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

УДК 551.468.4+551.468.6 DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОЛЁНОСТИ ВОДЫ УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ РЕКИ ЧЁРНОЙ (СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ РЕГИОН) В СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

С.В. Наривончик[1], Р.Я. Миньковская[1], Н.Н. Дьяков[2], Ю.А. Мальченко[2], С.В. Щербаченко[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»

narivonchik_s@mail.ru

Аннотация. Основным критерием процессов взаимодействия пресной и солёной воды в устье реки является солёность, однако стационарные наблюдения за этой характеристикой среды на водпосту Севастополь с начала 1990-х годов не производятся. В настоящее время в фондах Морского гидрофизического института РАН и Севастопольского отделения Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова накоплен уникальный экспедиционный материал, который в полном объёме не обобщался. Поэтому целью работы является исследование пространственно-временной изменчивости солёности воды устьевого взморья реки Чёрной в современный климатический период WMO, с 1991 по 2020 год. Для этого использовались неэквидистантные

VARIABILITY OF THE WATER SALINITY AT THE ESTUARY OF THE CHERNAYA RIVER (SEVASTOPOL REGION) IN THE MODERN CLIMATIC PERIOD

Svetlana V. Narivonchik[1], Roza Ya. Minkovskay[1], Nikolay N. Dyakov[2], Yuri A. Malchenko[2], Sergey V. Scherbachenko[1]

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

narivonchik_s@mail.ru

Abstract. The aim of the work is to study the spatial and temporal variability of the water salinity at the estuarine zone of the Chernaya River in the modern climatic period WMO, 1991–2020. Non-equidistant series of observations of the water salinity at the estuarine zone of the Chernaya River obtained during 115 hydrological and hydrochemical surveys of the water area were used. The accuracy of the obtained results is satisfactory. The presented schemes of water salinity distribution can be considered sufficiently justified. An increase in the air and water temperature (by 0.06–0.07°C per year), evaporation from the water surface, an increase in the salinity of the Black Sea contributed to salinization of the surface and bottom water layers of the Sevastopol Bay by an average of 0.02% per year. This trend can have negative consequences – lead to salinization of

Наривончик С.В., Миньковская Р.Я., Дьяков Н.Н., Мальченко Ю.А., Щербаченко С.В. Изменчивость солености воды устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) в современный климатический период // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 4. С. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.

ряды наблюдений за солёностью воды устьевого взморья реки Чёрной, полученные при проведении 115 гидролого-гидрохимических съёмок акватории, в среднем по 4 съёмки в год. Точность полученных результатов удовлетворительная, так как случайные ошибки средних значений солёности воды на станциях и горизонтах измерения не превышали 10%. Следовательно, представленные схемы распределения солёности воды можно считать достаточно обоснованными. Увеличение температуры воздуха и воды (на 0,06–0,07°С в год), испарения с водной поверхности, увеличение солёности Чёрного моря, а также дноуглубительные работы способствовали осолонению поверхностного и придонного слоёв воды Севастопольской бухты в среднем на 0,02‰ в год. Эта тенденция (значимость которой оценивалась по критерию Фишера) может иметь негативные последствия – привести к осолонению устьевого участка реки и засолению почв, а также изменению биоценозов восточной части устьевого взморья. Полученные результаты могут быть использованы для балансовых и прогнозных оценок состояния устьевого взморья реки Чёрной.

Ключевые слова: устье реки Чёрной; устьевое взморье; Севастопольская бухта; изменчивость солёности; осолонение; основные факторы осолонения; зависимость солёности от стока.

the estuarine part of the river. It has been established that the desalination of the estuarine zone of the Chernaya River is a multifactorial process that depends not only on the runoff of the Chernaya River, but also on the desalination effect of subsurface runoff, wastewater, features of the estuarine circulation generated by the river runoff and long–wave fluctuations in the water level of the bay. The results obtained can be used for balance and forecast assessments of the state of the estuarine part of the Chernaya River.

Keywords: the estuary of the Chernaya River; estuarine zone; Sevastopol Bay; salinity variability; salinization; the main factors of salinization; the dependence of salinity on runoff.

Введение

Проблемы устойчивого развития Севастопольского региона тесно связаны с рациональным использованием водной среды устьев рек Кача, Бельбек и Чёрная. Наибольшее антропогенное влияние агломерация города Севастополя оказывает на устье реки Чёрной. Здесь плотность населения составляет ~5 000 человек на 1 км^2, а с 2014 года население региона увеличилось почти в 2 раза, что вызвало в последние 5 лет увеличение доли сброса неочищенных сточных вод (в общем объёме стоков) на 8% [Миньковская, 2020]. Для последних тридцати лет (с 1991 по 2020 год) характерна нестабильность хозяйственной деятельности на фоне климатических изменений. Очистка дна и дноуглубительные работы, активизировавшиеся в последние 10 лет, способствовали проникновению осолонённой воды Севастопольской бухты на устьевой участок реки. В работе [Аблязов, 2016] отмечается, что процесс осолонения восточной части Севастопольской бухты привёл к уменьшению видового состава и численности рыб, стал причиной угнетения пресноводной растительности и перемещения пресноводных видов фауны на устьевой участок реки.

В научном сообществе нет единого мнения о причинах и тенденциях изменения солёности

Narivonchik S.V., Minkovskay R.Ya., Dyakov N.N., Malchenko Yu.A., Scherbachenko S.V. Variability of the water salinity at the estuary of the Chernaya River (Sevastopol region) in the modern climatic period. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 4, pp. 359–380. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.

воды прибрежной части и Чёрного моря в целом, так как они рассчитывались за различные периоды, по разным первичным материалам и были обусловлены комплексом разных факторов воздействия на среду. Часть авторов считала, что происходит опреснение воды моря из-за увеличения атмосферных осадков или изменения ветрового режима, при этом сток рек у них значимых тенденций не имел [Гидрометеорологические условия морей Украины, 2012]. По данным этой работы солёность воды в северо-западной части Чёрного моря за период с 1957 по 1995 год в среднем уменьшалась на 0,04–0,06‰ в год, а на постах в период с 1957 по 2011 год отрицательный тренд составлял 0,02‰/год. В статье [Подымов, Зацепин, Очередник, 2021] отмечалось осолонение восточной части моря в среднем на 0,05–0,06‰ в год (за период с 1999 по 2020 год) и предполагалось, что аналогичные тенденции характерны для всего моря. В Севастопольской бухте в период с 2006 по 2014 год солёность воды, по данным [Аблязов, 2016], увеличивалась на 10‰, т.е. на 1,1‰ в год, что в 3 раза больше тренда, вычисленного по результатам наблюдений Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (далее – МГИ РАН) и Севастопольского отделения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (далее – СО ГОИН) за этот же период. Нет консенсуса и в вопросе, почему происходит увеличение (или уменьшение) солёности Чёрного моря. Одни авторы считают, что осолонение моря происходит сверху вниз из-за увеличения температуры поверхностного слоя воды и уменьшения осадков и речного стока, другие – что причиной осолонения является подъём пикноклина к поверхности моря, третьи – указывают на цикличность в изменении толщины верхнего квазиоднородного слоя воды или увеличении солёности воды ниже пикноклина. Подробный обзор этих гипотез приводится в [Подымов, Зацепин, Очередник, 2021].

Морское устье реки Чёрной включает устьевой участок реки длиной 0,39 км и сложное устьевое взморье, закрытая часть которого имеет протяжённость 9,20 км, а открытая, куда при паводках распространяется распреснённая вода, ~2–3 км. Закрытая часть устьевого взморья состоит из 15 бухт, наибольшие из которых – Южная (2,35 км) и Севастопольская (6,45 км) бухты, соединяющиеся каналом «Река Чёрная» (0,64 км) с сооружённым в середине прошлого века на устьевом участке реки Чёрной «Инкерманским лиманом» (2,11 км). Водообмен между Севастопольской бухтой и открытой частью устьевого взморья затруднён, так как в устье бухты в период с 1976 по 1986 год были построены ограничивающие его ширину (до 0,41 км) молы. Максимальная глубина устьевого взморья 19,7 м, ширина изменяется от 0,07 км в вершине «Инкерманского лимана» до 1,29 км в устье бухты.

В настоящее время вершина устья реки Чёрной ограничена искусственным водопропускным сооружением. Через него в бухту в среднем поступает около 12% (сбросы сточных вод в этом стоке составляют ~28%) от стока воды реки Чёрной, норма которого на гидропосту у села Хмельницкое в рассматриваемый современный период (с 1991 по 2020 год) была равна 0,055 км^3 (1,75 м^3/с). По сравнению с предыдущим климатическим периодом, с 1961 по 1990 год, средний многолетний сток реки Чёрной, по данным Государственного водного кадастра [1], уменьшился на 3%, т.е. в пределах точности его определения, а в последнее десятилетие – на 11%. Река Чёрная имеет паводочный режим стока с водосборной площади, равной 427 км^2. Сток зарегулирован Чёрнореченским водохранилищем (с 1956 года), а также 59-ю прудами и 4-мя небольшими водохранилищами, сооружёнными в разные годы на притоках реки.

По данным [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991] в период с 1961 по 1990 год внутригодовая изменчивость солёности воды у берега в центральной части Севастопольской бухты, на морской

[1]Государственный водный кадастр. Гидрологический ежегодник в 30 томах. 1961–1990 годы.

гидрометеорологической станции (далее – МГ-II) Севастополь, была незначительной – её средние месячные значения имели среднеквадратичное отклонение в пределах 1–3% (0,27–0,59‰). Паводки реки Чёрной отмечаются эпизодически, в любой сезон года. Иногда они существенно влияют на водную среду устьевого взморья, распресняя поверхностный слой воды от 3‰ в вершине Севастопольской бухты до 10,1‰ в её устье.

Солёность воды является удобной критериальной характеристикой зоны взаимодействия пресной и солёной воды. По ней можно определять плотность воды, исследовать течения, фронтогенез, особенности проникновения осолонённой воды на устьевой участок реки, степень влияния пресной воды на устьевое взморье, обменные и другие устьевые процессы. Являясь одним из основных абиотических компонентов экосистем морских устьев рек, солёность воды лимитирует жизненные циклы пресноводных и солоноводных гидробионтов. Адвекция речной и морской воды сопровождается переносом гидробионтов с различным солевым обменом, которые, попадая в опасную для них среду, гибнут, увеличивая экологические риски [Хлебович, 2015].

Осолонение и распреснение устьевого взморья реки Чёрной – многофакторный процесс, зависящий от стока реки Чёрной, подруслового и склонового стока, сточных вод, особенностей устьевой циркуляции, генерируемой стоком реки и длинноволновыми колебаниями уровня воды. На солёность воды оказывает влияние ветровой и температурный режимы, от которых зависит перемешивание воды и испарение, а также дноуглубительные работы, способствующие поступлению в устье солёной воды.

Поэтому исследование изменчивости солёности воды устья реки Чёрной в современный климатический период является актуальной и важной научной задачей океанографии, гидрологии, и других смежных наук (а также целью данной работы), а её решение направлено на усовершенствование природопользования и сохранение природы Севастопольского региона.

Материалы и методы

Стационарные наблюдения за солёностью воды на МГ-II Севастополь в рассматриваемый современный период не производились [Гидрометеорологические условия, 2012]. Для анализа изменчивости солёности воды устьевого взморья реки Чёрной использовались данные экспедиционных наблюдений (115 океанографических съёмок), МГИ РАН и СО ГОИН. К сожалению, указанные мореведческие организации, а также ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Департамент природных ресурсов и экологии города Севастополя, Санитарная эпидемиологическая служба Севастополя выполнение натурных исследований в устье реки Чёрной не координируют, проводят их по разной схеме станций, различными методиками и в разное время, что увеличивает трудозатраты и финансирование на исследовательские работы, снижая возможность обобщения ценной первичной информации в рамках комплексного изучения морского устья реки Чёрной.

В основном экспедиционные исследования выполнялись в период межени. Их дискретность (по годам) была неодинаковой (рисунок 1), а схемы станций наблюдений МГИ РАН и СО ГОИН не всегда точно совпадали (рисунок 2). Качество первичной информации было удовлетворительным. Около 3% данных в обобщении не учитывалось, так как они были получены при экстремальных гидрометеорологических условиях и рассматривались отдельно.

Как видно из рисунка 1, начиная с 2014 года система наблюдений изменилась и стала более информативной: выполнялось по 5–7 экспедиций в год. Ряды наблюдений неэквидистантные – наибольший массив данных приходился на станции, расположенные вдоль оси Севастопольской бухты (рисунок 2). Однако средние значения солёности воды, рассчитанные по коротким рядам наблюдений на отдельных прибрежных станциях и по восстановленным удлинённым рядам, либо совпадали, либо

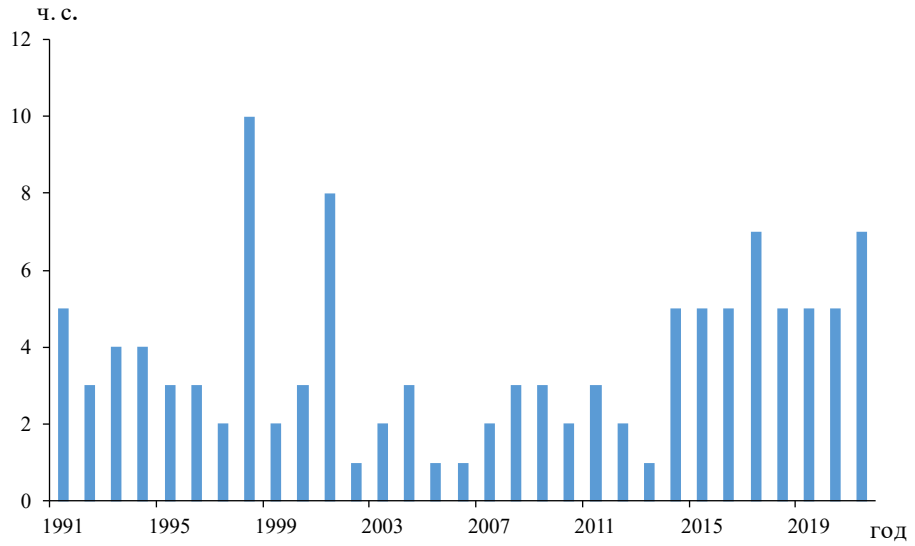

Рисунок 1. Количество (ч. с. – число случаев) океанографических съёмок взморья реки Чёрной по годам.

Figure 1. Number of cases of oceanographic surveys of the Chernaya River estuarine zone by years.

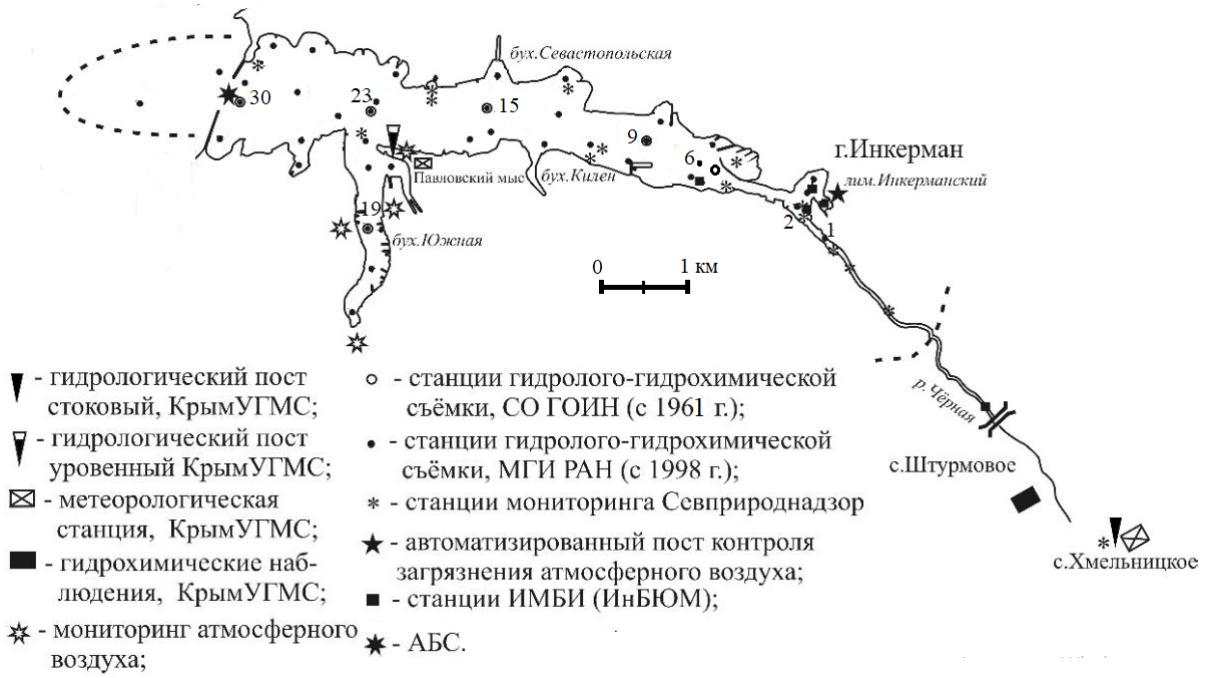

Рисунок 2. Схема комплексного мониторинга морского устья реки Чёрной в период с 1991 по 2020 год.

Figure 2. The complex monitoring of the estuary of the Chernaya River in 1991–2020.

отличались в пределах точности определения солёности воды.

Сведения о расходе воды реки Чёрной были взяты из баз данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов[2] и Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее – ФГБУ «Крымское УГМС»). Мониторинг основных характеристик режима и качества воды реки Чёрной выполняет ФГБУ «Крымское УГМС» на гидрологическом посту в селе Хмельницкое (в 11 км от устья). Расход воды реки Чёрной,

[2]Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru/.

поступающий в вершину её устья, измеряется эпизодически МГИ РАН начиная с 2017 года и является пока его приближённой оценкой.

Расстояния и глубины определялись по спутниковым и гидрографическим картам, а также по натурным данным во время экспедиций.

Материалы о средних месячных значениях температуры воздуха, воды и уровня на МГ-II Севастополь предоставлены СО ГОИН. Срочные метеорологические данные по метеостанции Севастополь взяты с сайта «Архив погоды»[3].

Скорость течения измерялась эпизодически, при этом использовались вертушки гидрометрические ВММ (вертушка Молчанова модернизированная), ИСП-1 (измеритель скорости потока), многопараметрический зонд «ValeportMidas». Точность определения скорости течения составляла 0,02 м/с, направления течения ±10°.

Солёность определялась чаще всего в поверхностном и придонном слоях воды аргентометрическим методом или методом зондирования автономным портативным гидрозондом ГАП-АК-12р, разработанным в МГИ РАН, и рассчитывалась по электропроводности воды. Поэтому был сделан анализ однородности рядов наблюдений [Орлов, 2019], выполненных различными ведомствами, с использованием критерия Стьюдента (1) для уровня значимости 0,95.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{(m-1)\sigma_x^2 + (n-1)\sigma_y^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}} \quad (1)$$

где t – рассчитанное значение критерия Стьюдента;

$\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние арифметические значения двух выборок, длиною m и n соответственно;

σ_x^2, σ_y^2 – выборочные дисперсии.

Поскольку ряды наблюдений оказались однородными, они были объединены в один общий ряд.

Точность определения солёности распреснённой воды при солёности менее 1‰ составляла 0,5‰, а при солёности больше 5‰ – 0,03‰.

Использовались стандартные методы статистического анализа, рекомендованные в работах [Пановский, Брайер, 1972; Рождественский, Чеботарёв, 1974]. Оценка достоверности коэффициентов корреляции выполнялась по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05.

Значимость тенденций оценивалась по F-критерию (критерию Фишера) для вероятности неравенства нулю углового коэффициента на уровне 95% [Пановский, Брайер, 1972].

Случайная ошибка средних значений рассчитывалась по формуле [Рождественский, Чеботарёв, 1974]

$$\sigma_{\bar{s}} = \frac{C_v \bar{s}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

где $\sigma_{\bar{s}}$ – случайная ошибка средней арифметической солёности воды, $\bar{s}$, на станциях в поверхностном и придонном слоях воды за период с 1991 по 2020 год;

C_v, n – коэффициент вариации солёности воды и длина ряда наблюдений на каждой станции соответственно.

Примерно 25% съёмок производилось в течение двух и даже трёх дней при разных гидрометеорологических ситуациях, без учёта суточного хода солёности воды (в первой половине дня превалировал приток солёной воды из моря, во второй – отток в море). Игнорирование суточной динамики воды в бухте при обобщении могло привести к некоторому завышению солёности восточной части устьевого взморья и занижению солёности её центральной части. Однако эти погрешности в среднем не превышали точности определения солёности распреснённой воды.

Так как случайные ошибки средних значений солёности воды в точках измерений, рассчитанные по формуле (2), не превышали 10% (3–9%), полученные результаты осреднения можно считать достоверными, близкими к нормам [Рождественский, Чеботарёв, 1974].

[3]Архив погоды в Севастополе [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Севастополе.

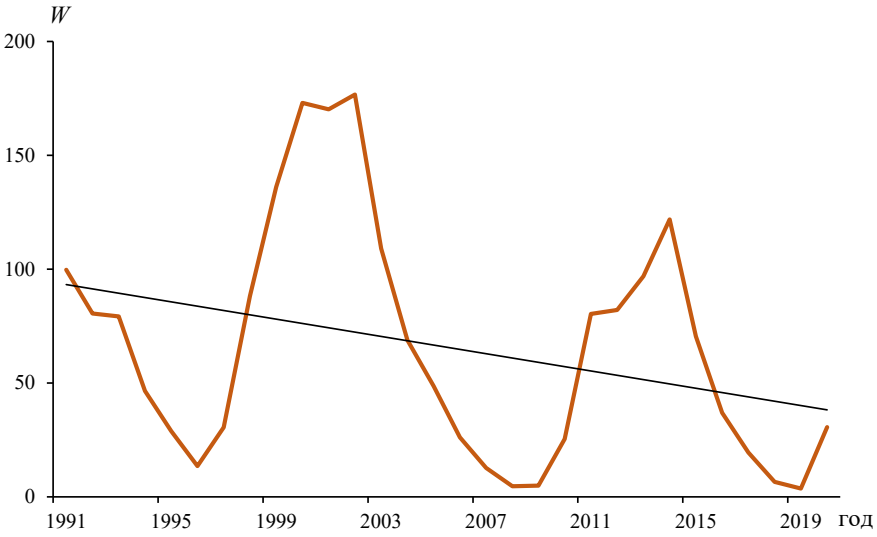

Рисунок 3. Изменчивость чисел Вольфа (*W*).
Figure 3. Wolf number (*W*) variability.

Выбор периода осреднения, с 1991 по 2020 год, обусловлен анализом цикличности солнечной активности (рисунок 3) и рекомендациями Всемирной метеорологической организации [Руководство, 2014]. Рассматриваемый современный период включает почти три модуляции 11-летних солнечных циклов Швабе (имеющих по 3 экстремума) и полтора цикла Хейла. Значимых тенденций солнечной активности в рассматриваемый период не обнаружено. По данным работы [Боков, Ловелиус, Ретеюм, 2018], в 1990 году произошла одновременная смена 4-х значимых циклов (44, 179, 1 430 и 11 440 лет), положив начало новой эпохе в Солнечной системе. Следовательно, выбранный климатический период можно считать репрезентативным для оценки современных режимных характеристик.

Расчёт и построение карта-схем среднего многолетнего, за период с 1991 по 2020 год, распределения солёности воды выполнялись для средних гидрометеорологических условий по 33 станциям океанографических съёмок устьевого взморья реки Чёрной (рисунок 2). Для построения использовалась программа Surfer (version 13.0), метод оптимальной триангуляции Б.М. Делоне [Скворцов, 2002] и метод скользящего среднего.

Полученные распределения средних многолетних арифметических значений солёности поверхностного и придонного слоёв воды взморья реки Чёрной хорошо согласуются с распределениями модальных значений солёности, рассчитанными за тот же период наблюдений в тех же точках измерений. Следовательно, средние величины солёности воды, пространственная изменчивость которых показана на карта-схемах, являются наиболее вероятными и достаточно представительными параметрами распределения, которое близко к нормальному.

Обсуждение результатов

Временная изменчивость солёности взморья реки Чёрной

За период с 1991 по 2020 год отмечалась значимая тенденция (0,02‰/год) увеличения средней годовой солёности воды поверхностного и придонного слоёв устьевого взморья реки Чёрной на всех станциях и горизонтах (рисунок 4). При этом в последние 10 лет положительные тенденции солёности поверхностного слоя воды достигали 0,05‰/год, а придонного – 0,06‰/год, то есть были такими же, как в восточной части Чёрного моря [Подымов, Зацепин, Очередник, 2021].

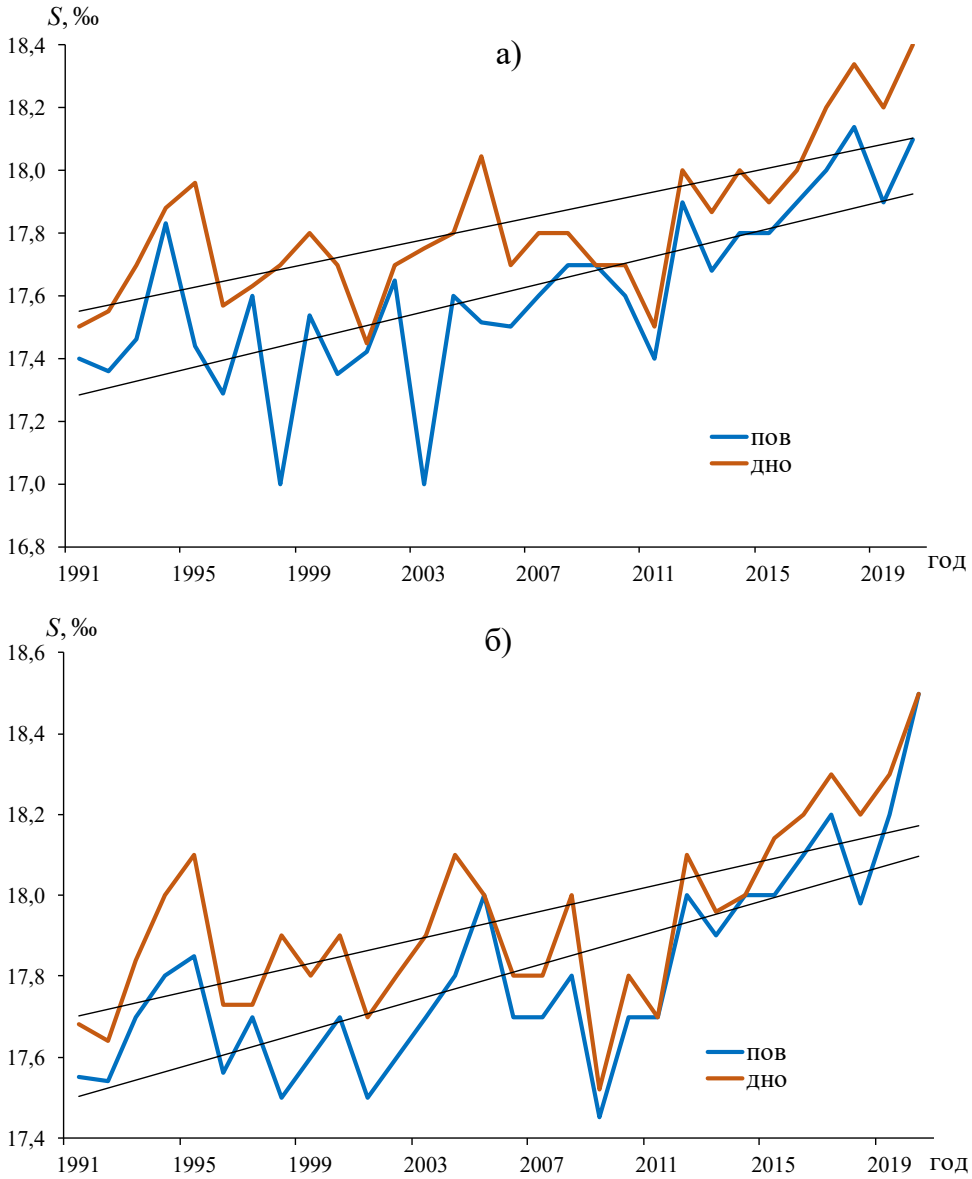

Рисунок 4. Многолетняя изменчивость средней годовой солёности воды (*S*, ‰) восточной (а) и западной (б) частей Севастопольской бухты в период с 1991 по 2020 год.
Figure 4. Long-term variability of the average annual water salinity (*S,* ‰) of the eastern (a) and western (b) parts of the Sevastopol Bay in the period from 1991 to 2020.

Сезонная изменчивость солёности воды на устьевом взморье реки Чёрной выражена незначительно, размах сезонного хода в среднем составляет 0,13‰, стандартное отклонение 0,26‰ [Миньковская, 2008]. По натурным данным МГИ РАН суточная изменчивость солёности воды хорошо согласуется с суточным ходом уровня воды [Миньковская, 2020]. Длинноволновые колебания уровня воды из-за эффекта конфузорности усиливаются в узости восточной части Севастопольской бухты и «Инкерманского лимана», достигая в среднем 10–20 см. Рост уровня воды, отмечающийся обычно до середины дня, соответствует увеличению солёности устьевого взморья реки Чёрной из-за поступления морской воды в бухту и вытеснения распреснённой воды на устьевой участок реки. Во второй половине дня наблюдается уменьшение солёности и смещение линзы распреснённой воды потоком, направленным от реки к морю [Миньковская, 2020].

Минимальные значения солёности воды на устьевом взморье реки Чёрной чаще всего отмечаются с февраля по апрель, максимальные – в октябре.

Для выяснения возможной причины указанных тенденций солёности воды исследовалась изменчивость гидрометеорологических характеристик по данным стационарных наблюдений на МГ-II Севастополь (Павловский мыс, рисунок 2) и стока реки Чёрной на гидропосту в селе Хмельницкое, а изменение состояния Чёрного моря анализировалось по литературным источникам.

Изменение солёности Чёрного моря

Осолонение устьевого взморья реки Чёрной происходит одновременно с увеличением солёности восточной части Чёрного моря, отмечавшемся в работе [Подымов, Зацепин, Очередник, 2021] в период с 1999 по 2020 год. По мнению авторов, причиной этого является естественная цикличность пресноводного баланса моря, смена многоводной фазы стока рек бассейна маловодной, уменьшение осадков, глобальное потепление климата, которое проявляется в увеличении температуры воздуха и воды, а также активизация нижнебосфорского течения из Мраморного моря.

Долговременные изменения солёности воды в западной части Чёрного моря достоверно оценить по материалам наблюдений можно только за период с 1950 по 1995 год [Белокопытов, 2014]. При этом в данной работе приводятся сведения о происходящем в период с 1980 по 2012 год опреснении поверхностного слоя моря и осолонении глубинных слоёв воды, ниже 100 м.

В статье [Kubryakov, Mikaelyan, Stanichny, 2021] указано, что в период с 2010 по 2020 год отмечается увеличение солёности воды в центральной части Чёрного моря, а также растёт испарение, но значения тенденций этих характеристик не приводятся.

Данные о росте солёности Чёрного моря [Подымов, Зацепин, Очередник, 2021; Kubryakov, Mikaelyan, Stanichny, 2021] могут свидетельствовать о связи между увеличением солёности моря и устьевых взморьев рек Севастопольского региона [Наривончик и др., 2022], солёность которых значимо увеличивается. Так, на взморьях рек Бельбек, Кача и Альма средняя многолетняя солёность воды увеличивалась на 0,03–0,05‰ в год. При этом тенденции осолонения устьевого взморья реки Чёрной (0,02‰ в год) были почти в два раза меньше, чем рост солёности воды на открытых устьевых взморьях рек юго-западного Крыма [Наривончик и др., 2022], что обусловлено особенностями взаимодействия разнородных вод на устьевых взморьях разного типа [Миньковская, 2020]. При прочих равных гидрометеорологических условиях, на устьевых взморьях открытого типа распресняющее влияние стока менее эффективно, так как здесь ветро-волновое перемешивание и водообмен с морем более интенсивны, чем в закрытой молами бухте, и поверхностный слой воды за тот же промежуток времени осолоняется быстрее. К тому же взморье реки Чёрной кроме речного стока также распресняют и другие источники пресной воды (сточные и ливневые воды, склоновый и подрусловой сток).

Атмосферные осадки, сток и уровень воды

Зависимость солёности воды моря и устьев рек от пресного баланса очевидна, но изменчивость осадков и стока рек бассейна Чёрного моря в период с 1991 по 2020 год значимых тенденций не имела [Миньковская, 2020]. За этот же период не обнаружены значимые тренды в изменениях суммы осадков, уровня воды бухты на МГ-II Севастополь и стока реки Чёрной (рисунок 5). Следовательно, увеличение солёности устьевого взморья реки Чёрной в период с 1991 по 2020 год (рисунок 4) не вызвано повышением уровня Чёрного моря, уменьшением суммы осадков и стока реки Чёрной, а также стока рек Черноморского бассейна, поскольку эти процессы не имели значимых тенденций. Однако именно в последние, более маловодные, годы (рисунок 5), когда частота наблюдений в межень увеличилась (рисунок 1), значения тенденций осолонения поверхностного и придонного слоёв воды возросли.

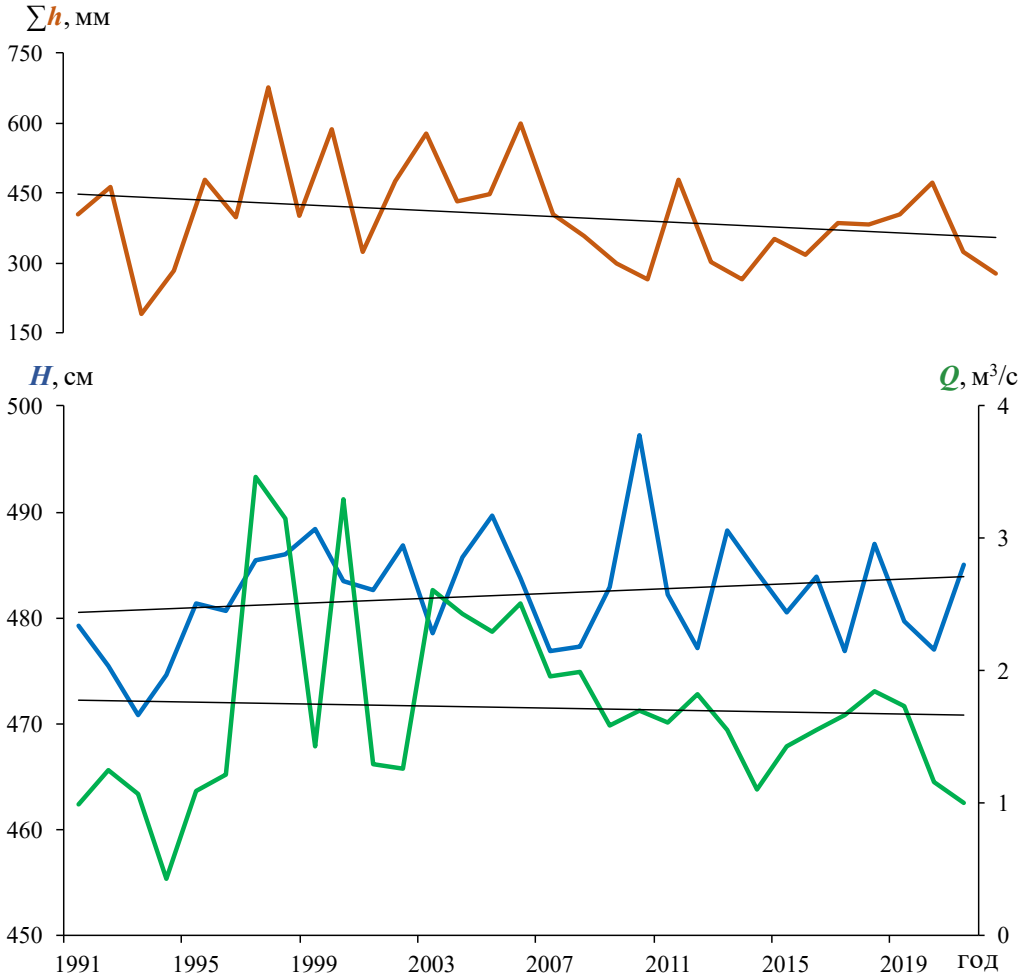

Рисунок 5. Изменчивость средних годовых значений суммы осадков (Σ*h*, мм), уровня воды на МГ-II Севастополь (*H*, см) и расхода воды реки Чёрной на гидропосту в селе Хмельницкое (*Q*, м^3/с) в период с 1991 по 2020 год.

Figure 5. Variability of the average annual values of the sum of precipitation (*Σh*, mm), water level on the MH-II Sevastopol (*H*, cm) and water discharge of the Chernaya River at the gauging station in the village of Khmelnitskoye (*Q*, m^3/s) in the period from 1991 to 2020.

Сток реки Чёрной формируется в основном в её верховьях, поэтому осадки, выпадающие на побережье (в городе Севастополе), не оказывают влияния на его величину (коэффициент корреляции между суммой осадков и стоком составляет 0,29), но влияют на уровень воды Чёрного моря (рисунок 5), увеличивают склоновый и ливневой сток и распресняют, как и река, поверхностный слой воды устьевого взморья. Как указано в работе [Данилов-Данильян, 2020], несмотря на глобальное увеличение осадков из-за потепления климата, под действием комплекса локальных и региональных факторов, в засушливых регионах, к которым относится и Крым, увеличение осадков нехарактерно и даже возможно их уменьшение в будущем (рисунок 5). Активизация зонального переноса воздушной массы с запада, учитывая небольшие размеры бассейна реки Чёрной, могла способствовать выпадению осадков восточнее или юго-восточнее, за пределами рассматриваемого микроландшафта. Действительно, из-за участившихся зимой средиземноморских циклонов на юго-восточном и восточном побережьях Крыма, в городах Ялта и Феодосия, отмечается тенденция роста осадков [Гидрометеорологические условия, 2012].

В меженный период, характерный для большей части года, когда выполнялось большинство съёмок устьевого взморья,

увеличивается доля грунтового и карстового питания реки, преобладает сульфатно-натриевый тип воды, летом возрастает водозабор и испарение, а также сброс сточных и дренажных вод повышенной минерализации. Из-за этого увеличивается содержание солей в речной воде, поступающей в бухту. На устьевом участке реки уменьшается концентрация карбонатов и кальция и увеличивается доля сульфатов, хлоридов и магния, которые вносят определённый вклад в повышение концентрации солей на устьевом взморье реки Чёрной.

Вода устьевого взморья реки Чёрной опресняется не только осадками и поверхностным речным стоком, но и подрусловым, величина которого ранее не оценивалась, хотя подрусловой сток крымских рек может быть в несколько раз больше поверхностного [Каюкова, 2015]. В отдельные съёмки (~21% от их общего количества) в придонном слое воды Севастопольской бухты солёность была ниже, чем в вышерасположенном слое, что может быть косвенным подтверждением гипотезы о поступлении стока пресной воды в бухту по палеоруслам, с подрусловыми и подземными водами. Не исключено, что в придонный слой бухты могли также поступать сточные воды из канализационных сетей, значительная часть которых долгое время находилась в аварийном состоянии. Постоянный приток пресной воды характерен и для Южной бухты (рисунок 2).

Аварийные сбросы сточных вод и ливневые стоки, поступающие в Севастопольскую бухту, а также сбросы сточных вод в реку Чёрную у села Штурмовое и посёлка Сахарная Головка (рисунок 2) в среднем составляют около 3% стока реки Чёрной у села Хмельницкое и вносят определённый вклад в опреснение поверхностного слоя воды. Но влияние сточных вод на солёность бухты ограничено радиусом 25–50 м. Вода, поступающая на устьевое взморье по руслу устьевого участка реки, почти на 1/3 состоит из сбросов водопроводных очистных сооружений гидроузла в районе села Штурмовое (далее – ВОС ГУ 3) и сбросов канализационных очистных сооружений в посёлке Сахарная Головка (далее – КОС 3). Несмотря на то, что в последние годы отмечается увеличение сброса сточных вод ВОС ГУ 3 на 1,8 тыс. м^3/год, это не привело к уменьшению солёности воды устьевого взморья, так как сбросы КОС 3 уменьшаются на 1,1 тыс. м^3/год [Вержевская, Миньковская, 2020].

Всё-таки основной приходной составляющей баланса пресной воды устьевого взморья реки Чёрной, по нашим предварительным оценкам, является русловой и подрусловой сток реки и впадающих в бухту балок, а также ливневой и склоновый сток при выпадении осадков, особенно с урбанизированных территорий.

Влияние ветра

Увеличение скорости ветра и повторяемости его нагонных направлений способствует осолонению, так как интенсифицируется перемешивание поверхностного слоя воды с более солёной водой нижележащих слоёв, растёт испарение и число нагонов. Но, по данным [Гидрометеорология и гидрохимия, 1991; Гидрометеорологические условия, 2012] скорость ветра (включая средний и сильный ветер) в современный период имеет отрицательную тенденцию. Следовательно, устьевое взморья реки Чёрной из-за уменьшения скорости ветра могло бы распресняться, а не осолоняться.

Анализ изменчивости средней годовой скорости ветра (рисунок 6) на МГ-II Севастополь, расположенной в месте слияния Севастопольской и Южной бухт (рисунок 2), показал, что ряды наблюдений за этим параметром среды неоднородны [Орлов, 2019]. Как видно из рисунка 6, тенденций скорости ветра в периоды с 1991 по 2010 год и с 2011 по 2020 год нет, но во втором периоде отмечается скачкообразное уменьшение средней скорости ветра на 0,6 м/с. Из-за неоднородности рядов наблюдений выводы о значимости отрицательного тренда скорости ветра в рассматриваемый период некорректны.

Причиной неоднородности рядов наблюдений за режимом ветра явился перенос анемометра на метеорологическую площадку в 2011 году, в результате чего высота его расположения уменьшилась почти в 2 раза и

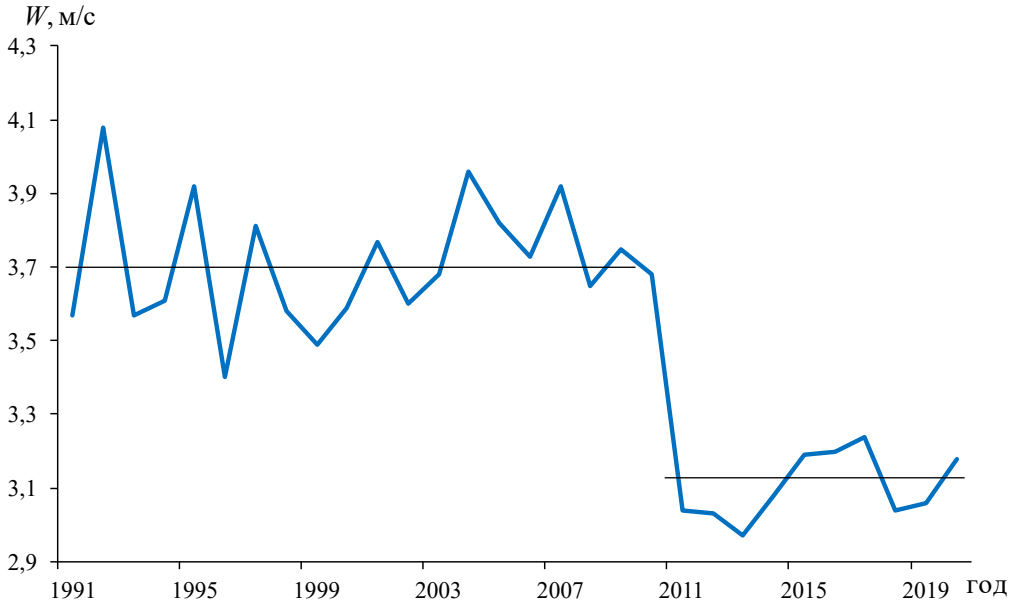

Рисунок 6. Многолетняя изменчивость средней скорости ветра (*W*, м/с) в период с 1991 по 2020 год.
Figure 6. Long-term variability of the average wind speed (W, m/s) in the period from 1991 to 2020.

преобладающие направления ветра стали экранироваться ближайшими строениями.

В статье [Баянкина и др., 2015] показано, что смена циклов солнечной активности может являться причиной изменения скорости ветра над Чёрным морем, а следовательно и скорости течений. Так, с наступлением 24-го цикла (рисунок 3) солнечной активности (период с 2009 по 2020 год) над западной частью Чёрного моря наблюдалась минимальная ветровая активность (рисунок 6), что обусловлено пониженным атмосферным давлением при реализации положительной фазы Североатлантического колебания, а в предыдущий, 23-й солнечный цикл, наоборот приземное давление было высоким и скорости ветра существенными. От приземного давления, скорости ветра и течений зависит положение пикноклина [Баянкина и др., 2015]. Эти же факторы влияют на солёность моря. Поэтому очевидно, что ветровая активность в период с 1991 по 2020 год уменьшилась, и ветер не был причиной увеличения солёности воды.

Над Севастопольской бухтой преобладают ветра сгонных направлений. В то же время, отмечается уменьшение скорости преобладающих сгонных ветров и активизация переноса атлантической и средиземноморской воздушных масс с запада и юга [Горячкин, Иванов, 2008; Гидрометеорологические условия, 2012]. Это способствует повышению температуры воздуха в рассматриваемом регионе и нагону солёной воды на устьевое взморье из прилегающей части Чёрного моря. Однако сильные нагонные ветра имели небольшую повторяемость [Гидрометеорологические условия, 2012] и тенденцию к уменьшению скорости ветра, что вряд ли могло способствовать осолонению воды прибрежной части юго-западного Крыма.

В статье [Лавров, 2019], на основе данных водноиспарительных станций и математического моделирования, показано, что при изменении температуры воздуха и скорости ветра на 1%, влияние потепления на испарение с водной поверхности в 3,5 раз превосходит влияние изменения ветровой активности.

Температура воздуха, воды и испарение

Известно, что увеличение температуры воздуха приводит к увеличению температуры воды и перепада давления водяного пара между водой и атмосферой. Это обусловливает увеличение испарения, а, следовательно, и солёности воды. Подтверждением потепления климата являются обнаруженные положительные тенденции средней годовой температуры воздуха (0,07°С/год) и воды (0,06°С/год) на МГ-II

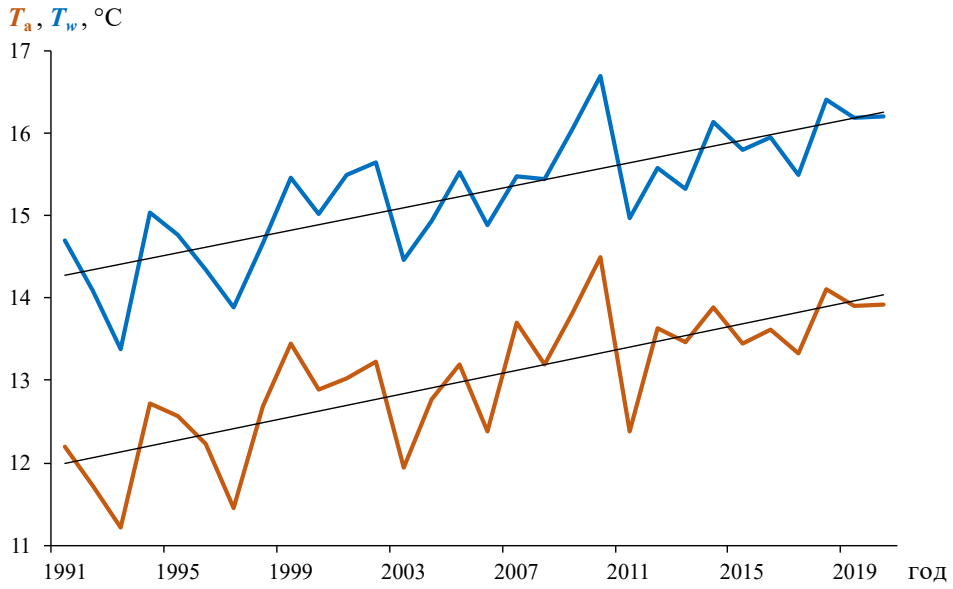

Рисунок 7. Многолетняя изменчивость температуры воздуха (T_a) и воды (T_w) в городе Севастополе.
Figure 7. Long-term variability of air (T_a) and water (T_w) temperature in the Sevastopol city.

Севастополь (рисунок 7) в современный климатический период (в период с 1991 по 2020 год).

Выявленные тенденции температуры воздуха и воды могут быть объяснены интранзитивностью земного климата, активизацией переноса воздушной массы [Гидрометеорологические условия, 2012] с запада на восток, обусловленной автоколебаниями системы «океан – атмосфера – суша – лёд», ростом сейсмической и вулканической активности в Северном полушарии, включая Крым [Боков, Ловелиус, Ретеюм, 2018], откликом Земли на воздействие гелио-космических факторов[4], увеличением содержания углекислого газа в атмосфере и комплексом разных причин [Данилов-Данильян, 2020]. Отмечаемое многими авторами потепление климата до сих пор не находит однозначного объяснения. Однако не подлежит сомнению, что увеличение температуры воздуха и воды приводит к росту испарения и концентрации соли в воде.

Причем это не значит, что осадки возрастают на величину прироста испарения и выпадают там же, где происходит испарение, компенсируя тем самым осолонение водоёма, поскольку на этот процесс влияют многие факторы [Данилов-Данильян, 2020], например Крымские горы.

По приблизительным расчётам, используя выводы из работы [Лавров, 2019], за период с 1991 по 2020 год совместное разнонаправленное влияние уменьшения скорости ветра могло понизить величину испарения на 8%, а рост температуры воздуха – повысить его величину на 28%, то есть величина испарения в среднем за период с 1991 по 2020 год могла возрастать на 0,7% в год.

Поскольку сумма осадков не уменьшалась (рисунок 5), основным метеорологическим фактором осолонения устьевого взморья реки Чёрной можно считать потепление климата. Из-за роста температуры воздуха увеличилась температура воды и почвы, уменьшилось давление и скорость ветра, повысилось положение пикноклина в Чёрном море [Баянкина и др., 2015], выросло испарение с поверхности бассейна реки Чёрной, Севастопольской бухты, Чернореченского водохранилища и прудов, увеличилась минерализация речной и морской воды. Регулирование стока реки Чёрной сгладило указанные эффекты в многоводные годы, но в маловодные годы они уже стали заметны (рисунок 5).

[4]Ретеюм А.Ю. Как Солнечная система управляет климатом Земли. [Электронный ресурс]. URL: https://regnum.ru/news/innovatio/3487241.html.

Влияние основных гидрологических факторов на солёность воды

Зависимость солёности воды (S, ‰) взморья реки Чёрной от среднего суточного расхода воды (Q, м^3/с) была получена ранее [Миньковская, 2020] по данным СО ГОИН за период с 1966 по 2018 год. Коэффициент корреляции этой зависимости был равен -0,96±0,04. Построенная по данным МГИ РАН зависимость $S = f(Q)$ за период с 1991 по 2020 год (рисунок 8) имела менее тесную связь (-0,85±0,04). Причиной этого могло быть увеличение минерализации воды реки Чёрной [Миньковская, 2008, 2020] в последний десятилетний период и усиление роли бризов из-за увеличения периода их воздействия в результате потепления климата и слабоветрия (рисунок 6) в последний тридцатилетний период [Гидрометеорологические условия, 2012].

По сравнению с предыдущей работой [Миньковская, 2008] существенно увеличился разброс точек на графике связи $S = f(Q)$ и в 6 раз уменьшился диапазон, в котором такая эмпирическая зависимость (рисунок 8) может быть использована. К тому же океанографические съёмки, выполняемые МГИ РАН в восточной части Севастопольской бухты, в основном делались в межень, в первой половине дня, когда преобладал морской бриз, то есть преимущественно отмечались течения из моря в бухту, приносящие более солёную воду в её кутовую часть. Поэтому на графике (рисунок 8) съёмок во время нагонных явлений больше, чем при сгонах.

Как видно из рисунка 8, наблюдения в период паводков единичны, потому что чаще всего паводок на реке Чёрной наблюдался при неблагоприятных погодных условиях, что затрудняло проведение съёмки в бухте. Очевидно, что на солёность воды в восточной части бухты, в зоне влияния речного стока, существенно воздействуют сгонно-нагонные и бризовые явления. Так, при одном и том же стоке реки в среднем, при нагоне (морском бризе) солёность воды увеличивается на 0,5‰, а при сгоне (береговом бризе) уменьшается примерно на такую же величину. Поэтому для периода меженного стока реки Чёрной, в пределах 0,5–2,5 м^3/с, коэффициент корреляции зависимости $S = f(Q)$ составил -0,63±0,03.

Влияние паводков на устьевое взморье проявляется не только в его опреснении, но и приводит к активизации устьевой циркуляции, когда отток поверхностной пресной воды компенсируется притоком более плотной солёной воды из нижних слоёв.

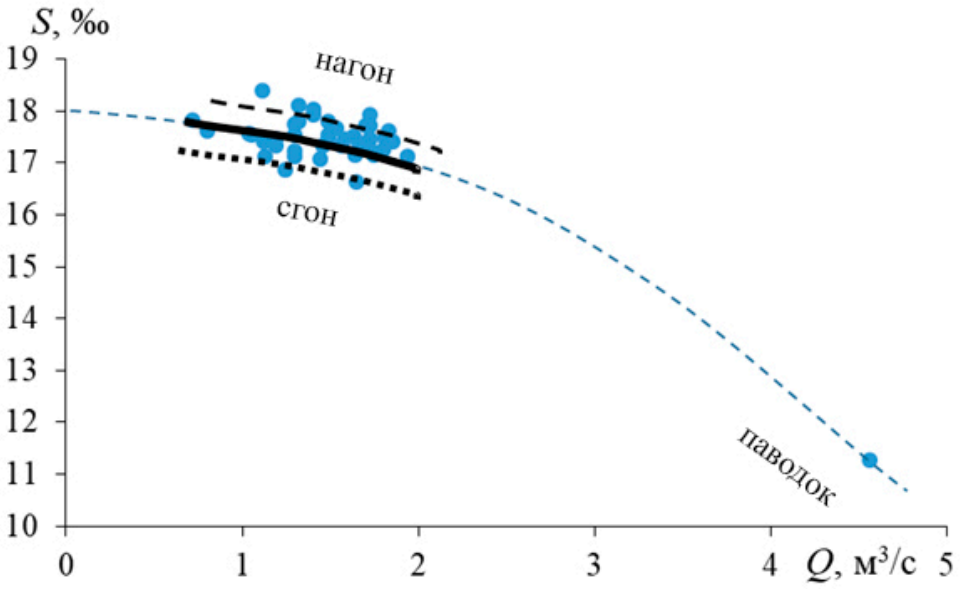

Рисунок 8. Связь между солёностью воды (S, ‰) в восточной части Севастопольской бухты и расходом воды (Q, м^3/с) реки Чёрной у села Хмельницкое.

Figure 8. The relation between water salinity (S, ‰) in the eastern part of the Sevastopol Bay and water discharge (Q, m^3/s) of the Chernaya River near the village Khmelnytsky.

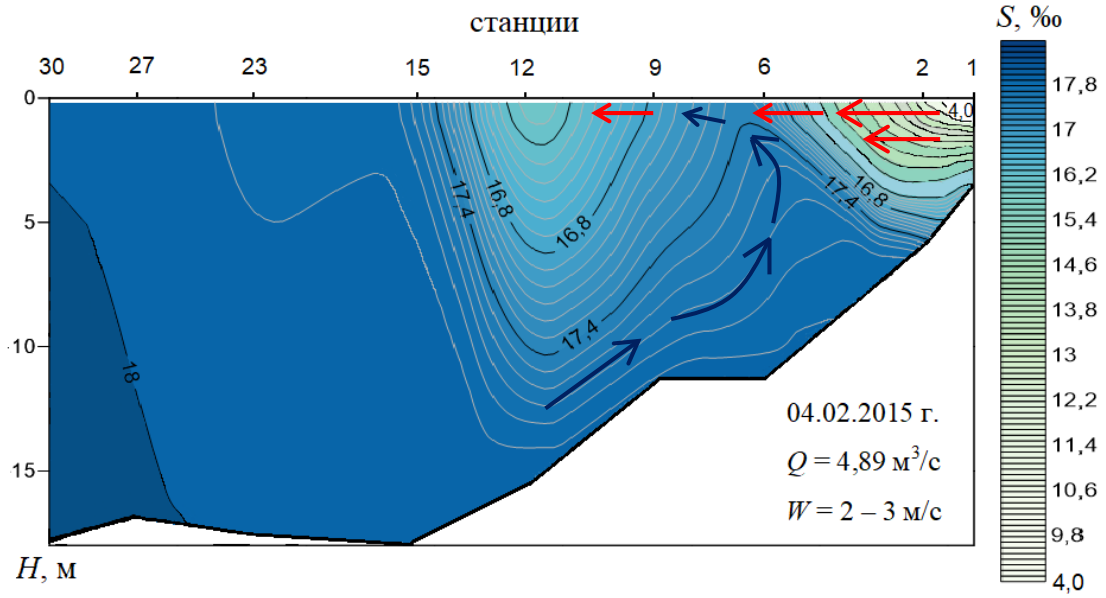

Рисунок 9. Устьевая циркуляция на взморье реки Чёрной в период паводка 04.02.2015.
Figure 9. Estuary circulation on the estuarine zone of the Chernaya River during the flood on 04.02.2015.

Например, из-за оттепели и продолжительных ливневых осадков, отмечавшихся с 31.01.2015 по 05.02.2015, в верховье реки Чёрной сформировался типичный паводок. Средний суточный расход воды реки Чёрной 03.02.2015 у села Хмельницкое был равен 4,89 м^3/с, 04.02.2015 (в период съёмки устьевого взморья) – 4,56 м^3/с, а максимальный расход реки достигал 5,40 м^3/с. Во время проведения съёмки наблюдался слабый ветер, 2–3 м/с, переменных направлений, который не оказывал существенного влияния на распределение солёности воды.

Ситуация формирования поля солёности при маловетрии и повышенном стоке реки Чёрной показана на рисунке 9. Стоковые течения в поверхностном слое устьевого взморья выносили в Севастопольскую бухту более пресную воду, а в придонном слое активизировались обратные течения, направленные к вершине устья. Подъём солёной придонной воды в восточной части бухты компенсировал отток пресной воды в поверхностном слое и, в результате местного апвелинга, происходило осолонение воды в слое ветрового перемешивания.

Иногда такая динамика вод приводила к отрыву пресноводной линзы и её адвекции, практически без смешения, по направлению к морю. При этом вертикальные градиенты солёности воды достигали 3‰ на метр, а горизонтальные – 4‰ на километр, что в условиях преобладающего слабоветрия препятствовало смешению разнородных вод. Такие особенности взаимодействия опреснённой и осолонённой воды на устьевом взморье реки Чёрной наблюдались примерно в 27% рассмотренных съёмок.

Пространственная изменчивость солёности воды

По данным наблюдений в период с 1991 по 2020 год впервые получены схемы среднего многолетнего распределения солёности на устьевом взморье реки Чёрной в поверхностном и придонном слоях воды (рисунок 10). Они характеризуют средние климатические условия, когда сток воды реки Чёрной у села Хмельницкое близок к норме, а средние многолетние сгоны–нагоны (приливы–отливы, сейши и бризы) взаимно компенсировались.

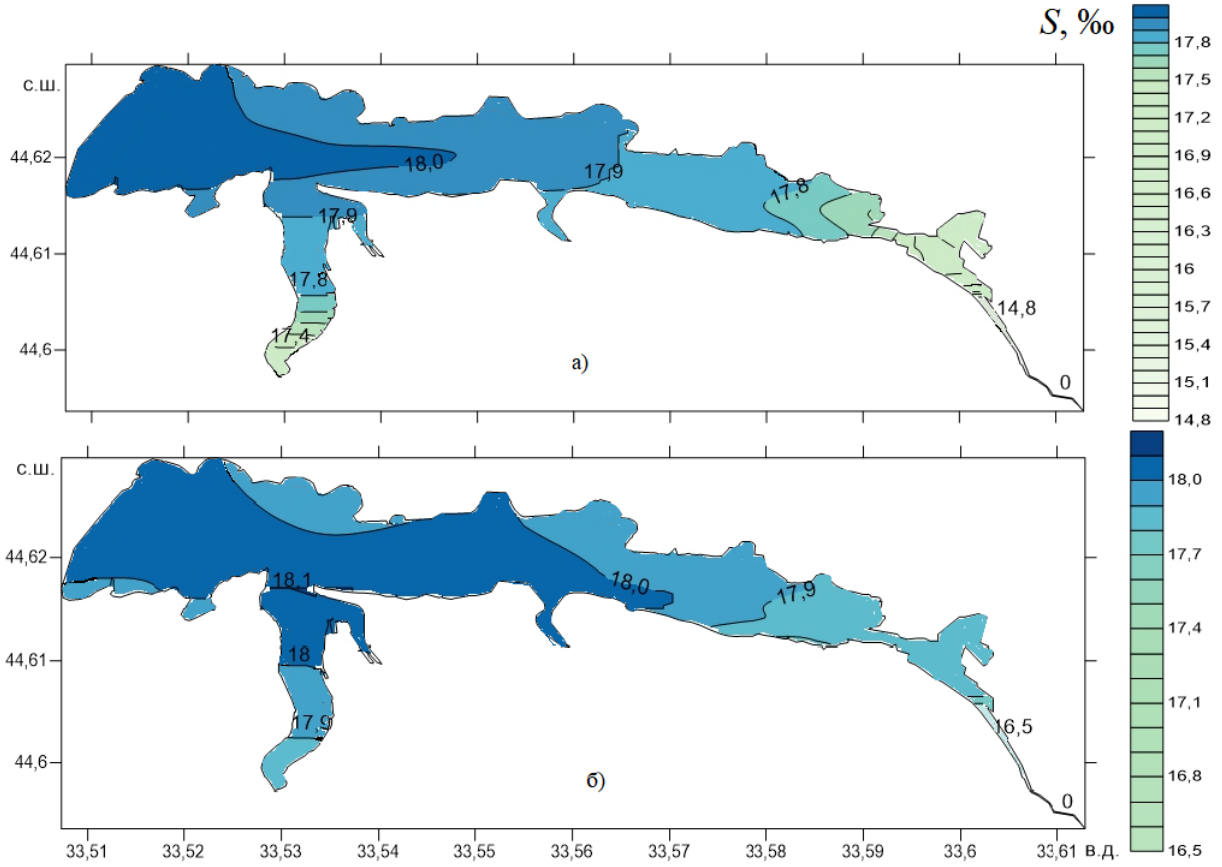

Рисунок 10. Среднее многолетнее (за период с 1991 по 2020 год) распределение солёности воды в поверхностном (а) и придонном (б) слоях устьевого взморья реки Чёрной.

Figure 10. Average long-term (for the period from 1991 to 2020) distribution of water salinity in the surface (a) and near-bottom (b) layers of the estuarine zone of the Chernaya River.

Аналогичное пространственное распределение солёности воды фиксировалось в рассматриваемый период в большинстве съёмок (~70%), которые редко выполнялись при экстремальных ситуациях. Как видно из рисунка 10, при средних гидрометеорологических условиях, которые преобладают бóльшую часть года и нарушаются сильными сгонными или нагонными явлениями, а также стоком реки редкой повторяемости, распреснение происходит не только в восточной части устьевого взморья реки Чёрной, но и в кутовой части Южной бухты есть постоянный источник пресной воды. Эта бухта имеет внушительный водосбор – в неё впадает одна из самых протяжённых балок региона, Сарандинакина, с притоками (Делагардова и Хомутова балки), имеющая подрусловой сток, который разгружается в Южную бухту. Кроме того, в эту часть Севастопольской бухты поступают сточные и ливневые воды, способствующие уменьшению солёности воды.

Опресняющее влияние речного стока распространяется вдоль оси Севастопольской бухты, в среднем на расстояние 4–5 км от нижней границы устьевого участка реки. Уменьшение солёности воды вдоль берегов обусловлено влиянием склонового стока, ливневых и сточных вод. Средние многолетние горизонтальные градиенты солёности воды поверхностного слоя устьевого взморья реки Чёрной составляли 0,4‰/км, придонного – 0,2‰/км. Поступающая из прилегающей части моря осолонённая вода (рисунок 10) препятствует водообмену между Южной и Севастопольской бухтами, что способствует формированию особого гидрологического и гидрохимического режимов Южной бухты, ухудшая её экологическое состояние.

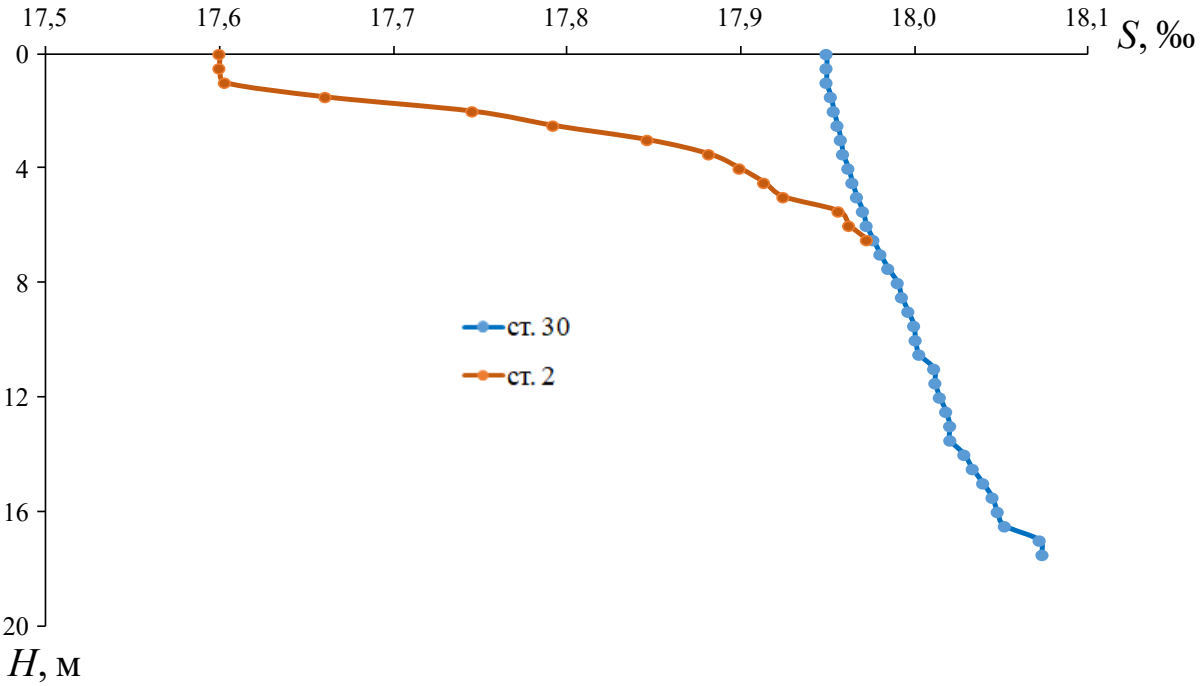

Рисунок 11. Среднее многолетнее (за период с 1991 по 2020 год) вертикальное распределение солёности воды в восточной (станция 2) и западной (станция 30) частях устьевого взморья реки Чёрной.

Figure 11. Long-term average (for the period from 1991 to 2020) vertical distribution of water salinity in the eastern (station 2) and western (station 30) parts of the estuarine zone of the Chernaya River.

Вертикальный градиент солёности воды в западной части устьевого взморья реки Чёрной в среднем составляет 0,02‰/м, а в восточной – 0,04–0,06‰/м. Экстремальные значения градиентов солёности воды могут быть на 1–2 порядка больше (рисунок 9). Вертикальное распределение солёности воды на границах Севастопольской бухты представлено на рисунке 11. Очевидно, что близость акватории к устьевому участку реки (рисунок 2, станция 2) обусловливает бóльшую стратифицированность водной массы и бóльшие вертикальные градиенты солёности воды, чем в западной части бухты (рисунок 2, станция 30).

Именно в восточной части устьевого взморья, прилегающей к устьевому участку реки, и в узости так называемого Инкерманского лимана, в условиях слабоветрия и штиля, формируется гидрологическая фронтальная зона, в которой отмечаются наибольшие вертикальные и горизонтальные градиенты солёности, иногда достигавшие 1–5‰/м и 10–16‰/км соответственно. Характерно, что и в кутовой части Южной бухты (рисунок 2) происходит фронтогенез, но влияние пресной воды на солёность этой бухты и контрастность распределения солёности здесь существенно меньше: максимальный вертикальный градиент достигал 1‰/м, а горизонтальный – 0,5‰/км.

Поскольку в пределах солёности воды 5–8‰ происходит изменение химического состава пресной воды на морскую и в этом же в узком диапазоне солёности проходит фаунистическая граница между пресноводными и солоноводными гидробионтами [Хлебович, 2015], кутовые части Севастопольской и Южной бухт, Инкерманский лиман (рисунок 2) можно считать областями повышенной экологической опасности, требующими особого внимания и контроля их состояния.

Заключение

Потепление климата, в комплексе с региональными и локальными факторами, в период с 1991 по 2020 год обусловило значимые тенденции осолонения устьевого взморья реки

Чёрной, которые в среднем составили 0,02‰/год, а в последнее десятилетие достигли 0,06‰/год. По-видимому, основной причиной этого является увеличение испарения в результате роста температуры воды и воздуха в среднем на 0,06–0,07°С/год. При этом, значимых тенденций стока реки Чёрной, суммы осадков и уровня воды Севастопольской бухты не обнаружено, а скорость ветра, начиная с 2011 года, резко уменьшилась на 0,6 м/с из-за переноса ветромера.

Продолжающийся рост населения и водопотребления в Севастопольском регионе, а также активизация переноса воздушной массы с запада на восток, могут привести к уменьшению стока реки Чёрной, так как осадки могут выпадать восточнее бассейна реки, являющейся основным источником водоснабжения города Севастополя и, в то же время, фактором опреснения устьевого взморья.

При сохранении тенденций потепления климата и увеличения испарения, в условиях стабилизации уровня воды Севастопольской бухты или его эвстатического повышения, продолжится осолонение устья реки Чёрной и прибрежной части моря. Но, учитывая цикличность гидрометеорологических процессов, обусловленную гелиофизическими связями, можно предположить, что современный климатический период, характеризующийся осолонением прибрежной зоны, сменится в будущем периодом её опреснения, как это отмечалось в прошлом.

Развитие хозяйственного комплекса, увеличение водопотребления и сбросов сточных вод на фоне развивающегося осолонения, потепления климата и ограниченной проточности Севастопольской бухты активизируют проникновение солёной воды в Инкерманский лиман и на устьевой участок реки, что усилит стратификацию водной массы, затруднит вертикальный водообмен, вызовет появление гипоксии и сероводорода. Эти процессы могут привести к изменению биоценозов, увеличат риски возникновения негативных биохимических явлений, приводящих к эвтрофикации водной среды, что потребует трудоёмких и затратных мероприятий для предотвращения деградации экосистемы устья реки Чёрной.

Так как солёность является индикатором взаимодействия пресной и солёной воды в устье реки, результаты работы могут использоваться для расчётов баланса биогенных и загрязняющих веществ, поступающих в море, ассимиляционной ёмкости прибрежной акватории, зоны влияния пресной воды на солёность бухты и моря, применяться в качестве граничных и начальных условий при моделировании функционирования экосистемы акватории города Севастополя.

Полученные результаты планируется дополнить расчётом и анализом изменчивости испарения.

Приведённые оценки пространственной и временной изменчивости солёности воды применимы для решения практических задач по нормированию антропогенной нагрузки на устьевую область реки Чёрной, прогноза будущего состояния этого географического объекта в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки, а также разработки мероприятий по охране и восстановлению природной среды Севастопольского региона.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Чёрного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

Литература

Аблязов Э.Р. Влияние межгодовой изменчивости солёности и температуры воды на структуру ихтиоцена эстуарной зоны реки Чёрная //

References

Ablyazov E.R. Vliyanie mezhgodovoi izmenchivosti solenosti i temperatury vody na strukturu ikhtiotsena estuarnoi zony reki Chernaya [Influence of interannual variability of water salinity

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 90–94.

Баянкина Т.М., Сизов А.А., Жуков А.Н., Комаровская О.И., Пряхин С.Ф. Междесятилетняя изменчивость ветрового режима в регионе Чёрного моря // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 4 (184). С. 29–36.

Белокопытов В.Н. Климатическая изменчивость плотностной структуры Чёрного моря // Український гідрометеорологічний журнал. 2014. № 14. С. 227–235.

Боков В.А., Ловелиус Н.В., Ретеюм А.Ю. О периодичности природных аномалий Крыма // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 4 (49). С. 133–138.

Вержевская Л.В., Миньковская Р.Я. Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 92–106. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-92-106.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР в 10 т. Том 4: Чёрное море в 2 вып. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 429 с.

Гидрометеорологические условия морей Украины в 2 т. Том 2: Чёрное море. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. 421 с.

Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Изменения климата и динамика берегов Украины // Доповіді національної академії наук України. 2008. № 10. С. 118–122.

Данилов-Данильян В.И. Глобальные климатические изменения и водные проблемы России и мира // Век глобализации. 2020. № 4 (36). С. 65–78. DOI: 10.30884/vglob/2020.04.05.

Каюкова Е.П. Изучение и оценка подземного стока малых рек на примере бассейна р. Бодрак (юго-западный Крым) // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2015. Вып. 2. С. 130–151.

and temperature on the ichthyocene structure of the Chernaya River estuarine]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon morya [Ecological safety of coastal and shelf zones of sea]*, 2016, no. 3, pp. 90–94. (In Russian; abstract in English).

Bayankina T.M., Sizov A.A., Zhukov A.N., Komarovskaya O.I., Pryakhina S.F. Inter-decadal variability of the wind mode in the Black Sea region. *Physical Oceanography*, 2015, no. 4, pp. 26–33. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-4-26-33.
(Russ. ed.: Bayankina T.M., Sizov A.A., Zhukov A.N., Komarovskaya O.I., Pryakhin S.F. Mezhdesyatiletnyaya izmenchivost' vetrovogo rezhima v regione Chernogo morya. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2015, no. 4 (184), pp. 29–36).

Belokopytov V.N. Klimaticheskaya izmenchivost' plotnostnoi struktury Chernogo moray [Climatic variability of the Black Sea density structure]. *Ukraïns'kii gidrometeorologichnii zhurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 2014, no. 14, pp. 227–235. (In Russian; abstract in English).

Bokov V.A., Lovelius N.V., Retejum A.Ju. O periodichnosti prirodnykh anomalii Kryma [About periodic natural anomalies in Crimea]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie [Society. Environment. Development]*, 2018, no. 4 (49), pp. 133–138. (In Russian; abstract in English).

Danilov-Danil'yan V.I. Global'nye klimaticheskie izmeneniya i vodnye problemy Rossii i mira [Global Climate Changes and Water Problems in Russia and in the World]. *Vek globalizatsii [Age of Globalization]*, 2020, no. 4(36), pp. 65–78. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.30884/vglob/2020.04.05.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR v 10 tomakh. Tom 4: Chernoe more v 2 vypuskakh. Vypusk 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR in 10 volumes. Volume 4: The Black Sea in 2 issues. Issue 1. Hydrometeorological conditions]. St. Petersburg, Publ. Gidrometeoizdat, 1991. 429 p. (In Russian).

Лавров С.А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России. 2019. № 1. С. 4–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.

Миньковская Р.Я. Геофизическая характеристика устьевой области реки Чёрной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2008. № 17. С. 194–214.

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.

Наривончик С.В., Лукашова О.А., Миньковская Р.Я., Дьяков Н.Н., Мальченко Ю.А. Изменчивость солёности воды устьевых взморьев малых рек Юго-Западного Крыма в современный период // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: вызовы отечественной науки» (г. Севастополь, 26–30 сентября 2022 г.). Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. С. 332–333.

Орлов А.И. Многообразие критериев проверки однородности двух независимых выборок // Межвузовский сборник научных трудов «Статистические методы оценивания и проверки гипотез». Вып. 29. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. С. 64–83.

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.

Подымов О.И., Зацепин А.Г., Очередник В.В. Рост солёности и температуры в деятельном слое северо-восточной части Чёрного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический

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', Publ. EKOSI-Gidrofizika, 2012. 421 p. (In Russian).

Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A. Izmeneniya klimata i dinamika beregov Ukrainy [Climate change and dynamics of the coasts of Ukraine]. *Dopovidi natsional'noï akademiï nauk Ukraïni [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 2008, no. 10, pp. 118–122. (In Russian).

Guide to Climatological Practices (WMO-100). Geneva, World Meteorological Organization, 2011. 117 p. (Russ. ed.: *Rukovodstvo po klimatologicheskoi praktike*. Zheneva, Vsemirnaya Meteorologicheskaya Organizatsiya, WMO-№100, 2014. 156 p.)

Kayukova E.P. Izuchenie i otsenka podzemnogo stoka malykh rek na primere basseina reki Bodrak (yugo-zapadnyi Krym) [Study and estimation of groundwater flow of small rivers on the case study of the basin of the River Bodrak (south-western Crimea)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya [Bulletin of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography]*, 2015, iss. 2, pp. 130–151. (In Russian; abstract in English).

Khlebovich V.V. Applied aspects of the concept of critical salinity. *Biology bulletin reviews*, 2015, vol. 5, iss. 6, pp. 562–567. DOI: 10.1134/s2079086415060031. (Russ. ed.: Khlebovich V.V. Prikladnye aspekty kontseptsii kriticheskoi solenosti. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2015, vol. 135, iss. 3, pp. 272–278).

Kubryakov A.A., Mikaelyan A.S., Stanichny S.V. Extremely strong coccolithophore blooms in the Black Sea: The decisive role of winter vertical entrainment of deep water. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 173. 103554. DOI: 10.1016/j.dsr.2021.103554.

Lavrov S.A. Zakonomernosti formirovaniya ispareniya s poverkhnosti sushi i vody pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenii

журнал. 2021. Т. 37. № 3 (219). С. 279–287. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287.

Рождественский А.В., Чеботарёв А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 424 с.

Руководство по климатологической практике. Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, ВМО-№100, 2014. 156 с.

Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Издательство Томского университета, 2002. 128 с.

Хлебович В.В. Прикладные аспекты концепции критической солёности // Успехи современной биологии. 2015. Т. 135. № 3. С. 272–278.

Kubryakov A.A., Mikaelyan A.S., Stanichny S.V. Extremely strong coccolithophore blooms in the Black Sea: The decisive role of winter vertical entrainment of deep water // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021. Vol. 173. 103554. DOI: 10.1016/j.dsr.2021.103554.

[Regularities of formation of evaporation from land surface and water under the climatic changes' influence]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii [Water sector of Russia]*, 2019, no. 1, pp. 4–23. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.

Min'kovskaya R.Ya. Geofizicheskaya kharakteristika ust'evoi oblasti reki Chernoi (Sevastopol'skii region) [Geophysical characteristics of the mouth area of the Chernaya River (Sevastopol region)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*, 2008, no. 17, pp. 194–214. (In Russian; abstract in English).

Min'kovskaya R.Ya. *Kompleksnye issledovaniya raznotipnykh morskikh ust'ev rek (na primere morskikh ust'ev rek severo-zapadnoi 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. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9.

Narivonchik S.V., Lukashova O.A., Minkovskaya R.Ya., Diakov N.N., Malchenko Yu.A. Izmenchivost' solenosti vody ust'evykh vzmor'ev malykh rek Yugo-Zapadnogo Kryma v sovremennyi period [Water salinity variability of estuarine coastal area of small rivers in south-western Crimea in the current period]. In: *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Morya Rossii: vyzovy otechestvennoi nauki» (Sevastopol', 26–30 sentyabrya 2022) [Proceedings of All-Russian scientific conference "The seas of Russia: Challenges of the national science" (Sevastopol, 26–30 September 2022)]*. Sevastopol', Publ. of Marine Hydrophysical Institute, 2022, pp. 332–333. (In Russian).

Orlov A.I. Mnogoobrazie kriteriev proverki odnorodnosti dvukh nezavisimykh vyborok [The manifold of methods for testing the homogeneity of two independent samples]. *Mezhvuzovskii sbornik*

nauchnykh trudov «Statisticheskie metody otsenivaniya i proverki gipotez». Vypusk 29 [Interuniversity collection of scientific papers «Statistical methods of estimation and testing of hypotheses». Issue 29]. Perm', Publ. of Perm State University, 2019, pp. 64–83. (In Russian; abstract in English).

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.).

Podymov O.I., Zatsepin A.G., Ocherednik V.V. Increase of temperature and salinity in the active layer of the north-eastern black sea from 2010 to 2020. *Physical Oceanography*, 2021, vol. 28, iss. 3, pp. 257–265. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-257-265. (Russ. ed.: Podymov O.I., Zatsepin A.G., Ocherednik V.V. Rost solenosti i temperatury v deyatel'nom sloe severo-vostochnoi chasti Chernogo morya s 2010 po 2020 god. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2021, vol. 37, iss. 3 (219), pp. 279–287. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287).

Rozhdestvenskii A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii [Statistical methods in hydrology]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1974. 424 p. (In Russian).

Skvortsov A.V. *Triangulyatsiya Delone i ee primenenie [Delaunay triangulation and its application]*. Tomsk: Publ. of Tomsk university, 2002. 128 p. (In Russian).

Verzhevskaya L.V., Minkovskaya R.Ya. Struktura i dinamika antropogennoi nagruzki na pribrezhnuyu zonu Sevastopol'skogo regiona [Structure and Dynamics of Anthropogenic Load on the Coastal Zone of the Sevastopol Region]. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoy i Shel'fovoy Zon Morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 2020, no. 2, pp. 92–106. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-92-106.