**КОНТРОЛЬ СИСТЕМЫ ТЕЧЕНИЙ И ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО И РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВ
В ОЗЕРЕ ДОНУЗЛАВ В МАЕ 2019 ГОДА**

П.Д. Ломакин^{2,3}, В.И. Рябушко¹, А.И. Чепыженко², С.В. Щуров¹

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского РАН», РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: skrima@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: p_lomakin@mail.ru

³Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

На основе данных экспедиционных исследований, проведенных в мае 2019 г., получены представления о системе течений и полях содержания общего взвешенного и растворенного органического веществ в водах озера Донузлав. Показано, что локальная система течений в верхнем слое вод озера была представлена двумя циклоническими вихревыми образованиями. У дна вдоль судоходного канала отмечена направленная в море струя течения. Выявлено, что добыча песка, порт и сброс сточных вод – основные источники общего взвешенного и растворенного органического вещества антропогенной природы, которые загрязняют акваторию озера Донузлав. В районе мидийно-устричной фермы наблюдалась повышенная концентрация растворенного органического вещества, как вероятное следствие жизнедеятельности сконцентрированных здесь моллюсков.

Ключевые слова: течения, общее взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, загрязнение, озеро Донузлав, Чёрное море.

Поступила в редакцию: 10.12.2020. После доработки: 16.02.2021.

Введение. Озеро Донузлав расположено в северо-западной части Крымского полуострова и вдаётся в сушу на 30 км, отделяя Тарханкутский полуостров от остального Крыма (рис. 1). Ранее этот водоем был типичным минеральным озером Тарханкутской группы с соленостью вод до 96 ‰ и относился к озерам первого класса с малой степенью метаморфизации воды. Однако в начале 60-х годов в центральной части пересыпи, которая отделяла озеро от Чёрного моря, был прорыт канал. Этот канал продолжен в море и представляет собой составную часть Донузлавского подходного судоходного канала. После соединения с морем экосистема озера претерпела значительные изменения и приобрела гидрохимические и гидробиологические черты, характерные для морских водоемов. Несмотря на то, что озеро превратилось в полузамкнутый залив, в настоящее время сохраняется его традиционное географическое название – «озеро Донузлав».

По своей форме и геоморфологии дна озеро отличается от других подобных водоемов Крымского полуострова. Оно вытянуто в северо-восточном направлении почти на 30 км при ширине от 300 до 800 м и площади водного зеркала 47,5 км². Лишь на крайнем юго-западе Донузлав резко расширяется до 10 км у пересыпи. Верхняя часть озера, которая примыкает к пресноводному участку, отгорожена дамбой. Нижняя, наиболее широкая и самая мелководная область, имеет глубину 1-3 м. На преобладающей части его акватории глубина не превышает 4-5 м. Вдоль центральной части по всей длине озера проходит котловина глубиной 12–20 м (максимальная глубина 28 м). Её юго-западный край упирается в прорытый через пересыпь входной канал, который разделяет последнюю на северную и южную косы. Вдоль осевой части котловины прорыт судоходный канал.

В Донузлаве находится одно из крупнейших в Крыму подводных место-

рождений строительного песка, которое активно разрабатывается в трех карьерах. Эти объекты, а также портовые сооружения представляют собой источники негативного воздействия на водное пространство региона и, вполне вероятно, на среду обитания мидий, культиви-

руемых на фермерском хозяйстве (рис. 1). Рассматриваемый регион достаточно хорошо изучен. Здесь в течение 50–60 последних лет ведутся комплексные гидрофизические (экспедиционные и модельные), гидрохимические, гидробиологические исследования [1–7].

1–36 – номера станций; I, II, V – участки добычи песка; III – мидийно-устричная ферма; IV – сброс хозяйственно-бытовых вод; ВК – входной канал; СК – судоходный канал.

Рис. 1. Карта-схема района исследований с расположением станций комплексной океанологической съёмки, выполненной в мае 2019 г.

1–36 - station numbers; I, II, V - areas of sand extraction; III - mussel and oyster farm; IV - discharge of domestic water; ВК - input channel; СК - shipping channel.

Fig. 1. Schematic map of the study area with the stations location of the complex oceanographic survey carried on in May 2019

В предлагаемой статье проанализирована локальная система течений и, впервые для данного региона, рассмотрены поля концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и растворенного органического вещества (РОВ) по результатам комплексной съёмки в озере Донузлав, проведенной в мае 2019 г. Эту съёмку можно рассматривать в качестве

очередного этапа экологического мониторинга вод озера Донузлав.

Материалы и методы. Анализ выполнен на основе данных экспедиции, организованной Институтом биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН. Комплексная съёмка акватории озера Донузлав реализована 26-27 мая 2019 г. и проведена в два этапа по схеме, которая изображена на рис. 1.

Часть программы экспедиционных исследований выполнена 26 мая на 7 якорных станциях, располагавшихся в юго-восточной части полигона. Из-за штормовых условий работы были прерваны и возобновлены на следующие сутки. В итоге съёмка исследуемой акватории включила 36 зондирований водной толщи. Координаты станций фиксировались при помощи навигатора GPS. Забортные работы проведены с борта маломерного судна при постановке его на якорь. Исследована акватория с глубинами в диапазоне 1,6–16,3 м.

Весь массив анализируемой информации получен при помощи оптического биофизического зондирующего комплекса «Кондор» [8]. Концентрация ОБВ и РОВ в водной толще синхронно фиксировались *in situ* в зондирующем режиме с шагом по глубине 0,1 м.

Течения регистрировались при помощи портативного самописца, которым снабжен зонд [8]. Время выдержки прибора на каждом горизонте около 2 мин. при дискретности наблюдений 0,25 с. Анализировались только осредненные для каждой экспозиции векторы течений. Наблюдения за течениями проведены в верхнем, срединном и придонном слоях воды.

Результаты и обсуждение. *Погодные условия.* Погода во время съёмки была обусловлена тыловой частью циклона с центром в районе Харькова [9]. 26 мая преобладал сильный северный северо-западный ветер скоростью 12–15 м/с, который ослаб к утру 27 мая. В течение дня 27 мая наблюдался ветер переменных направлений со скоростью 3–5 м/с.

Течения. В верхнем слое вод локальная система течений характеризовалась вихревой структурой, которая, согласно [3, 6], типична для озера Донузлав и обусловлена ветром, рельефом дна и орографией береговой линии. В юго-восточной части полигона отмечено циклоническое вихревое образование. К северу от него наблюдался вихрь того же знака и, примерно, такого же масштаба. В придонном слое в глубоководной части озера преобладало хорошо выраженное течение юго-западного направления с максимальной скоростью в русле судо-

ходного канала. На мелководных участках, у дна, течения были слабыми и разнонаправленными. Скорость течений на поверхности изменялась в интервале 6–26 см/с и 2–24 см/с – у дна (рис. 2). *Общее взвешенное вещество.* Воды озера Донузлав, как следствие штормовой погоды, были насыщены взвешенным веществом. Поле концентрации ОБВ отличалось высокой, не свойственной прибрежным черноморским водам Крыма концентрацией, 0,8–7,5 мг/л на поверхности, 1,3–9,6 мг/л – у дна. Это в разы и на порядок выше содержания данного вещества в незагрязненных водах Чёрного моря. Так, в центральной части моря и у берегов Крымского полуострова характерная концентрация ОБВ равна 0,2 и 0,8 мг/л, соответственно [10, 11] (рис. 3). Поле содержания ОБВ было слабо стратифицированным. Концентрация ОБВ возрастала по направлению к морю. В толще вод отмечены отдельные линзы с повышенным содержанием данного вещества.

В юго-восточной части озера, где в настоящее время ведется добыча песка, зафиксирован абсолютный максимум концентрации ОБВ (рис. 3).

Этот экстремум связан с повышенным содержанием ОБВ вследствие разрушения дна при добыче песка методом рефулирования. Процесс взмучивания рассматриваемого мелководного участка озера в анализируемой ситуации представляется более интенсивным по сравнению с другими мелководными акваториями. Это обусловлено дополнительным фактором – сильным северо-западным ветром, наблюдавшимся 26 мая, разгон которого в этом месте максимален.

Взмученная область была локализована и вытянута по ветру, её горизонтальный масштаб – около 600 м.

Аномально высокая концентрация ОБВ на участке добычи песка – свидетельство антропогенной составляющей в поле исследуемой величины в результате разрушения дна и сброса возвратных вод, содержащих значительное количество взвеси.

Два других локальных максимума концентрации ОБВ (2,5 мг/л) также обу-

словлены антропогенным воздействием. Они обнаружены в районе порта и коллектора хозяйственно-бытовых сточных

вод, который выведен в бухту Щелкунова (рис. 1).

Рис. 2. Векторы течений в верхнем, срединном и придонном слоях на акватории озера Донузлав в мае 2019 г.

Fig. 2. Current vectors in the upper, middle and bottom layers in the water area of Donuzlav Lake in May 2019

Растворенное органическое вещество. Поле концентрации РОВ отличалось высокой, не свойственной незагрязненным этим веществом черноморским водам (рис. 3). На всей исследованной акватории концентрация этой величины изменялась в интервале 2,2–4,9 мг/л, что в 1,1–2,5 раза выше концентрации РОВ, наблюдаемой в незагрязненных РОВ черноморских водах. На поверхности в центральной части Чёрного моря и в прибрежных водах Крыма, характерное содержание РОВ равно 2 мг/л [10].

Опыт исследования поля концентрации РОВ в прибрежных водах Крыма и накопленная емкая эмпирическая база позволили нам получить критерий для вод, содержащих антропогенную составляющую этого вещества и «чистых» вод, которые не содержат соответствующей добавки. В частности, установлено, что в незагрязненной среде поле содержания

этого вещества однородно. В прибрежных водах, которые не испытывают антропогенного влияния, его характерная концентрация изменяется в пределах 1,8–2,1 мг/л при солёности 18,2–18,4 мг/л.

Изолиния концентрации РОВ, равной 2,2 мг/л, на схемах горизонтального распределения данной величины может быть принята в качестве условной границы, разделяющей воды, содержащие антропогенную составляющую, и воды, где соответствующая добавка незначительна. По расположению локальных максимумов концентрации РОВ можно определить объекты, вызывающие антропогенное воздействие на водную среду.

В анализируемой ситуации практически на всей рассматриваемой акватории и всей толще вод содержание РОВ превышало 2,2 мг/л (рис. 3).

Рис. 3. Распределение концентрации ОВВ, мл/л на поверхности (а), у дна (б) и концентрации РОВ, мл/л на поверхности (в), у дна (г); концентрация ОВВ (д) и концентрация РОВ (е) на осевом разрезе в озере Донузлав в мае 2019 г.

Fig. 3. Distribution of TSM concentration, ml / l on the surface (a), at the bottom (b) and concentration of DOM, ml / l on the surface (c), at the bottom (d); TSM concentration (e) and DOM concentration (f) on the axial section in Lake Donuzlav in May 2019

Структура поля содержания РОВ оказалась аналогичной структуре поля содержания ОВВ. В поле концентрации РОВ выявлены те же экстремумы, что и в поле взвеси, которые обусловлены антропогенным воздействием, что подтверждает факт загрязнения соответствующих участков акватории озера и связанных с ним источников.

На участке добычи песка зафиксирован абсолютный максимум содержания РОВ с концентрацией 4,9 мг/л. В районе

порта и в бухте Щелкунова также отмечены локальные максимумы РОВ – 3,2 и 3,3 мг/л, обусловленные антропогенным воздействием (рис. 1, 3). То есть, добыча песка, порт и сброс сточных вод – три основных источника, поставляющие ОВВ и РОВ антропогенной природы в воды озера Донузлав. Напомним, что РОВ относят к одному из лучших показателей загрязнения (в том числе и бактериального) вод прибрежных морских и океанских акваторий [12–14].

На рис. 4. показано распределение концентрации РОВ на поперечном разрезе, плоскость которого проходила через бухту Щелкунова и мидийно-устричную ферму. В восточной части озера отчетливо видна вертикальная структура максимума содержания РОВ, связанного с коллектором сточных вод. Ядро этого экстремума расположено в слое 2-4 м, а влияние сточных вод распространяется до мористой границы бухты.

Рис. 4. Распределение концентрации растворенного органического вещества на поперечном разрезе через озеро Донузлав в мае 2019 г.

Fig. 4. Distribution of the dissolved organic matter concentration in the cross section through Lake Donuzlav in May 2019

В западной части разреза, в районе мидийно-устричной фермы, в верхнем слое вод отмечено повышенное до 2,3 мг/л содержание РОВ (рис. 4), что может быть вероятным следствием процессов, связанных с жизнедеятельностью искусственно сконцентрированных на ферме моллюсков.

Заключение. На основе данных экспедиции, проведенной в мае 2019 г. Институтом биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, получены представления о локальной системе течений и структуре полей содержания ОБВ и РОВ в водах озера Донузлав.

Показано, что локальная система течений в верхнем слое вод озера имела ветровую природу и была представлена двумя циклоническими вихревыми обра-

зованиями. У дна вдоль судоходного канала наблюдалось хорошо выраженное направленное в море струйное течение. Скорость течений на поверхности озера изменялась в интервале 6–26 см/с и 2–24 см/с – у дна.

В структуре полей концентрации ОБВ и РОВ обнаружены три совпадающих по месту расположения максимума антропогенной природы, которые находились на участке добычи песка, в районе порта и в бухте Щелкунова, куда выведен выпуск хозяйственно-бытовых сточных вод. Добыча песка, порт и сброс сточных вод – основные источники, загрязняющие акваторию озера Донузлав. Воды практически всей рассмотренной акватории содержали антропогенную составляющую в поле содержания РОВ.

В районе мидийно-устричной фермы отмечена повышенная концентрация РОВ, как вероятное следствие жизнедеятельности сконцентрированных здесь моллюсков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульгина Е.Ф. Изменения в гидрохимическом режиме озера Донузлав после соединения его с морем // Сб. работ бассейновой гидромет. обсерватории Черного и Азовского морей. Л., 1966. С. 11–19.
2. Чухчин В.Д. Формирование донных биоценозов в оз. Донузлав после соединения с морем // Многолетние изменения зообентоса Черного моря. Киев: Наук. думка, 1992. С. 217–225.
3. Немировский М.С., Ковригина Н.П. Динамика вод озера Донузлав // Экология моря. 2000. 51. С. 10–13.
4. Себах Л.К., Петренко О.А., Жугайло С.С., Цынтарюк Е.А. Влияние промышленной разработки месторождений песка на состояние экосистемы оз. Донузлав // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского бассейна: материалы II Междунар. конф. 26-27 июня 2006 г. Керчь: ЮгНИРО, 2006. С. 71–79.

5. Тихоненкова Е.Г., Пасынков А.А., Иванютин Н.М. Закономерности распределения загрязняющих веществ в водах сопредельных участков озера Донузлав и Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 4. С. 75–84.
6. Fomin V.V., Ivanov V.A. Combined numerical model of currents, waves, and sediment transport in Lake Donuzlav // Physical Oceanography. 2006. Vol. 16, № 2. P. 107–127. doi: 10.1007/s11110-006-0019-8
7. Жувайло С.С., Авдеева Т.М., Пузач М.Н., Аджиумеров Э.Н. Состояние качества водной среды и донных отложений озера Донузлав в современный период // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1. № 1. С. 32–38.
8. <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 26.04.2020).
9. <http://old.wetterzentrale.de/topkarte/n/fsreaur.html> (дата обращения: 26.04.2020).
10. Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова думка, 1971. 250 с.
11. Lomakin P.D., Chepyzhenko A.I., Chepyzhenko A.A. The total suspended matter concentration field in the Kerch Strait based on optical observations // Physical Oceanography. 2017. Iss. 6. P. 58–69. doi:10.22449/1573-160X-2017-6-58-69
12. Boss E., Pegau W.S., Zaneveld J.R.V., Barnard A.H. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2001. 106. Iss. C5. P. 9499–9508. DOI:10.1029/2000JC900008
13. Tedetti M., Longhitano R., Garcia N., Guigue C., Ferretto N., Goutx M. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) // Environ. Chem. 2012. 9, Iss. 5. P. 438–449. doi:10.1071/EN12081
14. Karlsson C.M.G., Cerro-Galvez E., Lundin D., Karlsson C., Vila-Costa M., Pinhassi J. Direct effects of organic pollutants on the growth and gene expression of the Baltic Sea model bacterium *Rheinheimera* sp. BAL341 // Microbial Biotechnology. 2019. 12 (5). P. 892–906. doi:10.1111/1751-7915.13441

CONTROL OF THE CURRENT SYSTEM AND FIELDS OF THE TOTAL SUSPENDED MATTER CONCENTRATION AND DISSOLVED ORGANIC MATTER CONCENTRATION IN LAKE DONUZLAV IN MAY 2019

P.D. Lomakin^{2,3}, V.I. Ryabushko¹, A.I. Chepyzhenko², S.V. Schurov¹

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2

²Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

³Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Based on the expedition data carried out in May 2019, information about the local system of currents and fields of the total suspended matter concentration and dissolved organic matter concentration in the waters of Lake Donuzlav is obtained. It is shown that the system of the local currents in the upper layer of the lake waters is represented by two cyclonic eddy formations. At the bottom along the navigable canal, a pronounced jet stream directed into the sea is noted. It is revealed that sand extraction, port and wastewater discharge are the main sources of total suspended and dissolved organic matter of anthropogenic nature, which pollute the water area of Lake Donuzlav. In the area of the mussel-oyster farm, an increased concentration of dissolved organic matter is recorded, as a likely consequence of the vital activity of mollusks concentrated here.

Keywords: currents, total suspended matter, dissolved organic matter, pollution, Donuzlav Lake, Black Sea.

REFERENCES

1. *Shul'gina E.F.* Izmeneniya v gidrokhimicheskom rezhime ozera Donuzlav posle soedineniya ego s morem // Sb. rabot bassejnovoj gidromet. observatorii Chernogo i Azovskogo morej. L., 1966. pp. 11–19.
2. *Chuhchin V.D.* Formirovanie donnyh biocenozov v oz. Donuzlav posle soedineniya s morem. Mnogoletnie izmeneniya zoobentosa Chernogo morja. Kiev: Nauk. dumka, 1992. pp. 217–225.
3. *Nemirovskij M.S., Kovrigina N.P.* Dinamika vod ozera Donuzlav // Jekologija morja. 2000. 51. pp. 10–13.
4. *Sebah L.K., Petrenko O.A., Zhugajlo S.S., Cyntarjuk E.A.* Vlijanie promyshlennoj razrabotki mestorozhdenij peska na sostojanie jekosistemy oz. Donuzlav // Sovremennye problemy jekologii Azovo-Chernomorskogo bassejna: materialy II Mezhdunar. konf. 26-27 ijunja 2006 g. Kerch': JugNIRO, 2006. pp. 71–79.
5. *Tihonenkova E.G., Pasynkov A.A., Ivanjutin N.M.* Zakonomernosti raspredelenija zagrjaznjajushchih veshhestv v vodah sopredel'nyh uchastkov ozera Donuzlav i Chernogo morja // Geologija i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana. 2010. No 4. pp. 75–84.
6. *Fomin V.V., Ivanov V.A.* Combined numerical model of currents, waves, and sediment transport in Lake Donuzlav. *Physical Oceanography*. 2006. Vol. 16, No 2. pp. 107–127. doi:10.1007/s11110-006-0019-8
7. *Zhugajlo S.S., Avdeeva T.M., Pugach M.N., Adzhumerov Je.N.* Sostojanie kachestva vodnoj sredy i donnyh otlozhenij ozera Donuzlav v sovremennyj period. *Vodnye bioresursy i sreda obitanija*. 2018. Vol. 1. No 1. pp. 32–38.
8. <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (data obrashhenija: 26.04.2020).
9. <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html> (data obrashhenija: 26.04.2020).
10. *Hajlov K.M.* Jekologicheskij metabolizm v more. Kiev: Naukova dumka, 1971. 250 p.
11. *Lomakin P.D., Chepyzhenko A.I., Chepyzhenko A.A.* The total suspended matter concentration field in the Kerch Strait based on optical observations. *Physical Oceanography*. 2017. Vol. 6. pp. 58–69. doi:10.22449/1573-160X-2017-6-58-69
12. *Boss E., Pegau W.S., Zaneveld J.R.V., Barnard A.H.* Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. 106. Vol. C5. pp. 9499–9508. DOI:10.1029/2000JC900008
13. *Tedetti M., Longhitano R., Garcia N., Guigue C., Ferretto N., Goutx M.* Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France). *Environ. Chem*. 2012. 9, Vol. 5. pp. 438–449. doi:10.1071/EN12081
14. *Karlsson C.M.G., Cerro-Galvez E., Lundin D., Karlsson C., Vila-Costa M., Pinhassi J.* Direct effects of organic pollutants on the growth and gene expression of the Baltic Sea model bacterium *Rheinheimera* sp. BAL341. *Microbial Biotechnology*. 2019. 12 (5). pp. 892–906. doi:10.1111/1751-7915.13441