1,71	-13	-6	-17	42	40	27	14	-81	-82	-84

* Модуль стока р. Черной у с. Родниковского сомнителен из-за неточного определения площади водосбора в карстующемся массиве

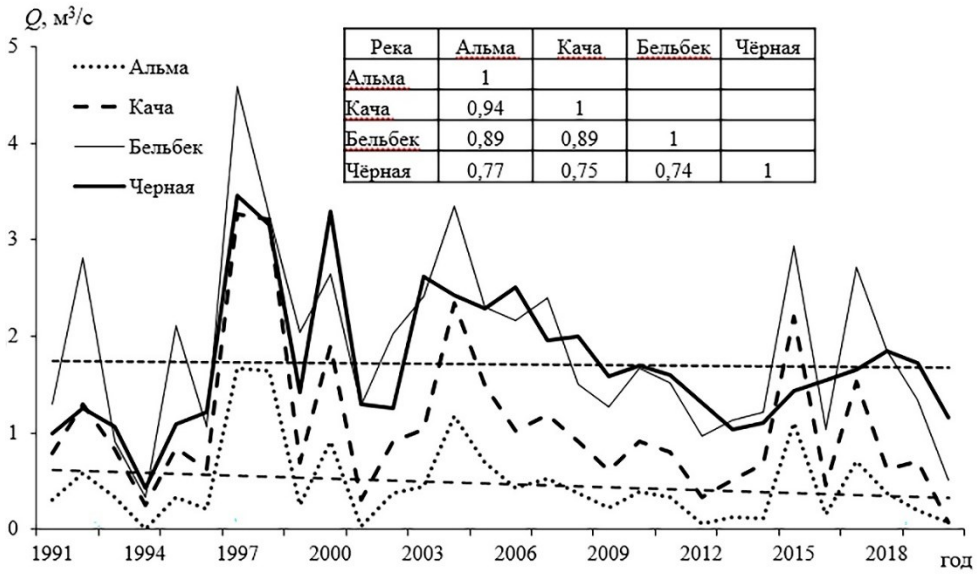
** Период осреднения с 1991 по 2013 г. в связи с закрытием гидропоста в 2014 г.

– Короткий ряд наблюдений, нет данных

Коррелируемость значений стока в замыкающих створах рек (коэффициенты корреляции 0,74–0,94) позволяет восстанавливать пропуски в наблюдениях с удовлетворительной точностью (рисунок 4).

Регулирование речного стока водохранилищами привело к его внутригодовому перераспределению. В 1961–1990 гг., по сравнению с 1930–1960 гг., сток многоводного периода уменьшился, а межени увеличился. В третьем периоде, 1991–2020 гг., произошло еще большее «выравнивание» среднего месячного стока рек. Пример изменчивости гидрографа стока р. Черной на г/п Хмельницкое по однородным периодам приведен на рисунке 5. Из него видно, что средний многолетний размах среднего месячного расхода воды р. Черной у с. Хмельницкое последовательно уменьшался и составлял: 4,97 м^3/с (1931–1960 гг.), 2,22 м^3/с (1961–1990 гг.) и 1,29 м^3/с (1991–2020 гг.). Аналогичные изменения внутригодового

распределения речного стока характерны и для других рассматриваемых рек региона.



Река	Альма	Кача	Бельбек	Чёрная
Альма	1			
Кача	0,94	1		
Бельбек	0,89	0,89	1	
Чёрная	0,77	0,75	0,74	1

Рисунок 4. Изменчивость среднего годового расхода воды и корреляционная матрица годового стока рек юго-западного Крыма
Figure 4. Variability of average annual discharge of water and correlation matrix of annual river flow in southwestern Crimea

В последнее тридцатилетие коэффициент вариации среднего месячного стока рек на нижних гидропостах составлял 0,3–1,0 (р. Черная) и 0,6–2,2 (реки Альма, Кача и Бельбек). Следовательно, эксплуатация Чернореченского водохранилища в большей степени сказывалась на стоке р. Черной, чем регулирование стока водохранилищами на остальных реках.

Наибольшие значения расхода воды в 1991–2020 гг. стали меньше, чем в предыдущие периоды, за исключением р. Альмы. Так, если наибольший расход воды рек в замыкающих створах (рисунок 1) ранее достигал 438 м^3/с (р. Кача, 1969 г.), 414 м^3/с (р. Бельбек, 1981 г.), 105 м^3/с (р. Черная, 1955 г.), то в настоящее время он уменьшился и составил: 76,6 м^3/с (р. Кача, 2015 г.), 109 м^3/с (р. Бельбек, 1999 г.), 30,4 м^3/с (р. Черная, 2018 г.). Наибольший расход воды р. Альмы был равен 57,6 м^3/с (1938 г.), а в последнее тридцатилетие он увеличился до 77,4 м^3/с (2015 г.). В период естественного режима стока в низовьях рек средний месячный расход воды в 13–15 % случаев был равен нулю, в современный период пересыхание отмечалось крайне редко – менее 1 % случаев.

В 1991–2020 гг. модуль стока рассматриваемых рек уменьшался с увеличением площадей водосборов на 43–84 % (таблица 5), т. е. уменьшалась обводненность бассейнов рек от истоков к устьям. Это происходило во всех бассейнах рассматриваемых рек из-за водохозяйственных мероприятий и потепления климата (рисунок 3), исключая верховье р. Черной, модуль стока которой практически не изменился, потому что оно расположено в Крымском заповеднике, где запрещена вырубка лесов и ограничена застройка берегов (таблица 5).

В работе [Болгов, Зайцева, 2017] отмечается, что «приемлемые связи стока с площадью водосбора отсутствуют в связи с высотной зональностью, особенностями орографии, несовпадением поверхностных и подземных водосборов». Действительно, зависимости между стоком рек юго-западного Крыма и площадью водосбора не обнаружено, а между модулем стока и площадью водосбора имеется обратная зависимость, имеющая корреляционное отношение -0,88 и оцененная по различным шкалам как сильная и очень сильная [Котеров и др., 2019]. Однако при исключении из

расчетов верховий рек (из-за предположения о недостаточной точности определения площадей водосборов) зависимость становится линейной и коэффициент корреляции уменьшается до 0,57, а его ошибка увеличивается до ±0,26.

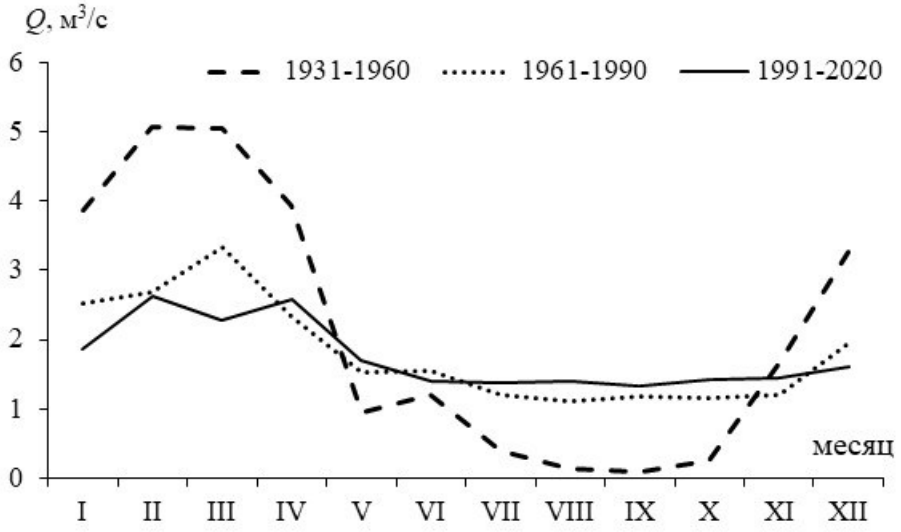


Рисунок 5. Гидрографы стока р. Черной в 1931–2020 гг. по характерным периодам у с. Хмельницкого
Figure 5. Hydrographs of the Chernaya River runoff in 1931–2020 by characteristic periods near the village of Khmelnitsky

Сток в устья рек по натурным данным. Синхронные (в вершинах устьев рек и в Нг/п) экспедиционные исследования МГИ РАН в 2017–2024 гг. показали, что измеренные расходы воды (ИРВ) рек Альма, Кача и Бельбек, на нижних гидропостах (Нг/п) сети наблюдений Росгидромета (2, 4 и 6, рисунок 1), изменялись в пределах 0,26–12,9 м^3/с, а р. Черной у с. Хмельницкое (8, рисунок 1) – от 0,09 до 2,53 м^3/с. В этот период ИРВ в вершинах морских устьев указанных рек (ВМУР) составляли 0,01–10,6 м^3/с. По нашим оценкам минимальный расход воды в устье р. Черной может уменьшаться до 0,01–0,02 м^3/с, а максимальный, в случае прорыва искусственного сооружения в вершине устья, быть равным наибольшему расходу воды на г/п Хмельницкое. В период паводка 19–23.01.2024, при расходе воды р. Черной у с. Хмельницкое 19,5–36 м^3/с, измерения в вершинах устьев рек не выполнялись, так как этому препятствовало затопление и подтопление поймы. К тому же, однородность рядов наблюдений в ВМУР Черной была нарушена из-за разрушения паводком дамбы с водовыпуском, которая ранее являлась вершиной устья. Полученные зависимости между измеренными расходами воды в ВМУР и в замыкающих створах рек на г/п Росгидромета (Нг/п) представлены на рисунке 6 и характеризуют, в основном, сток при средних гидрометеорологических условиях.

Зависимости (рисунок 6) тесные, коэффициент корреляции для зависимости, показанной на рисунке 6а, составляет 0,98±0,02, а для зависимости на рисунке 6б – 0,98±0,01. Установлено, что в среднем, исключая значительные паводки, в вершины устьев рек поступал расход воды в следующем количестве от его значений в замыкающих створах (Нг/п): р. Черная – 12 %, р. Бельбек – 106 %, р. Кача – 87 %, р. Альма – 88 %. На участке между г/п Хмельницкое и вершиной устья р. Черной осуществляется водозабор для водообеспечения г. Севастополя, потери расхода воды на этом участке, в зависимости от водности года, изменялись в пределах 1,1–1,6 м^3/с. При накоплении натурных данных результаты планируется уточнить и по ним, с использованием информации по г/п Росгидромета, можно будет приближенно определять речной сток, поступающий в вершины морских устьев рек.

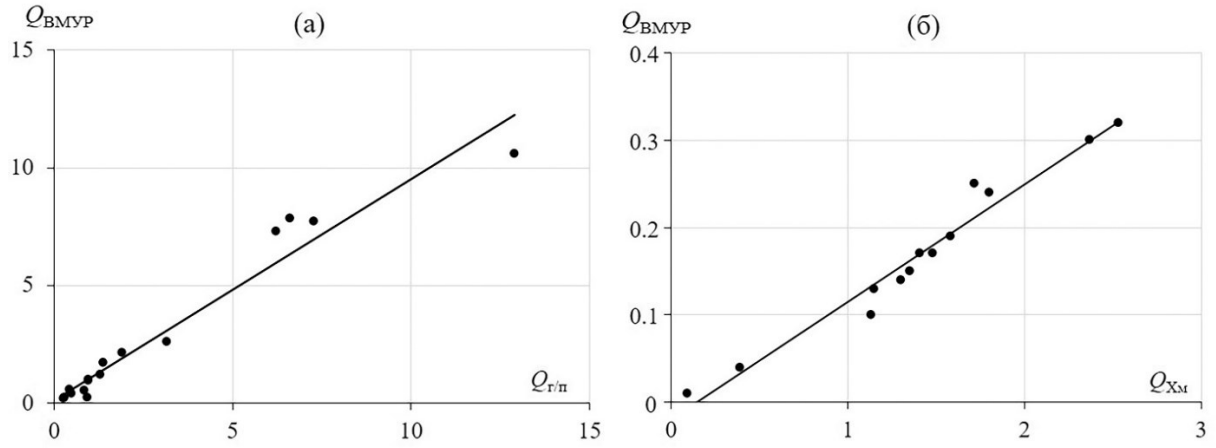


Рисунок 6. Связь между измеренными расходами воды (м^3/с) в вершинах морских устьев рек ($Q_{ВМУР}$) Альма, Кача, Бельбек (а) и р. Черная (б) и в Нг/п Почтовое, Суворово, Фруктовое ($Q_{г/п}$) и Хмельницкое

Figure 6. Correlation between measured discharges of water (m^3/s) at the river sea mouth top (Q_{RSMT}) of the Alma, Kacha, Belbek rivers (a) and the Chernaya river (b) and in the Lg/s of the villages of Pochtovoe, Suvorovo, Fruktovoe ($Q_{g/s}$) and Khmelnitsky

Сток в устья рек по результатам моделирования. Использование гидравлической модели процесса речного стока впервые позволило выявить особенности изменчивости среднего многолетнего расхода воды вдоль русел рек Альма, Кача, Бельбек и Черная, в зависимости от осадков, инфильтрации, испарения и водопотребления (рисунок 7).

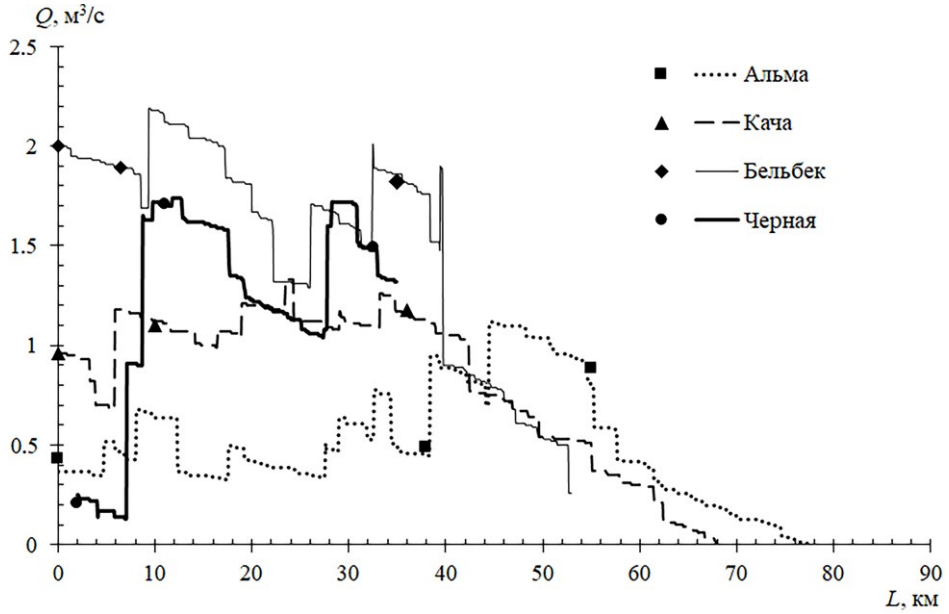


Рисунок 7. Изменчивость среднего многолетнего расхода воды (Q, м^3/с) рек юго-западного Крыма от истоков к устью по результатам моделирования (линии) и натурным данным (маркеры)

Figure 7. Variability of the average long-term discharge of water (Q, m^3/s) of the rivers of the southwestern Crimea from the headwaters to the mouth according to the results of modeling (lines) and field data (markers)

Средний годовой расход воды в вершинах морских устьев рек, рассчитанный с помощью гидравлической модели, равен 0,25 (р. Черная) –2,00 (р. Бельбек) м^3/с. Расхождения между натурными данными МГИ РАН, данными гидропостов (таблица 5) и значениями смоделированного среднего многолетнего расхода воды составили -10÷19 % (в среднем ±7 %). По нашим расчетам,

время, за которое сток рек юго-западного Крыма поступает с верховьев в вершины их устьев, равно 21 (р. Черная) – 36 (р. Альма) часам, а средняя скорость течения изменяется от 0,42 (р. Черная) до 0,75 (р. Бельбек) м/с, что близко к реальным величинам, измеренным в период экспедиционных исследований Отдела гидрофизики шельфа МГИ РАН в 2017–2024 гг.

Заключение

Учет природной цикличности климата и антропогенных изменений позволил скорректировать нормы стока рек юго-западного Крыма. Сравнительный анализ изменчивости среднего многолетнего стока рек юго-западного Крыма за три климатических периода (1931–1960 гг., 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.), с различным уровнем использования водных ресурсов, показал, что в 1991–2020 гг., по сравнению с 1931–1960 гг., в низовьях рек сток уменьшился на 11–65 %. По сравнению с периодом 1961–1990 гг. изменения стока рек в последний период были в пределах точности расчета, исключая р. Альму, средний многолетний сток которой уменьшился на 17 %. На г/п Родниковское сток р. Черной за 100 лет практически не изменялся. Следовательно, данные наблюдений в этом гидростворе могут быть реперными для оценки естественного стока реки и использоваться в качестве предиктора для восстановления пропусков в наблюдениях на других реках.

В современный климатический период, 1991–2020 гг., по данным гидропостов Росгидромета, с увеличением водосбора отмечалось уменьшение стока р. Альмы на 45 %, р. Качи – на 7 % и его увеличение на реках Бельбек и Черная на 4 и 14 %, соответственно. При этом модуль стока рассматриваемых рек уменьшался с увеличением площадей водосборов на 43–84 % из-за дефицита боковой приточности по направлению от истоков к устьям, особенностей дренирования подземных и карстовых вод на различных участках русел, водохозяйственных мероприятий и потепления климата.

Значимых тенденций зарегулированного годового стока рек в 1991–2020 гг. не обнаружено, как и тренда годовой суммы осадков. При этом средняя годовая температура воздуха увеличивалась на 0,09 °С в год в верховьях рек и на 0,07 °С в их низовьях. Очевидно, возможное уменьшение стока из-за увеличения температуры воздуха и испарения компенсировалось его регулированием водохранилищами и прудами.

Внутригодовое перераспределение речного стока, обусловленное его регулированием, способствовало уменьшению среднего многолетнего размаха, уменьшению максимального и увеличению минимального стока. На всех реках, кроме р. Альмы, максимальный сток рек уменьшился в 3–6 раз, что снизило вероятность затопления территорий.

Параллельные измерения стока рек, выполненные в 2017–2024 гг. МГИ РАН, показали, что в вершины морских устьев рек поступает в среднем от 12 % (р. Черная) до 106 % (р. Бельбек) от стока рек юго-западного Крыма на замыкающих гидропостах Росгидромета. Поэтому использование для оценки влияния речного стока на устьевые взморья данных по гидропостам, расположенным на расстоянии 7–38 км от устьев, может приводить к существенным ошибкам. Причины невязки стока в низовье р. Черной обусловлены водозабором для нужд Севастопольского региона, а для других нижних участков рек невязки могут быть установлены при накоплении натурных данных. Впервые полученные количественные оценки стока в вершины морских устьев рек подтверждают вывод о возможности резервирования стока р. Бельбек в нижнем течении и нецелесообразности дополнительного зарегулирования стока р. Черной.

Удовлетворительное совпадение результатов моделирования изменчивости стока вдоль речных русел с натурными данными позволит в дальнейшем точнее оценивать баланс воды, тепла и веществ, поступающих в устья рек, давать прогноз паводочного стока и его трансформации в любом створе русловой сети.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за участие в экспедиционных исследованиях сотрудникам Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» С. И. Кропотову, О. А. Лукашовой, Р. О. Шаповалову, С. В. Щербаченко.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» (шифр «Прибрежные исследования»).

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude for the participation in the expeditionary research to S. I. Kropotov, O. A. Lukashova, R. O. Shapovalov, and S. V. Shcherbachenko (Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences").

This work was carried out as part of the state assignment (topic FNNN-2024-0016 "Investigation of the spatial-temporal variability of oceanological processes in the coastal, nearshore, and shelf zones of the Black Sea under the influence of natural and anthropogenic factors based on contact measurements and mathematical modeling" (code "Coastal Studies").

Литература

Беликов В.В., Алексюк А.И. Основы численного моделирования динамики речных потоков: учебное пособие. М., 2020. 329 с.

Богуцкая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушникова М.Г. Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 37–51. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3.

Болгов М.В., Зайцева А.В. Оценка местного стока рек республики Крым // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения: сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН (г. Сочи, 02–07 октября 2017 года). Новочеркасск: ООО *"*Лик*"*, 2017. С. 116–120.

Бортновский З.В. Водный сток как индикатор ландшафтно-экологических условий бассейнов малых рек // Географическая среда и живые системы. 2021. № 1. С. 42–52. DOI:10.18384/2712-7621-2021-1-42-52.

Водогрецкий В.Е. Антропогенное изменение стока малых рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 176 с.

Гидрометеорологические условия морей Украины в 2 т. Том 2: Черное море / Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н., Дьяков Н.Н., Кубряков А.А., Станичный С.В. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.

Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Вып. 4. Крым / Под ред. *А.М. Цукановой*. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 120 с.

References

Antonenkov D.A. A method for determining water flow in small rivers based on processing water surface video images. *Water Resources*, 2024, Vol. 51, No. 6, pp. 922–927. DOI: 10.1134/S0097807824701112.

Belikov V.V., Aleksyuk A.I. *Osnovy chislennogo modelirovaniya dinamiki rechnykh potokov: uchebnoye posobiye [Fundamentals of numerical modeling of river flow dynamics: a tutorial]*. Moscow, 2020. 329 p. (In Russian).

Bogutskaya E.M., Kositskiy A.G., Aybulatov D.N., Grechushnikova M.G. Sredniy mnogoletniy stok rek yugo-zapadnoy chasti Krymskogo poluostrova [Mean annual runoff of the rivers of the Crimean peninsula southwest]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water management in Russia: problems, technologies, management]*, 2020, no. 2, pp. 37–51. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3. (In Russian; abstract in English).

Bolgov M.V., Zaytseva A.V. Otsenka mestnogo stoka rek respubliki Krym [Assessment of local river flow in the Republic of Crimea]. *Vodnyye resursy: novyye vyzovy i puti resheniya: sbornik nauchnykh trudov: posvyashchayetsya Godu ekologii v Rossii i 50-letiyu Instituta vodnykh problem RAN (g. Sochi, 02–07 oktyabrya 2017 goda) [Water resources: new challenges and solutions: collection of scientific papers: dedicated to the Year of Ecology in Russia and the 50th anniversary of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Sochi, October 2–7, 2017)]*. Novocherkassk, OOO LiK Publ., 2017, pp. 116–120. (In Russian).

Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с.

Иванов В.А., Прусов А.В. Речной сток юга Украины: количественные оценки паводков, принципы управления и прогноз. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 232 с.

Иванютин Н.М. Комплексная оценка пригодности вод реки Альма для целей ирригации // Экология и строительство. 2019. № 4. С. 22–32. DOI 10.35688/2413-8452-2019-04-003.

Косицкий А.Г., Богуцкая Е.М., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Оценка собственных возобновляемых водных ресурсов Крымского полуострова // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 423–436. DOI: 10.31857/S0321059622040113.

Котеров А.Н., Ушенкова Л.Н., Зубенкова Э.С., Калинина М.В., Бирюков А.П., Ласточкина Е.М., Молодцова Д.В., Вайнсон А.А. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 6. С. 12–24. DOI: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24.

Лучшева А.А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 424 с.

Магрицкий Д.В. Пространственно-временные характеристики наводнений на Черноморском побережье Российской Федерации // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2014. № 6. С. 39–47.

Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). Севастополь: ИП Стрижак М.В., 2020. 364 с. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9

Наривончик С.В. Миньковская Р.Я. Дьяков Н.Н. Мальченко Ю.А. Щербаченко С.В. Изменчивость солёности воды устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) в современный климатический период // Гидросфера. Опасные

Bortnovsky Z.V. Vodnyy stok kak indikator landshaftno-ekologicheskikh usloviy basseynov malykh rek [Runoff as an indicator of landscape-ecological conditionsin basins of small rivers]. *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy [Geographic environment and living systems],* 2021, no. 1. pp. 42–52. DOI:10.18384/2712-7621-2021-1-42-52. (In Russian; abstract in English).

Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W. *Global Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balances*. Koblenz: WMO–Global Runoff Data Centre, 1999. 109 p.

Gidrometeorologicheskie usloviya morei Ukrainy v 2 tomakh. Tom 2: Chernoe more [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine in 2 volumes. Volume 2: Black Sea]. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2012. 421 p. (In Russian).

Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Osnovnyye gidrologicheskiye kharakteristiki. vol. 6. no. 4. Krym [State Water Cadastre. Main hydrological characteristics. vol. 6. no. 4. Crimea] / In A.M. Tsukanova (ed). Leningrad, Hydrometeopubl, 1980. 120 p. (In Russian).

Guide to Climatological Practices (WMO-100). Geneva, World Meteorological Organization, 2018. 153 p. (Russ. ed.: Rukovodstvo po klimatologicheskoi praktike. Zheneva, Vsemirnaya Meteorologicheskaya Organizatsiya, WMO-№100, 2018. 169 p.).

Ivaniutin N.M. Kompleksnaya otsenka prigodnosti vod reki Alma dlya tseley irrigatsii [The complex assessment of water quality of the Alma river for irrigation purposes]. *Ekologiya i stroitelstvo [Ecology and construction]*, 2019. no. 4. pp. 22–32. DOI 10.35688/2413-8452-2019-04-003. (In Russian; abstract in English).

Ivanov V.A., Prusov A.V. *Rechnoy stok yuga Ukrainy: kolichestvennyye otsenki pavodkov, printsipy upravleniya i prognoz [River runoff in the south of Ukraine: quantitative assessment of floods, management principles and forecast]*. Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2006. 232 p. (In Russian).

Kositskii A.G., Bogutskaya E.M., Grechushnikova M.G., Grigoriev V.Yu., Sazonov A.A., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Assessing the Local Renewable Water Resources in the Crimean Peninsula. *Water Resources*, 2022. Vol. 49, no. 4. pp. 582–594. DOI 10.1134/S009780782204011X. (Russ.

процессы и явления. 2022. Т. 4. № 4. С. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.

Обязов В.А., Виноградов А.Ю. Изменения стока рек Крымского полуострова во второй половине XX – начале XXI веков // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 1. С. 38–51. DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.38.

Олиферов А. Н. О водной проблеме в Крыму // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах: Материалы VI Международной научной конференции (г. Белгород, 12–16 октября 2015 г.) / Ответственный за выпуск Голеусов П.В. Белгород: Политерра, 2015. С. 275–277.

Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Экодинамика водных ресурсов Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. № 1. С. 115–125.

Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии / Пер. с англ. И.П. Гейбера, В.А. Шнайдмана; Под ред. Л.С. Гандина, Р.Л. Кагана. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 209 с.

Поверхностные водные объекты Крыма (справочник) / *А.А. Лисовский, В.А. Новик, З.В. Тимченко, З.Р. Мустафаева,* под ред. *З.В. Тимченко*. Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 113 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым / Под ред. *М.М. Айзенберга, М.С. Каганера*. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 344 с.

Руководство по климатологической практике. Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, ВМО-№100, 2018. 169 с.

Сергеев Д.А. Использование современных методов анемометрии по изображениям частиц (PIV-методов) при лабораторном моделировании геофизических течений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4–2. С. 522–524.

Табунщик В.А. Бассейны рек северо-западного склона Крымских гор (Западный Булганак, Альма, Кача, Бельбек, Чёрная): современное состояние и преобразованность // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность: Тезисы докладов II Международной научно-практической

Ed. Kositskiy A.G., Bogutskaya Ye. M., Grechushnikova M.G., Grigoryev V.YU., Sazonov A.A., Kharlamov M.A., Frolova N.L. *Otsenka sobstvennykh vozobnovlyayemykh vodnykh resursov Krymskogo poluostrova*. Vodnyye resursy, 2022. vol. 49. no. 4, pp. 423–436).

Koterov A.N., Ushenkova L.N., Zubenkova E.S., Kalinina M.V., Biryukov A.P., Lastochkina E.M., Molodtsova D.V., Wainson A.A. Sila svyazi. Soobshcheniye 2. Gradatsii velichiny korrelyatsii [Strength of association. Report 2. Graduations of correlation size]. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost [Medical radiology and radiation safety]*, 2019. vol. 64, no. 6. pp. 12–24. DOI: 10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24. (In Russian; abstract in English).

Lisovsky A.A., Novik V.A., Timchenko Z.V., Mustafaeva Z.R. *Poverkhnostnyye vodnyye obyekty Kryma (spravochnik) [Surface water bodies of Crimea (reference book)]*. Simferopol, Republican Committee for Water Management of the Autonomous Republic of Crimea Publ., 2004. 113 p. (In Russian).

Luchsheva A.A. *Prakticheskaya gidrometriya [Practical hydrometry]*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1983. 424 p. (In Russian).

Magritsky D.V. Prostranstvenno-vremennyye kharakteristiki navodneniy na Chernomorskom poberezhye Rossiyskoy Federatsii [Spatial-temporal parameters of floods at the Black Sea coast of the Russian Fderation]. *Vestnik Moskovskogo universiteta Seriya 5: Geografiya. [Bulletin of Moscow University Episode 5: Geography]*, 2014, no 6., pp. 39–47. (In Russian; abstract in English).

Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredeleniyu ikh raschetnykh znacheniy po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data], St. Petersburg, Nestor-History Publ, 2010. 162 p.

Minkovskaya R.Ya. *Kompleksnyye issledovaniya raznotipnykh morskikh ustyev rek (na primere morskikh ustyev rek severo-zapadnoy chasti Chernogo morya) [Comprehensive studies of different types of river mouths (on the example of the*

конференции (г. Севастополь, 05–09 сентября 2022 г.) Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», 2022. С. 145.

Тимченко З.В. Водные ресурсы и экологическое состояние малых рек Крыма. Симферополь: Доля, 2002. 152 с.

Тимченко З.В. Обобщение наблюдаемых на реках Крыма максимумов и минимумов годового стока // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: География. 2008. Т. 21 (60). № 3. С. 349–358.

Тимченко З. В. Расчёт характеристик изменчивости годового стока рек Крыма с известными расходами карстовых источников при отсутствии гидрометрических наблюдений // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: География. 2009. Т. 22 (61), № 2. С. 148–153.

Устойчивый Крым. Водные ресурсы / Гл. ред. В.С. Тарасенко. Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.

Antonenkov D.A. A method for determining water flow in small rivers based on processing water surface video images // Water Resources, 2024, Vol. 51, No. 6, pp. 922–927. DOI: 10.1134/S0097807824701112.

Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Grabs W. Global Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balances. Koblenz: WMO–Global Runoff Data Centre, 1999. 109 p.

Identification of river basins within northwestern slope of Crimean Mountains using various digital elevation models (ASTER GDEM, ALOS World 3D, Copernicus DEM, and SRTM DEM) / V. Tabunshchik, R. Gorbunov, T. Gorbunova [et al.] // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. P. 1218823. DOI: 10.3389/feart.2023.1218823.

Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change point problem // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). Published By: Oxford University Press 1979. V. 28. № 2. P. 126–135. DOI: 10.2307/2346729.

*Schumm S.A. R*iver response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy // The Journal *river mouths in the north-western part of the Black Sea)].* Sevastopol, Publ. of Marine Hydrophysical Institute, 2020. 364 p. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9. (In Russian; abstract in English).

Narivonchik S.V., Minkovskaya R.YA., Dyakov N.N., Malchenko Yu.A., Shcherbachenko S.V. Izmenchivost solenosti vody ustyevogo vzmorya reki Chernoy (Sevastopolskiy region) v sovremennyy klimaticheskiy period [Variability of the water salinity at the estuary of the Chernaya river (sevastopol region) in the modern climatic period]. *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena],* 2022, vol. 4, no. 4, pp. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359. (In Russian; abstract in English).

Obyazov V.A., Vinogradov A.Yu. Izmeneniya stoka rek Krymskogo poluostrova vo vtoroy polovine dvadtsatogo – nachale dvadtsat pervogo vekov [Changes in the flow of rivers of the Crimean peninsula in the second half of the twentieth - beginning of the twenty-first century]. *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena],* 2022, vol. 4, no. 1, pp. 38–51. DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.38. (In Russian; abstract in English).

Oliferov A.N., Timchenko Z.V. Ekodinamika vodnykh resursov Kryma [Ecodynamics of water resources of Crimea]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]*, 2005, no. 1, pp. 115–125. (In Russian).

Oliferov A. N. O vodnoy probleme v Krymu [On the water problem in Crimea]. *Problemy prirodopolzovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Yevropeyskoy Rossii i sopredelnykh stranakh: Materialy Shestoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Belgorod, 12–16 oktyabrya 2015) [Problems of nature management and the environmental situation in European Russia and adjacent countries: Proceedings of the Sixth International Scientific Conf. (Belgorod, October 12–16, 2015)].* In Goleusov P.V. (ed.). Belgorod, Politerra Publ., 2015, pp. 275–277. (In Russian).

Panofsky H.A., Brier G.W. *Some applications of statistics to meteorology*. Pennsylvania, University Park, 1968. 224 p. (Russ. ed: Panovskii G.A., Braier G.V. *Statisticheskie metody v meteorologii*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 209 p.).

of Geology. 1993. V. 101 (2). P. 279–294. DOI: 10.1086/648221

Shapiro S.S., *Wilk M.B*. An analysis of variance test for normality (complete samples) // Biometrika. 1965. V. 52. Iss. 3–4. P. 591–611. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591

Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. Published By: Oxford University Press 1979. V. 28. № 2. P. 126–135. DOI: 10.2307/2346729.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. V. 6. Ukraina i Moldaviya. Vyp. 4. Krym [Surface Water Resources of the USSR. Vol. 6. Ukraine and Moldova. Issue 4. Crimea]. In M.M. Ayzenberg, M.S. Kaganer (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1966. 344 p. (In Russian).

*Schumm S.A. R*iver response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, 1993, vol. 101 (2), pp. 279–294. DOI: 10.1086/648221.

Sergeev D.A. Ispolzovaniye sovremennykh metodov anemometrii po izobrazheniyam chastits (PIV-metodov) pri laboratornom modelirovanii geofizicheskikh techeniy [Development of particle image velocimetry methods for laboratory modeling of geophysical flows]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky]*, 2011, no. 4-2, pp. 522–524. (In Russian; abstract in English).

Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 1965, vol. 52, iss. 3–4, pp. 591–611. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

Tabunshchik V.A. Basseyny rek severo-zapadnogo sklona Krymskikh gor (Zapadnyy Bulganak, Alma, Kacha, Belbek, Chernaya): sovremennoye sostoyaniye i preobrazovannost [River basins of the northwestern slope of the Crimean Mountains (Western Bulganak, Alma, Kacha, Belbek, Chernaya): current state and transformation]. *Izucheniye vodnykh i nazemnykh ekosistem: istoriya i sovremennost: Tezisy dokladov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Sevastopol, 05–09 sentyabrya 2022) [Study of aquatic and terrestrial ecosystems: history and modernity: Abstracts of reports of the II International scientific and practical conf. (Sevastopol, September 5-9, 2022)]*, Sevastopol: A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022, p. 145. (In Russian).

Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T., Pham C.N.1, Klyuchkina A. Identification of river basins within northwestern slope of Crimean Mountains using various digital elevation models (ASTER GDEM, ALOS World 3D, Copernicus DEM, and SRTM DEM*). Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, p. 1218823. DOI: 10.3389/feart.2023.1218823.

Timchenko Z.V. *Vodnyye resursy i ekologicheskoye sostoyaniye malykh rek Kryma [Water resources and ecological state of small rivers of Crimea]*, Simferopol, Dolya, 2002. 152 p. (In Russian).

Timchenko Z.V. Obobshcheniye nablyudayemykh na rekakh Kryma maksimumov i minimumov godovogo stoka [Generalization of the observed maxima and minima of annual runoff on the rivers of Crimea]. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tauride National University. Series: Geography]*, 2008. vol. 21 (60), no. 3, pp. 349–358. (In Russian).

Timchenko Z. V. Raschet kharakteristik izmenchivosti godovogo stoka rek Kryma s izvestnymi raskhodami karstovykh istochnikov pri otsutstvii gidrometricheskikh nablyudeniy [Calculation of the characteristics of the variability of the annual flow of Crimean rivers with known discharges of karst sources in the absence of hydrometric observations]. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya [Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Tauride National University. Series: Geography],* 2009, vol. 22 (61), no. 2, pp. 148–153. (In Russian).

Ustoychivyy Krym. Vodnyye resursy. [Sustainable Crimea. Water resources]. Ed. V.S. Tarasenko. Simferopol, Tavrida, 2003, 413 p. (In Russian).

Vodogretskiy V.E. *Antropogennoye izmeneniye stoka malykh rek [Anthropogenic changes in the flow of small rivers]*. Leningrad, Hydrometeopubl, 1990. 176 p. (In Russian).

Yeliseyeva I.I., Yuzbashev M.M. *Obshchaya teoriya statistiki [General Theory of Statistics]*. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2004. 656 p. (In Russian).

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ СЕМИНАР «ГИДРОСФЕРА: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Приглашаем вас принять участие в Международном научном семинаре «Гидросфера: современные методы и технологии натурных исследований» в г. Сочи, 24–29 марта 2025 г.

Организаторы Семинара:

НПО «Гидротехпроект» (Санкт-Петербург), Институт водных проблем РАН (Москва) и Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва).

Оргкомитет Семинара:

Виноградов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, генеральный директор ООО НПО "Гидротехпроект";

Обязов Виктор Афанасьевич, доктор географических наук, технический директор ООО НПО "Гидротехпроект";

Полянин Владислав Олегович, кандидат географических наук, директор Института водных проблем РАН;

Гарцман Борис Ильич, доктор географических наук, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН;

Чалов Сергей Романович, доктор географических наук, профессор, заведующий Лабораторией эрозии почв и русловых процессов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова;

Морейдо Всеволод Михайлович, кандидат географических наук, заведующий Лабораторией гидроинформатики Института водных проблем РАН.

Цель Семинара – собрать ведущих специалистов из России и стран СНГ в области гидрологии суши и смежным дисциплинам для обмена опытом современных натурных исследований формирования стока и сопутствующих процессов на экспериментальных бассейнах и полигонах, обсуждения инноваций в части постановки задач, использования средств измерений, методов исследований и анализа данных, применения инструментов математического моделирования и массивов данных ДЗЗ. Организация семинара предусматривает всестороннее обсуждение расширенных тематических докладов по ограниченному числу выбранных направлений, выработку рекомендаций и принятие решений для развития натурных исследований водных объектов суши.

Программа Семинара предусматривает работу по трем секциям:

- Исследования элементов водного баланса и режима речного стока (модератор д.г.н. Б.И. Гарцман);
- Исследования эрозионных процессов, транспорта и накопления речных наносов (модератор д.г.н. С.Р. Чалов);
- Приборы и технологии для сбора, хранения и обработки данных измерений (модератор к.г.н. В.М. Морейдо).

На каждой секции предусмотрено 4 основных доклада, каждый длительностью около 1.5 часов с обсуждением. Кроме секционных докладов, предусматривается проведение ежедневных широких дискуссий в формате «круглого стола», на которых будут представлены краткие сообщения от участников по собственному опыту полевых исследований. Предложения от участников по тематике сообщений приветствуются.

Место проведения Семинара: на базе конференц-центра НПО «Гидротехпроект», расположенного по адресу г. Сочи, п. Якорная щель.

Сроки проведения Семинара: 24–29 марта 2025 г. Онлайн-участие не предусмотрено.

Календарный план работы Семинара:

24 марта – день заезда;

25 марта – работа секции «Исследования элементов водного баланса и режима речного стока», дискуссии в формате круглого стола;

26 марта – работа секции «Исследования эрозионных процессов, транспорта и накопления речных наносов», дискуссии в формате круглого стола;

27 марта – работа секции «Приборы и технологии для сбора, хранения и обработки данных измерений», дискуссии в формате круглого стола;

28 марта – научная экскурсия в бассейне р. Шахе, общение в свободном формате;

29 марта – день выезда.

Оргкомитет семинара

НЕКРОЛОГ

Памяти Бориса Владимировича Боревского



25 апреля 2024 года не стало Бориса Владимировича Боревского.

Ушел из жизни Замечательный Человек, Большой Ученый, Чуткий Воспитатель, Добрый Товарищ, Талантливый Администратор, Прекрасный Оратор...

Он был не просто профессор, доктор наук и прочая, он был Человек-Глыба, Столп современной гидрогеологии... Это на таких людях держался становой хребет этой науки, они ее подняли на современный уровень, сделали такой, какая она есть. Он создал замечательную компанию – ЗАО «ГИДЭК», которая многие десятилетия была лучшей в отрасли.

Для меня он всегда останется примером ответственности,

Помню его рассказ о первой геологической экспедиции по окончании Московского геологоразведочного института. Борис Владимирович был назначен начальником отряда, одного из многих в крупном геологоразведочном предприятии – Втором гидрогеологическом управлении. Какую-то малонужную небольшую часть работы его отряд, как и все остальные, не выполнил.

По окончании полевого сезона все начальники отрядов сдавали результаты главному геологу предприятия. Борис Владимирович отчитывался последним. Руководитель запросил и результаты невыполненного задания. Узнав, что работа не сделана до конца, Бориса Владимировича одного, осенью, пешком отправили исправлять недоделки.

Много лет спустя он спросил у Главного геолога – которая была его мамой – почему ты отправила доделывать работу только меня, ведь остальные отряды тоже ее не выполнили?

Потому, что ты – мой сын, ответила она. За этот урок ответственности он был всегда благодарен матери. Для меня эта рассказанная им история и поучительна, и показательна. А Борис Владимирович нес эту высокую планку всю свою дальнейшую жизнь.

Скольким людям он помог сделать первые шаги в науке, в бизнесе! Я очень благодарен ему за поддержку и внимание, которые чувствовал многие годы совместной работы. Он неформально подходил к любой задаче, даже совсем непрофильной, детально разобрался в моей диссертации и был блестящим оппонентом на моей защите.

Помогал своим сотрудникам и товарищам в самых разных жизненных коллизиях, начиная с проблем с жильем и заканчивая простым дружеским вниманием.

Он помнил все объекты, на которых работал, все результаты, которые были получены. Нас, молодежь, он ставил в тупик своей эрудированностью, широтой охвата проблемы и неожиданностью и блеском ее решения.

Мы очень уважаем этого Человека и всегда будем помнить его.

Доктор технических наук
Алексей Юрьевич Виноградов

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Экологические проблемы и опасности в гидросфере
4. Эволюция гидросферы
5. Методы, модели и технологии
6. Вопросы совершенствования нормативной документации
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования
8. Глобальные и региональные изменения природы и климата
9. Научные дискуссии
10. Наследие
11. Хроника

Плата за публикации статей не взымается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;
- шрифт Times New Roman, размер – 11 pt;
- междустрочный интервал – множитель 1,15, переносы в словах не допускаются;
- абзацный отступ – 1 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;
- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);
- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;
- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащпй актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;
- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;
- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;
- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

Отсылка на затекстовые библиографические ссылки приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *Фамилия И.О.* Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на материалы в сборнике конференции: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 9 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); авторская справка. При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 250 слов).

Подробные правила приведены http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena" in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes in the hydrosphere: fundamental and engineering aspects
3. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
4. The evolution of the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Monitoring, experimental and expeditionary research
8. Global and regional changes of nature and climate
9. Scientific discussions
10. Heritage
11. Chronicles

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal's website in the public domain. Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 11 pt;
- line spacing – 1,15, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)' name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figuries should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the curent article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author.

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. *Title of book*. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), *Title of book.* City, Publisher, year, pp. 1-20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. *Title of thesis. Thesis type.* City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Conference Proceedings (date and place of the conference)*, City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49-53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. *Title of Journal*, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49-53. Available at: http://example.com/example.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);

academic degree and title;

organization affiliation with full address (including Post Code);

position in organization;

contact telefon (for all authors);

contact e-mail (for all authors);

scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena": http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

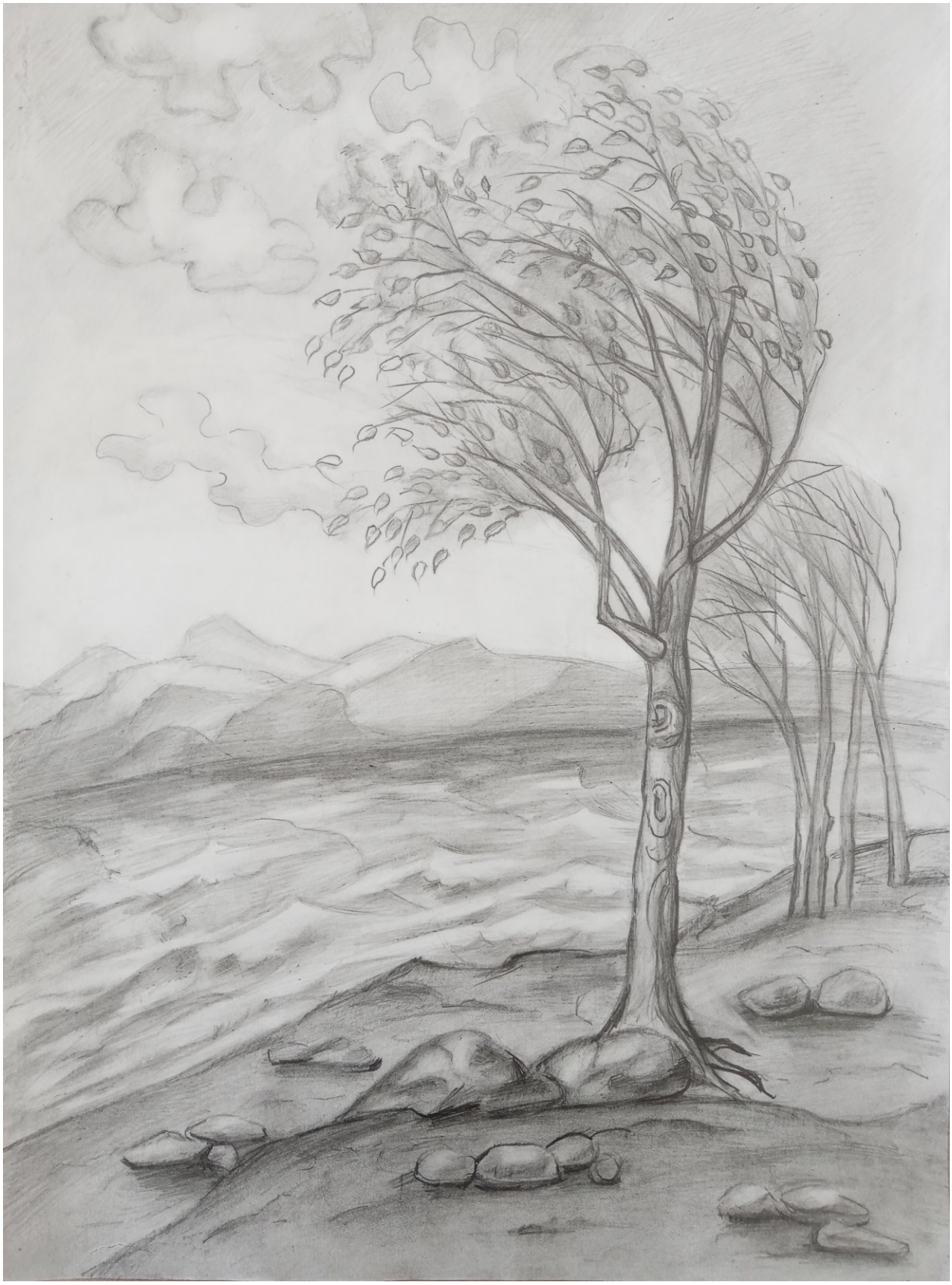
Научное издание

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ. HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: О.Ю. Круковская
На обложке фото Н.А. Казакова,
рисунки Т. Корниевич, Н. Карпенко
Подписано в печать 25.02.2025. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет 25.02.2025
Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект» г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений: 199155, г. Санкт-Петербург, а/я 136
Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48 e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
г. Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28



Карпенко Нина. *Волнение*

ISSN 2686-7877

© 2024. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены