

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ВОД ПРИУСТЬЕВОЙ АКВАТОРИИ У Р. ДУНАЙ И ЕГО СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

А.Б. Полонский, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru, lenagrebneva12@gmail.com

На основе массива архивных данных Института природно-технических систем за период с 1960 по 2000 гг. описаны крупномасштабные структуры поля рН и сезонный ход в акватории приустьевого взморья р. Дунай. Показано, что пространственные неоднородности величины рН на акватории исследования определяются биологическими процессами в зоне смешения речных и морских вод, а в непосредственной близости к дельте р. Дунай характеристиками речных вод. Сезонная динамика величины рН в значительной степени определяется сезонным циклом в развитии биопродукционных процессов, зависящих от температурных условий и вертикальной стратификации, на которые существенным образом влияет объем стока речных вод. Корреляционная функция, характеризующая влияние расходов р. Дунай на величину рН, достигает максимума при временном сдвиге (запаздывании рН) на два месяца.

Ключевые слова: рН, Черное море, приустьевая акватория реки Дунай, сезонных ход, поле рН.

Поступила в редакцию: 13.03.2020. После доработки: 20.03.2020.

Введение. Северо-западная часть Черного моря (СЗЧМ) – гипертрофная акватория, в которую впадают четыре крупные реки – Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг. Дунай – наиболее полноводная река Черноморского бассейна, на него приходится около 80% речного стока в СЗЧМ и около 36% естественного притока пресных вод Черного моря [1]. Дунай (в отличие от трех других крупных рек, указанных выше) впадает непосредственно в море, а не в лиманы, которые значительно сокращают поступление биогенных веществ с речными водами на шельф [2, 3]. Основное влияние на колебания стока р. Дунай оказывают изменения климатических условий над площадью его водосбора. Годовой сток в полноводные годы достигает 313 км³, а в засушливые – может снижаться до 123 км³ [4]. Это приводит к значительным межгодовым вариациям гидролого-гидрохимических характеристик вод в приустьевой зоне моря. В тоже время на качественные характеристики этих вод

(особенно за последние тридцать лет) оказывают принципиальное влияние развитие промышленности крупных городов, расположенных в бассейне реки, а также сельскохозяйственная деятельность. Это проявляется в эвтрофикации вод СЗЧМ [4, 5] и приводит к существенным изменениям гидрохимических и фитопланктонных характеристик. Например, с 60-х до середины 80-х гг. на придунайском шельфе с глубинами < 50 м концентрация нитратов и фосфатов в поверхностном слое увеличилась в 3–5 раз [6]. Необходимо подчеркнуть, что этот район подвержен влиянию не только стока Дуная, собирающего отходы промышленности и жизнедеятельности десяти государств Европы, но также стоков Днепра, Южного Буга и Днестра. Вместе с тем, взморье Дуная представляет собой зону постоянного взаимодействия речных и морских вод, в результате которого изменяются их свойства, образуются водные массы с новым качеством.

Формирование гидрохимических условий взморья происходит под воздействием сложных гидрофизических и гидродинамических процессов, характерных для этого района. Поэтому приустьевое взморье Дуная представляет собой одно из самых сложных для исследования гидролого-гидрохимического режима районов Черного моря.

Поступление значительного количества биогенных элементов с пресноводным стоком обеспечивает обильную кормовую базу для фитопланктона в течение всего года. В период максимального развития эвтрофирования, концентрация биогенных элементов возрастает в десятки раз. В результате, в шельфовой зоне регулярно отмечается неконтролируемые локальные повышения биопродуктивности, так называемое «цветение», последствием чего является возникновение гипоксии в теплый период года, снижение биоразнообразия и рыбных запасов [3, 7, 8]. Именно по этой причине значительное внимание исследователей биогеохимического режима Черного моря было сосредоточено на акватории приустьевых областей СЗЧМ [9–11]. Описанная особенность приустьевого района СЗЧМ выражается и в значительном возрастании размаха колебаний величины рН (одного из важнейших гидрохимических показателей вод) по

сравнению с открытой частью Черного моря.

В настоящей работе представлено климатическое поле величины рН в приустьевой акватории моря у р. Дунай, как важного гидрохимического показателя происходящих в морской среде биогеохимических процессов и индикатора состояния морской среды. Проанализированы его сезонные колебания, связанные, главным образом, влиянием сезонных объемов стока р. Дунай на изменчивость величины рН.

Использованные данные и методика их обработки. Для анализа использовались данные банка Института природно-технических систем (ИПТС), который содержит 169646 измерений величины рН на 29086 станциях [12]. Для расчета климатического поля рН и сезонного хода водородного показателя из всего массива выбирались данные по величине рН на поверхности моря, приуроченные к приустьевой зоне р. Дунай, за период с 1960 по 2000 гг. Исходные данные за весь исследуемый период, прошедшие предварительный контроль качества, группировались по месяцам (табл. 1). Район исследования – акватория, располагающаяся у дельты р. Дунай до зоны превалирования морских вод. В качестве основного района исследования выбрана прямоугольная область, ограниченная координатами 44,9°–45,80° с.ш. и 29,7°–30,8° в.д.

Таблица 1. Ежемесячное количество измерений величины рН на акватории приустьевого взморья р. Дунай за период с 1960 по 2000 гг.

Гг/ Мес.	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1960– 2000	36	103	291	390	566	517	624	688	629	545	282	72

Пространственно-временное распределение станций неравномерно (табл. 1, рис. 1). Наиболее обеспечены измерениями теплый период года (июль, август и сентябрь). Для восстановления недостающих значений в узлах регулярной сетки использовался один из методов опти-

мальной интерполяции [13]. Проинтерполированные в узлы регулярной сетки среднемесячные поля использовались для построения климатического поля рН путем расчета среднего значения в каждом узле регулярной сетке из 12 среднемесячных полей.

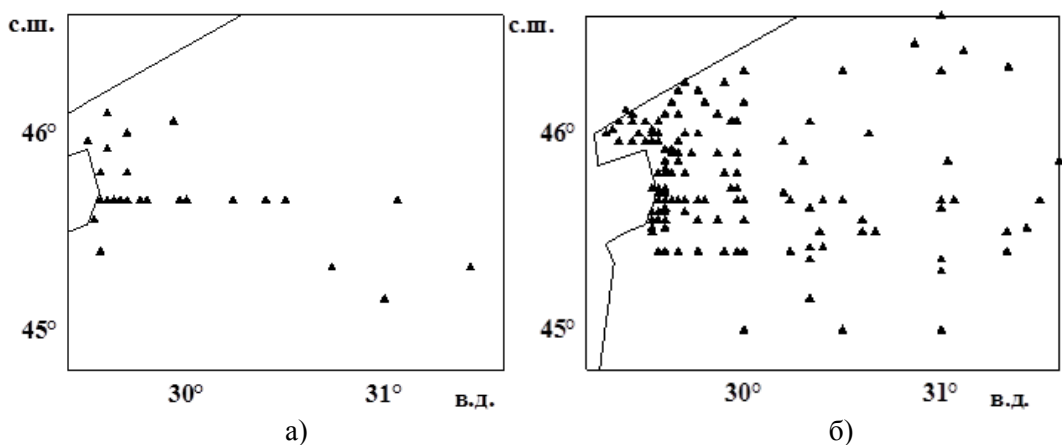


Рис. 1. Пространственное распределение станций, на которых измерялась величина рН на поверхности моря в 1960–2000 гг.; а) январь, б) август

Fig. 1. Spatial distribution of stations where where the pH value was measured on the surface of the sea in 1960–2000; a) January, b) August

Сезонный ход величины рН рассчитан по данным, осредненным по всей анализируемой акватории, за исключением района, прилегающего к устью р. Дунай. В качестве геохимической границы речного экотона при типичных величинах стока р. Дунай обычно принимается изогалина 6‰ [14]. На основании анализа климатического поля солёности были выбраны следующие границы приустьевой зоны: 45,2°–45,55° с.ш. и 29,7°–29,85° в.д.

Средняя по акватории величина рН рассчитывалась по ежемесячным данным, усредненным за весь исследуемый период. При усреднении учитывался

следующий, хорошо известный факт. Данные измерений величины рН не подчиняются нормальному закону распределения (что вполне естественно, учитывая логарифмический характер самой величины рН, и что подтверждается формальным критерием Колмогорова-Смирнова, см. работу [15]). Выборочная гистограмма поэтому характеризуется явно выраженной асимметрией (рис. 2). В таком случае в качестве климатической характеристики величины рН могут использоваться ее медианные значения. Медиана соответствует квантилю распределения $\tau = 0,5$.

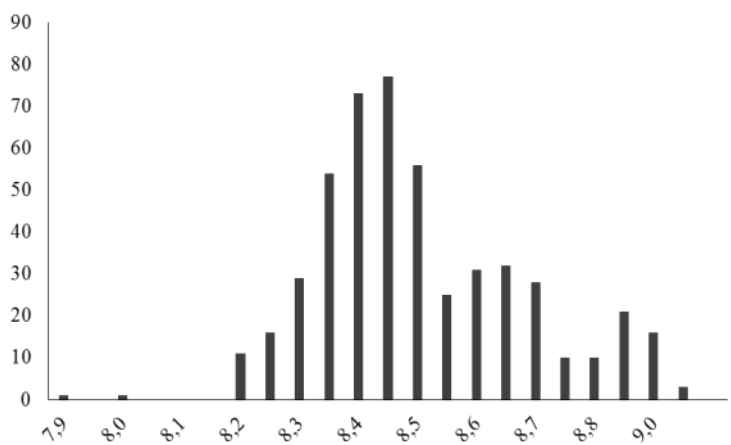


Рис. 2. Гистограмма распределения величины рН на акватории приустьевого взморья р. Дунай за среднеклиматический июнь

Fig. 2. A histogram of the distribution of pH in the estuary seaside river Danube climate June

Сезонный ход стока р. Дунай рассчитан по усредненным по месяцам данным за период с 1947 по 2000 гг. с использованием метода гармонического анализа. Считалось, что усредненный сезонный ход описывается суммой годовой и полугодовой гармоник.

Анализ полученных результатов.
Климатическое поле величины рН. В поверхностных водах исследуемого района диапазон климатических значений среднегодовых величин рН изменяется в пределах 8,42–8,47 при среднем по полю 8,46 ед. рН (рис. 3). Максимальные величины (8,45–8,47 ед. рН) сосредоточены в районе трансформации и перемешивания речных и морских вод. Вблизи дельты р. Дунай (в области преваляирования речных вод) наблюдались более низкие величины 8,42–8,44 ед. рН, потому что диапазон среднеклиматических

величин рН речной воды (в р. Дунае) обычно существенно ниже, чем в морских черноморских водах. По литературным данным он составляет 7,50–8,30 ед. рН [16]. Описанные пространственные неоднородности в поле рН, а именно локальный максимум рН, формирующийся к востоку и юго-востоку от дельты реки, обусловлен поступлением распресненной речной воды, богатой биогенными элементами, способствующей возникновению резкой стратификации и интенсивного цветения в верхнем слое моря. Продолжительность цветения может составлять от одного до трех месяцев. Жизнедеятельность фито-, а также зоопланктона в анализируемой акватории (особенно в определенные фазы сезонного цикла) существенно увеличивают величину рН (до 9,00 ед. рН) [3, 17, 18].

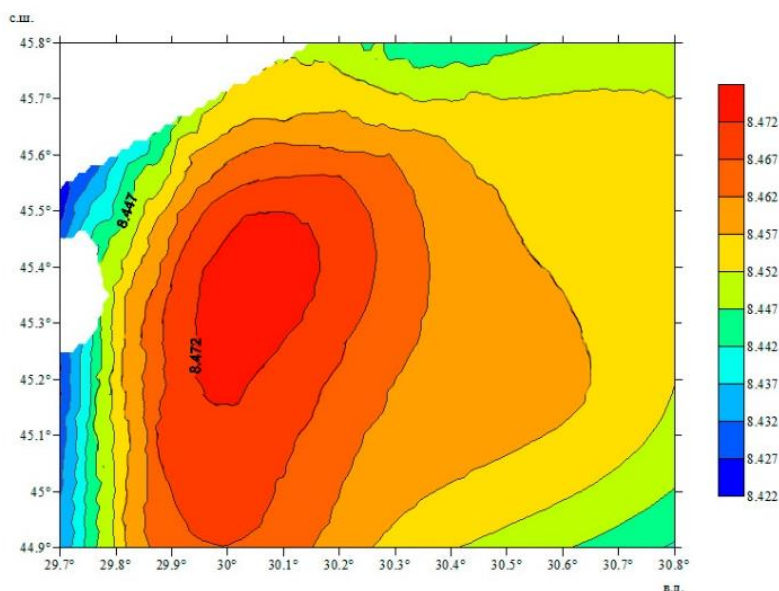


Рис. 3. Усредненное климатическое поле рН на поверхности приустьевоего взморья р. Дунай

Fig. 3. The average climatic pH field on the surface of the estuary near the river Danube

Сезонный ход величина рН. Осредненный сезонный хода величины рН в анализируемой части моря хорошо описывается годовой гармоникой. Ее вклад в суммарную дисперсию среднемесячных величин рН составляет более 83%. Размах осредненной сезонной изменчивости величины рН в поверхностном слое достигает 0,22 ед. Сезонная динамика величин рН соответствует развитию продукционных процессов. От

зимы к лету отмечается ее увеличение, а затем уменьшение к осени (рис. 4). В весенние месяцы происходит быстрый прогрев поверхностных вод, а также поступление большого количества биогенных элементов с речным стоком в период весеннего половодья. Эти процессы стимулируют развитие мелкоклеточных организмов, что подтверждается максимумом содержания пигмента хлорофилла – а (первичный фотосинтезирующий

пигмент фитопланктона), в районе исследования, в этот период года и вызывает соответствующий рост величины рН. Максимальные значения рН весной достигают 8,45–8,50, а летом – 8,57 ед. рН, что являются следствием «цветения» [19]. Развитие продукционных процессов на взморье в этот период года вызвано резкой термохалинной стратифи-

кацией, препятствующей вертикальному перемешиванию. В эти месяцы начинается резкое ухудшение кислородных условий, которое, как правило, сопровождается обильным «цветением» воды и приводит к росту в поверхностном слое моря (от 0 до 5 м) величины рН [20].

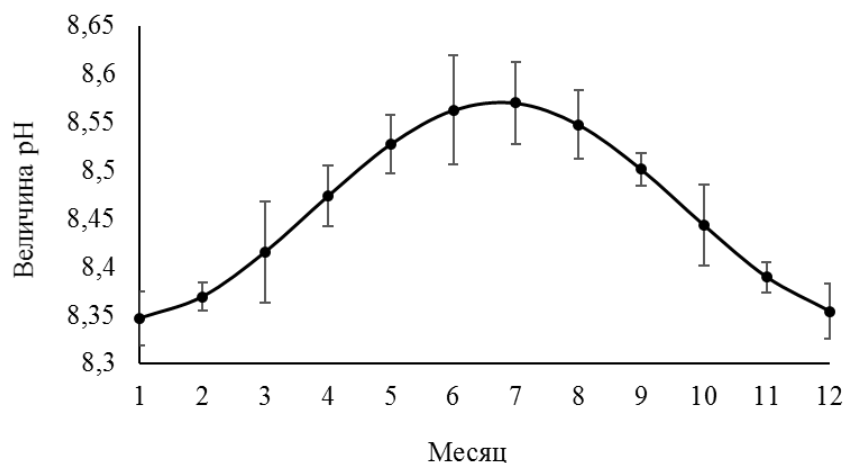


Рис. 4. Осредненный сезонный ход величины рН, аппроксимированный гармоникой с периодом 12 месяцев. Ежемесячные величины стандартного отклонения рН на приустьевой акватории р. Дунай обозначены вертикальными отрезками

Fig. 4. Averaged seasonal variation in pH approximated by harmonics with a period of 12 months. Monthly values of standard deviation of pH in the estuarine area of the river Danube marked with vertical lines

Следует добавить, что отмечается высокая положительная корреляционная связь величины рН и температуры воды и отрицательная – с концентрацией кислорода. Летний максимум величины рН частично можно объяснить не только биологическими процессами, но и особенностями газообмена между атмосферой и поверхностными слоями морской воды. С повышением температуры воды происходит уменьшение растворимости и, соответственно, равновесных концентраций углекислого газа в поверхностных слоях морской воды, что, естественно, приводит к повышению рН [21]. В осенний период происходит снижение потока солнечной радиации и снижение температуры поверхностных вод, что приводит к уменьшению численности фитопланктона и сокращению его видового богатства. Тем не менее, в глубоководном районе в осенне-зимние месяцы наблюдается пик рН, которой характери-

зует осенне-зимнее «цветение» воды [22].

Гармонический анализ сезонного хода стока р. Дунай показал, что годовая гармоника описывает 91% общей дисперсии сезонной изменчивости стока (рис. 5, а). Максимальные величины стока р. Дунай за период с 1941 по 2000 гг. отмечаются с марта по июнь и достигают 8590 м³/мес, а минимальные – до 4446 м³/мес – в августе – ноябре, при средней величине – 6541 м³/мес., что близко к опубликованным данным [1].

Усредненные по месяцам значения водородного показателя в поверхностном слое изучаемого района положительно коррелирует с сезонной изменчивостью речного стока. Соответствующий коэффициент корреляции достигает максимума (около 0,95) при временном запаздывании первого ряда относительно второго на два месяца. К аналогичным результатам пришли авторы работы [23],

у которых запаздывание максимумов хлорофилла - а и объема речного стока было определено в диапазоне от 2,5 до 1,5 мес. В работах [19, 24] среднемного-летний максимум хлорофилла - а в придунайском районе был также отмечен с типичным запаздыванием в 2 месяца (в июне).

Таким образом, подтверждено на количественном уровне тесная связь вели-

чины рН с речным стоком. Вместе с тем, на формирование гидролого-гидрохимических условий взморья р. Дунай оказывают влияние не только объем, динамика и условие распространение в море речного стока, но и региональные метеоусловия, а также жизнедеятельность водных организмов, что подтверждается опубликованными данными [25].

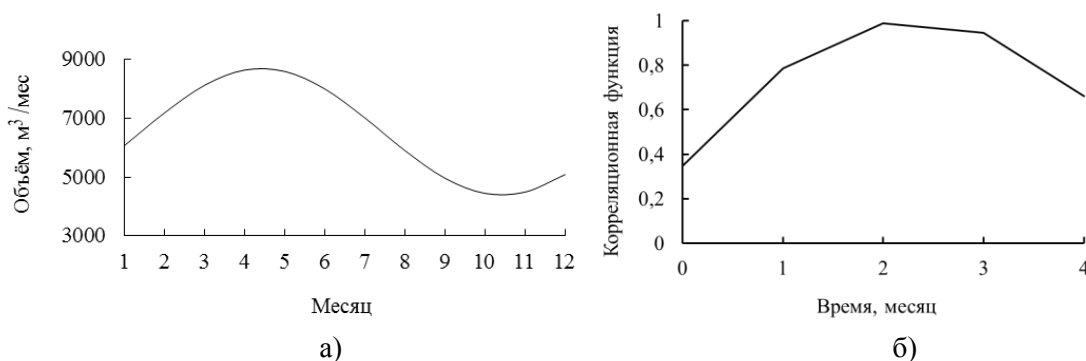


Рис. 5. Осредненный сезонный ход стока р. Дунай, аппроксимированный гармоникой с периодами 12 месяцев – а) и взаимная корреляционная функция сезонного хода речного стока и величины рН – б). Максимум корреляционной функции достигается при запаздывании величины рН на 2 месяца

Fig. 5. The averaged seasonal runoff of the river Danube, approximated by harmonics with periods of 12 months – а) and the mutual correlation function of the seasonal course of the river flow and pH – б).

The maximum correlation function is achieved when the pH value is delayed by 2 months

Заклучение. На основе проведенного анализа данных за 40-летний период (1960–2000 гг.) можно сделать вывод, что пространственные неоднородности величины рН на акватории приустьевоего взморья р. Дунай определяются биологическими процессами в зоне смешения речных и морских вод, а в непосредственной близости к дельте р. Дунай – характеристиками речных вод. Сезонная динамика величины рН в значительной степени определяется сезонным циклом в развитии биопродукционных процессов, зависящих от температурных условий и вертикальной стратификации, на которые существенным образом влияет объем стока речных вод. Увеличение расхода р. Дунай в весенний период приводит к формированию резкой плотностной стратификации в верхнем слое вод, прогреву тонкого перемешанного слоя в летний период, что сопровожда-

ется интенсификацией биологических процессов и увеличением величины водородного показателя. Корреляционная функция, характеризующая влияние расходов р. Дунай на величину рН, достигает максимума при временном сдвиге (запаздывании рН) на два месяца.

Работа частично выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-45-920014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *State of the Environment of the Black Sea (2001 – 2006/7)* [Text] // Edited by Temel Oguz. Publications of the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution 2008-3 (BSC). Istanbul: 2008. 448 p.
2. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология* / под ред.

- Ю.П. Зайцева, Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. Киев: Наукова думка, 2006. 701 с.
3. *Екосистема узмор'я Української дельти Дунаю* / Відп. ред. Л.В. Воробйова. Одеса: Астропринт, 1998. 332 с.
 4. *Зайцев Ю.П., Гаркавая Г.П., Нестерова Д.А., Полищук Л.Н.* Дунай – основной источник эвтрофирования Черного моря // *Гидробиол. журн.* 1989. Т. 25, вин. 4. С. 21–23.
 5. *Зайцев Ю.П., Гаркавая Г.П., Нестерова Д.А., Полищук Л.Н., Цокур А.Г.* Современное состояние экосистемы Черного моря // *Современное состояние Черного моря*. М.: Наука. 1987. С. 216–230.
 6. *Yunev O.A., Carstensen J., Moncheva S.* [et al.]. Nutrient and phytoplankton trends on the western Black Sea shelf in response to cultural eutrophication and climate changes // *Estuar. Coas. Shelf Sci.* 2007. 74. P. 63–76.
 7. *Кондратьев С.И.* Особенности пространственного распределения кислорода в водах приустьевого взморья Дуная в 1997 – 2010 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 60–76.
 8. *Осадчая Н.Н., Клебанов Д.А.* Оценка выноса биогенных элементов с водосборной площади Дуная в современный период (1989–2012 гг.) основные факторы его формирования и пути регулирования // *Наукові праці УкрДГНМІ*. 2016. Вип. 268. С. 58–66.
 9. *Mikhailov V.N., Mikhailova M.V.* River Mouths // *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. 2008. Vol. 5. Part Q. P. 91–133.
 10. *Михайлов В.Н., Морозов В.Н., Михайлова М.В., Гранич П.С.* Гидрологические процессы в устьевой области Дуная и их возможные изменения // *Водные ресурсы*. 1988. № 1. С. 24–32.
 11. *Чистяков А.А. Макарова Н.В., Макаров В.И.* Четвертичная геология: учебник. М.: ГЕОС. 2000. 303 с.
 12. *Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А.* [и др.]. GIS Института природно-технических систем // *Системы контроля окружающей среды*. 2016. № 4 (24). С. 49–55.
 13. *Новикова А.М., Котолупова А.А.* Об опыте использования метода кригинга в программах Surfer и QGIS для морских климатических исследований // *Системы контроля окружающей среды*. 2016. Вып. 6 (26). С. 59–67.
 14. *Берлинский Н.А., Деньга Ю.М., Попов Ю.И.* [и др.]. К вопросу о трансграничном влиянии в устьевой области Дуная // *Вестн. Одес. Ун-та*. 2010. Т. 15. Вып. 10. С. 93–103.
 15. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Климатическое распределение рН в глубоководной части черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. № 10 (30). С. 88–95.
 16. *Water Quality in the Danube River Basin 2006: TNMN Yearbook-2006*. ICPDR, 2009. 40 p.
 17. *Маккавеев П.Н., Полухин А.А., Степанова С.В.* Работы по изучению приустьевых областей малых и средних рек в прибрежной зоне российского сектора Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*, 2013. № 27. С. 412–417.
 18. *Нестерова Д.А.* Развитие перудмеу *Exuviella cordata* и явление "красного прилива" в северо-западной части Черного моря // *Биология моря*. 1979. Вып. 5. С. 24–29.
 19. *Кириленко Н.Ф., Евстигнеев В.П.* Изменчивость содержания Хлорофилла-А в северо-западной части Черного моря в современных климатических условиях // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. Вып. 10 (30). С. 80–87.
 20. *Богатова Ю.И.* Гидрохимический режим украинского участка взморья Дуная // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40. № 3. С. 295–305.
 21. *Газетов Е.И., Мединец В.И.* Исследование изменчивости основных фи-

зико-химических характеристик морских вод вблизи острова Змеиный в 2004-2013 гг. // Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки. 2016. Т. 21. Вип. 2. С. 24–45.

22. Полонский А.Б., Гребнева Е.А. Пространственно-временная изменчивость водородного показателя вод Черного моря // Доклады Академии Наук, 2019, Т. 486. № 4. С. 90–95.

23. Кириленко Н.Ф., Кушнир В.М., Лемешко Е.М. Влияние речного стока на экологические условия северо-западной области черноморского региона по дан-

ным контактными и дистанционными измерениями // Геоинформатика. 2009. № 4. С. 1–7.

24. McQuatters-Gollop A., Mee L.D., Raitso D.E., Shapiro G.I. Non-linearities, regime shifts and recovery: The recent influence of climate on Black Sea chlorophyll // J. Mar. Sys. 2008. Vol. 74. P. 649–658.

25. Косарев А.Н., Архипкин В.С., Катышева М.В. Гидрологическая структура вод северо-западной части Черного моря // Вестник Московского университета. 2001. С. 50–55.

CLIMATIC CHARACTERISTICS OF A pH IN THE WATERS NEAR DANUBE RIVER AND ITS SEASONAL VARIABILITY

A.B. Polonsky, E.A. Grebneva

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Based on an array of archival data from the Institute of Natural and Technical Systems for the period from 1960 to 2000, large-scale structures of the pH field and seasonal variation in the water area of the estuary near the river Danube are described. It is shown that the spatial heterogeneity of the pH value of the study area is due to biological processes in the mixing zone of the river and sea waters and characteristics of the river water in close proximity to the delta of the Danube. The seasonal dynamics of pH is largely determined by the seasonal cycle in the development of bio-production processes, depending on temperature conditions and vertical stratification, which are significantly affected by the volume of the river water flow. The correlation function characterizing the impact of the Danube river expenses on pH, reaches its maximum during a temporary shift (delayed pH) for two months.

Keywords: pH, Black Sea, seasonal course, pH field, the estuary of the Danube.