

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**

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

Р.Я. Миньковская^{1*}, С.В. Наривончик¹,
И.А. Свищева¹, Д.А. Антоненков¹,
А.Н. Демидов^{2**}

Roza Ya. Minkovskaya^{1*}, Svetlana V. Narivonchik¹,
Irina A. Svishcheva¹, Dmitriy A. Antonenkov¹,
Alexander N. Demidov^{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

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-oasis@mail.ru

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

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.

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 [Водогрещкий, 1990; Бортовский 2021].

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.

формирования стока, его трансформации и транзита в устье [Водогрещкий, 1990; Бортовский 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 «закрывающих» 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).

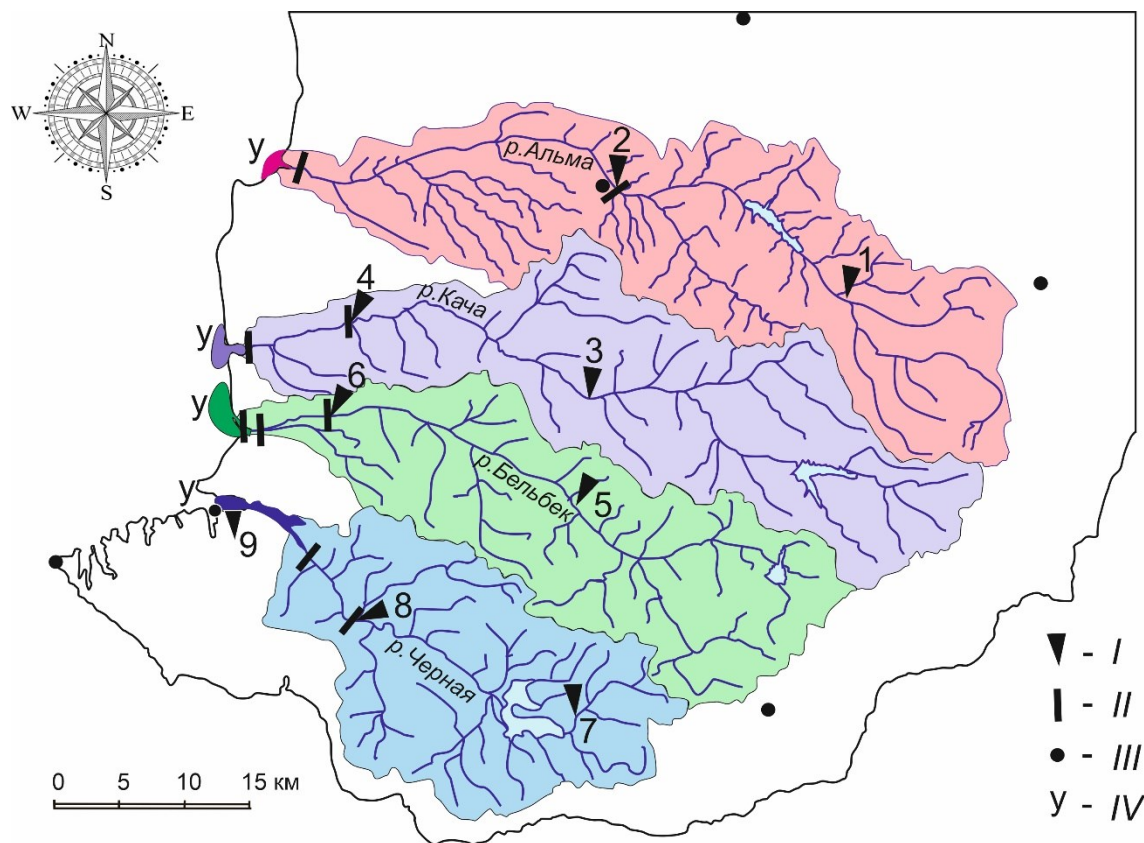


Рисунок 1. Сеть гидрометеорологических наблюдений в районе исследований

I – пункты наблюдений Росгидромета: 1 – выше вдхр. Партизанское; 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 – с. 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 сомнения.

Взаимозависимость и взаимосвязь между бассейновыми (стоком, ландшафтом) и морскими факторами (уровнем моря, состоянием побережья) в зоне контакта суша–море обуславливают 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 ($\text{м}^3/\text{с}$) – показатели водоносности реки; средний многолетний модуль стока ($\text{л}/\text{с км}^2$), 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-П 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, длиной 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, 2024¹], значительными изменениями средней месячной и средней годовой температуры воздуха в Крыму² 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 цикл², обуславливающий 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.ru³ 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 [Antonov, 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 натуральных 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 $\pm 10\%$.

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 $-1,4\%$.

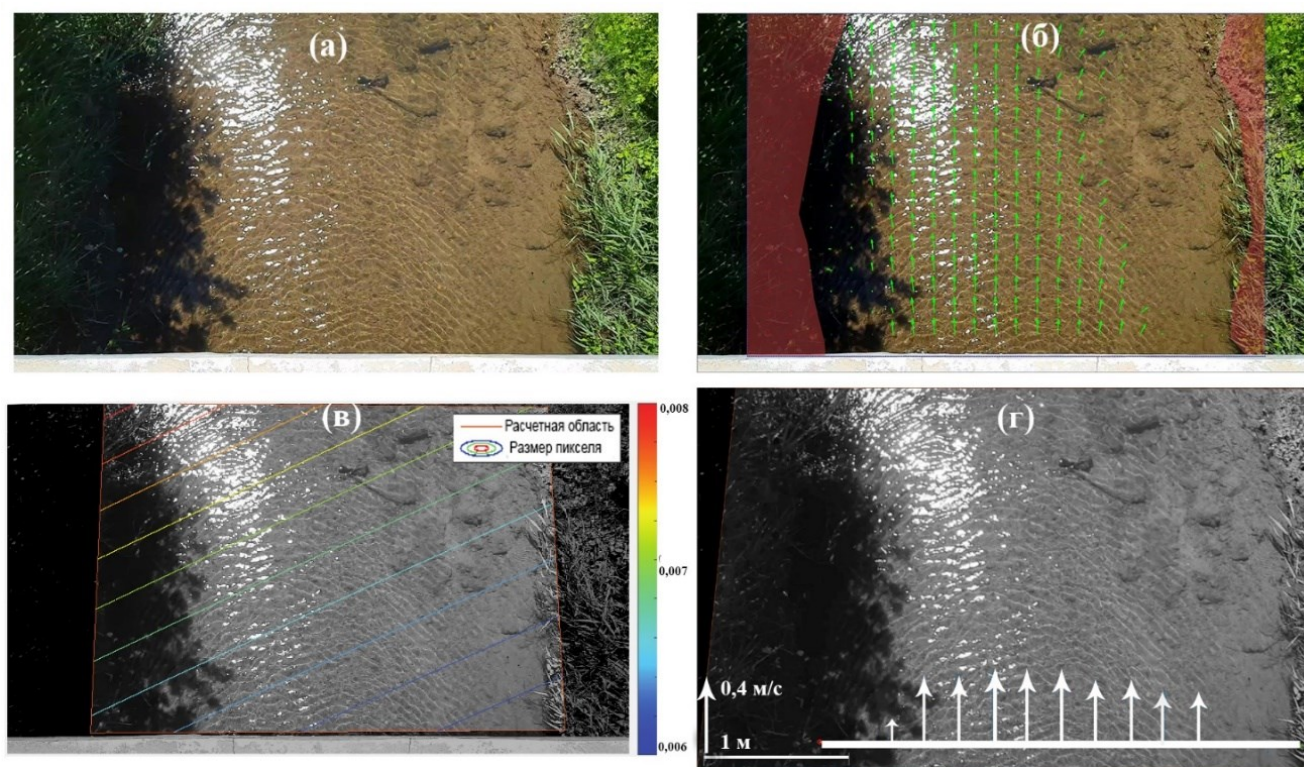


Рисунок 2. Определение скорости течения поверхностного слоя воды в вершине устья р. Качи 26.06.2024 методом видео-регистрации: (а) – полигон в вершине устья реки; (б) – распределение скорости течения; (в) – определение размера пикселя; (г) – эпюра скорости в гидростворе, м/с

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 ресурсов⁶. 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 согласуется 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 наблюдаемых 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; RSMТ (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 обуславливают 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, участвовавших 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 континенте⁷, 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 подруслового 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 естественному и по направлению к устьям годовых сумм осадков, сток был близок к водоносность рек увеличивалась.

Таблица 4. Средний многолетний расход воды рек юго-западного Крыма по литературным данным, м³/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, m³/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 Active⁸] 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, м³/с; M – модуль стока, л/с км²; 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, m³/s; M – flow modulus, l/s km²; 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 м³/с (1931–1960 гг.), 2,22 м³/с (1961–1990 гг.) и 1,29 м³/с (1991–2020 гг.). Аналогичные изменения внутригодового

распределения речного стока характерны и для других рассматриваемых рек региона.

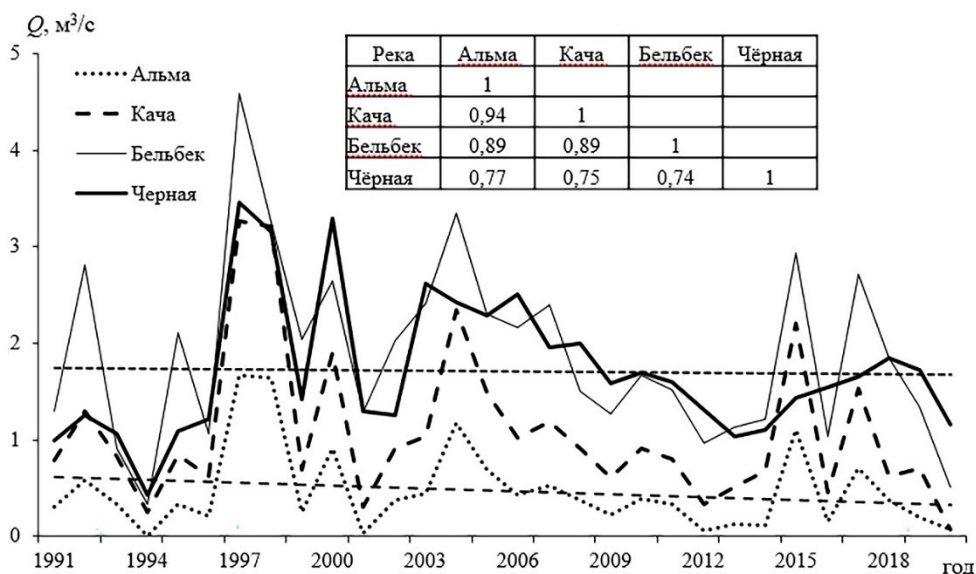


Рисунок 4. Изменчивость среднего годового расхода воды и корреляционная матрица годового стока рек юго-западного Крыма

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 м³/с (р. Кача, 1969 г.), 414 м³/с (р. Бельбек, 1981 г.), 105 м³/с (р. Черная, 1955 г.), то в настоящее время он уменьшился и составил: 76,6 м³/с (р. Кача, 2015 г.), 109 м³/с (р. Бельбек, 1999 г.), 30,4 м³/с (р. Черная, 2018 г.). Наибольший расход воды р. Альмы был равен 57,6 м³/с (1938 г.), а в последнее тридцатилетие он увеличился до 77,4 м³/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 $\pm 0,26$.

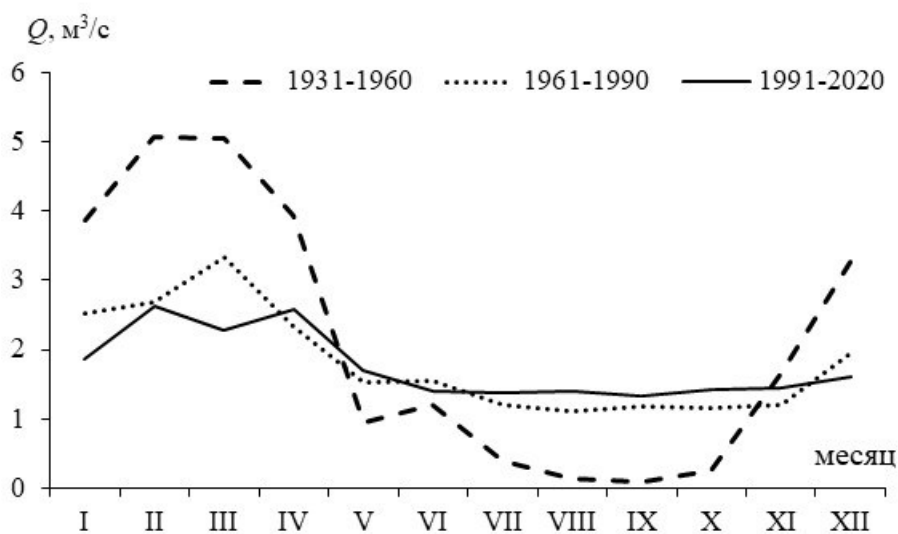


Рисунок 5. Гидрографы стока р. Черной в 1931–2020 гг. по характерным периодам у с. Хмельницкого
Figure 5. Hydrographs of the Chernaya River runoff in 1931–2020 by characteristic periods near the village of Khmel'nitskiy

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 $0,26\text{--}12,9\text{ м}^3/\text{с}$, а р. Черной у с. Хмельницкое (8, рисунок 1) – от $0,09$ до $2,53\text{ м}^3/\text{с}$. В этот период ИРВ в вершинах морских устьев указанных рек (ВМУР) составляли $0,01\text{--}10,6\text{ м}^3/\text{с}$. По нашим оценкам минимальный расход воды в устье р. Черной может уменьшаться до $0,01\text{--}0,02\text{ м}^3/\text{с}$, 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 $19,5\text{--}36\text{ м}^3/\text{с}$, 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 $0,98\pm 0,02$, а для зависимости на рисунке 6б – $0,98\pm 0,01$. 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 $1,1\text{--}1,6\text{ м}^3/\text{с}$. При накоплении натурных данных результаты планируется уточнить и по ним, с использованием информации по г/п Росгидромета, можно будет приблизительно определять речной сток, поступающий в вершины морских устьев рек.

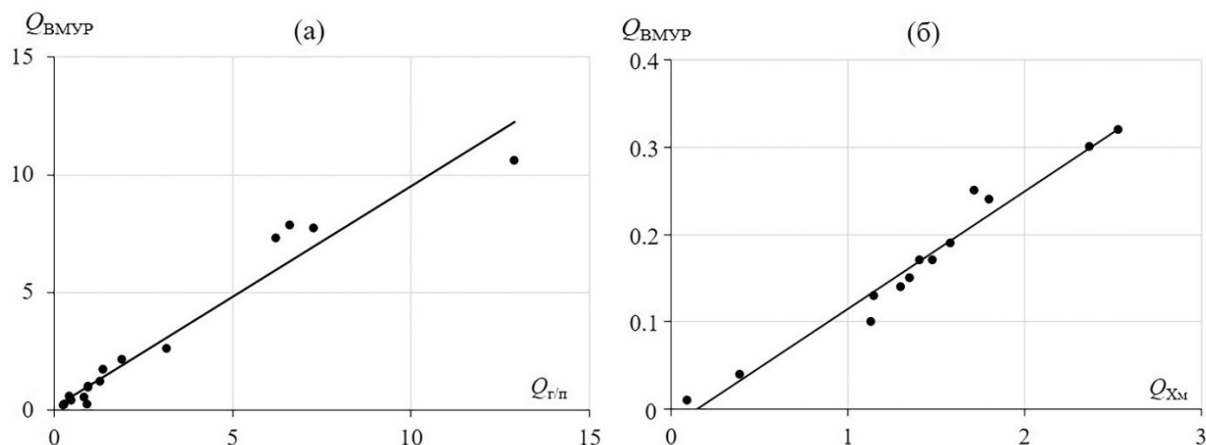


Рисунок 6. Связь между измеренными расходами воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в вершинах морских устьев рек (Q_{BMUR}) Альма, Кача, Бельбек (а) и р. Черная (б) и в Нг/п Почтовое, Суворово, Фруктовое ($Q_{\text{r/p}}$) и Хмельницкое

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 ($Q_{\text{g/s}}$) 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).

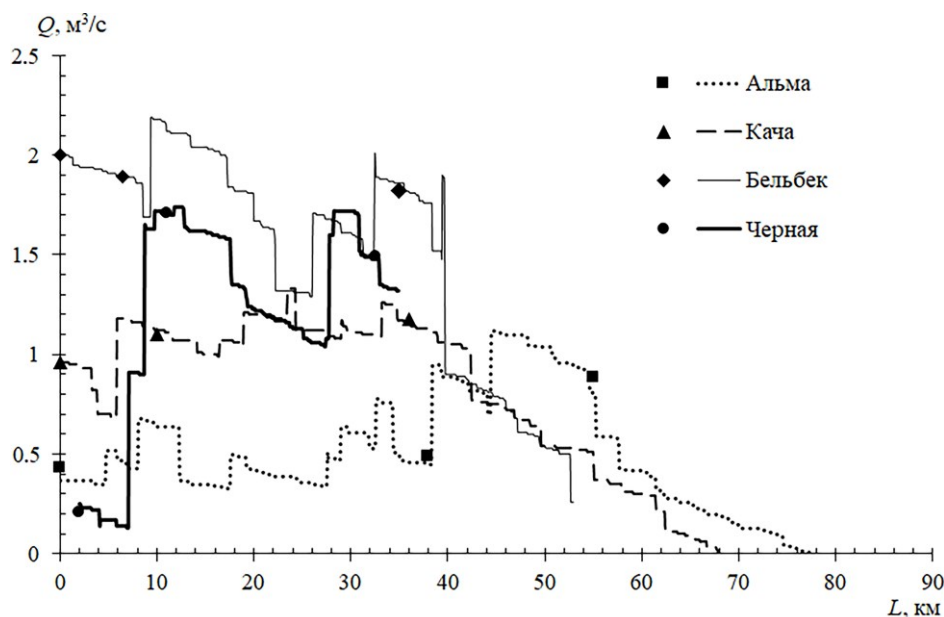


Рисунок 7. Изменчивость среднего многолетнего расхода воды (Q , $\text{м}^3/\text{с}$) рек юго-западного Крыма от истоков к устью по результатам моделирования (линии) и натурным данным (маркеры)

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) $\text{м}^3/\text{с}$. Расхождения между натурными

данными МГИ РАН, данными гидропостов (таблица 5) и значениями смоделированного среднего многолетнего расхода воды составили - 10÷19 % (в среднем $\pm 7\%$). 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 натуральных 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

Литература

Беликов В.В., Алексюк А.И. Основы численного моделирования динамики речных потоков: учебное пособие. М., 2020. 329 с.

Богущая 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.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 1980. 120 с.

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").

References

Antononkov 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 respubliky 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, ООО 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., Гречушников 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.: Гидрометеиздат, 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 conditions in 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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: Политекра, 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. Шнайдемана; Под ред. Л.С. Гандина, Р.Л. Кагана. Л.: Гидрометеиздат, 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.: Гидрометеиздат, 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 poluoostrova*. 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]. *Meditinskaya 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](https://doi.org/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 Federation]. *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.

Antonenkova 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. River 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. River 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 nablyudenykh [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).