

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

Институт экологии Волжского бассейна РАН;  
Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ул.  
Комзина, д. 10

River Basin of the Russian Academy of Sciences;

10, Komzina st., Togliatti, 445003, Russia

e-mail: rahavum@mail.ru

**Татьяна Валерьевна Турутина**

научный сотрудник, и.о. заведующей лабораторией  
наносов и эрозии ФГБУ "Государственный  
гидрологический институт";

Россия, 199004, г. Санкт-Петербург, 2-я линия В.о., д.  
23

**Tatyana V. Turutina**

Researcher, Head of the Laboratory for Sediment and  
Erosion, State Hydrological Institute;

23, 2nd line, Vasilyevsky Ostrov, St. Petersburg, 199004,  
Russia

e-mail: turutina.tatyana@yandex.ru

**Марина Валентиновна Шмакова**

доктор географических наук, ведущий научный  
сотрудник лаборатории математических методов  
моделирования ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН;

Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова,  
9

**Marina V. Shmakova**

Doctor of Geographical Sciences,  
Leading Researcher, Laboratory of Mathematical  
Modeling Methods, Institute of Limnology of the Russian  
Academy of Sciences;

9, Sevastyanova st., St. Petersburg, 196105, Russia

e-mail: m-shmakova@yandex.ru

**Пробьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Рахуба А.В., Турутина Т.В., Шмакова М.В. Донные отложения приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища (по данным экспедиционных исследований 2020 г.) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. №3(58). С. 107–115. doi: 10.17072/2079-7877-2021-3-107-115.

**Please cite this article in English as:**

Rakhuba, A.V., Turutina, T.V., Shmakova, M.V. (2021). Bottom sediments near the Kuibyshev Reservoir dam (according to the data of the 2020 expedition research). *Geographical bulletin*. No. 3(58). Pp. 107–115. doi: 10.17072/2079-7877-2021-3-107-115.

УДК 556.3:546.03

DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-115-129

## КАДМИЙ В ВОДЕ ПО КОНТИНУУМУ «ЭСТУАРИЙ Р. МИУС – ТАГАНРОГСКИЙ ЗАЛИВ АЗОВСКОГО МОРЯ»

**Юрий Александрович Федоров**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

e-mail: fedorov@sfedu.ru

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Дмитрий Николаевич Гарькуша**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

e-mail: gardim@sfedu.ru

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Виктория Игоревна Чепурная**

e-mail: vchepurnaya@sfedu.ru

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Ирина Владимировна Доценко**

e-mail: dotsenko@sfedu.ru

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Дарья Федоровна Костенко**

e-mail: solodko@sfedu.ru

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия



## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

Исследования особенностей распределения концентраций валового кадмия, а также растворенной и взвешенной его форм миграции выполнены по континууму «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив Азовского моря», в пределах которого расположены две барьерные зоны – зона смешения вод р. Миус с водами Миусского лимана и зона смешения вод лимана с водами Таганрогского залива. В данных барьерных зонах концентрации всех форм кадмия существенно возросли, что обусловлено повышенной ветровой активностью, наблюдавшейся в период исследований, вследствие чего происходит взмучивание ила и миграция в воду значительной части ранее осажденного на геохимических барьерах кадмия. В целом, в воде исследуемого континуума наблюдается положительная корреляция концентраций всех форм кадмия не только между собой, но и со значениями pH и солёности. Для всей исследуемой системы растворенная форма миграции кадмия незначительно преобладала над взвешенной формой и составляла от 50 до 75% (в среднем 57%) от валового его содержания. При этом абсолютное содержание растворенной формы миграции кадмия не выходило за пределы максимальных значений диапазона его концентраций в пресных поверхностных и морских водах земного шара, а также значений ПДК для соответствующих сред.

Ключевые слова: эстуарная зона, Миусский лиман, Таганрогский залив, вода, формы миграции, кадмий, взвешенное вещество, pH, солёность.

### CADMIUM IN WATER ALONG THE CONTINUUM ‘THE MIUS ESTUARY – THE TAGANROG BAY OF THE AZOV SEA’

**Yury A. Fedorov**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7411-3030>e-mail: [fedorov@sfedu.ru](mailto:fedorov@sfedu.ru)*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia***Dmitry N. Gar'kusha**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5026-2103>e-mail: [gardim@sfedu.ru](mailto:gardim@sfedu.ru)*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia***Victoria I. Chepurnaya**e-mail: [vchepurnaya@sfedu.ru](mailto:vchepurnaya@sfedu.ru)*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia***Irina V. Dotsenko**e-mail: [dotsenko@sfedu.ru](mailto:dotsenko@sfedu.ru)*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia***Daria F. Kostenko**e-mail: [solodko@sfedu.ru](mailto:solodko@sfedu.ru)*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

We have studied the distribution of concentrations of bulk cadmium, as well as dissolved and suspended forms of its migration, along the continuum ‘the Mius estuary – the Taganrog Bay of the Azov Sea’. Within this area, there are located two barrier zones – the zone of the Mius River waters mixing with the Miusky Liman waters and the zone of the estuary waters mixing with the waters of the Taganrog Bay. In these barrier zones, the concentrations of all forms of cadmium increased significantly, which was due to the high wind activity observed during the study period, as a result of which, the silt deposit was stirred up, and a significant part of the cadmium previously deposited on the geochemical barriers migrated into the water. In general, in the water of the studied continuum, we observed a positive correlation of concentrations of all forms of cadmium not only with each other but also with the values of pH and salinity. For the entire studied system, the dissolved form of cadmium migration slightly prevailed over the suspended form and ranged from 50 to 75% (on average, 57%) of its gross content. At the same time, the absolute content of the dissolved form of cadmium migration did not go beyond the maximum values of the range of its concentrations in fresh surface and sea waters of the globe, as well as the MPC values for the corresponding environments.

Keywords: estuary zone, Miusky Liman, Taganrog Bay, water, forms of cadmium migration, suspended matter, pH, salinity.

### Введение

Кадмий – один из самых токсичных тяжелых металлов, биологический период полувыведения которого из организма составляет более 10–15 лет [2]. Российским СанПиНом он отнесен ко 2-му классу опасности – «высокоопасные вещества», его предельно допустимая концентрация (ПДК) для пресных и морских вод объектов рыбохозяйственного назначения, соответственно, составляет 5 и 10 мкг/дм<sup>3</sup> [10]. Это литофильный и халькофильный элемент, который, как и другие тяжелые металлы, относится к циклическим

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

элементам. Кадмий химически похож на цинк и в природе чаще всего встречается с цинком и свинцом в сульфидных рудах [3; 9; 20; 34].

Вследствие востребованности данного элемента при производстве аккумуляторов, как компонента красителей, стабилизаторов пластмасс и гальванических покрытий, производство кадмия неуклонно возрастало на протяжении прошлого века, несмотря на целый ряд существенно ограничивающих его использование мер, принятых с 2003 г. Европейским Союзом [21], а с 2016 г. Евразийским экономическим союзом [16], продолжает расти и в нынешнем столетии (рис. 1).

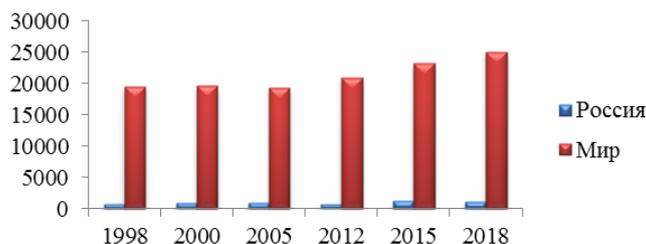


Рис. 1. Диаграмма среднегодового производства кадмия (т) в 1998–2018 гг.  
(построено авторами по данным [28–33])

Fig. 1. Diagram of the average annual production of cadmium (tons) in 1998–2018.  
(drawn by the authors based on data [28–33]).

По сведениям [26], ежегодное поступление кадмия в атмосферу оценивается в  $7,19 \cdot 10^6$  кг, при этом примерно  $0,843 \cdot 10^6$  кг (11,7%) данного металла поступает из природных источников (жизнедеятельность растений, эрозия почв, вулканическая деятельность и лесные пожары). В дождевых осадках промышленных районов, вследствие вымывания кадмия из атмосферы, его концентрация может превышать  $50 \text{ мкг/дм}^3$ .

В водной среде соединения кадмия, как и других тяжелых металлов, могут существовать в трех основных формах: взвешенной, коллоидной и растворенной, соотношение между которыми во многом определяется кислотнo-щелочными и окислительно-восстановительными условиями [6; 9; 11; 14]. Кадмий, поступая в природные воды, вследствие выщелачивания почв, полиметаллических и медных руд, в результате разложения водных организмов, способных его накапливать, а также со сточными водами обогатительных фабрик, заводов по производству цветных металлов и удобрений, различных химических и прочих промышленных предприятий, легко переходит в раствор [12]. Последнее опасно для гидробионтов, поскольку растворенные формы кадмия, среди которых в пресных поверхностных водах преобладает свободный ион  $\text{Cd}^{2+}$ , в наибольшей степени способны проникать через клеточную мембрану и накапливаться в тканях и внутренних органах живых организмов, вызывая токсические эффекты [2; 7; 12; 24].

В пресных поверхностных водах концентрация растворенного кадмия находится в пределах  $0,01\text{--}0,50 \text{ мкг/дм}^3$ , а в случаях крайнего загрязнения может достигать  $17 \text{ мкг/дм}^3$  [9]. По обобщенным данным [9] концентрация растворенного кадмия в водах Северной Атлантики, Тихого и Индийского океана варьируется в диапазоне  $0,0008\text{--}0,15 \text{ мкг/дм}^3$ . В целом для морских вод средняя концентрация растворенных форм кадмия составляет  $0,11 \text{ мкг/дм}^3$  [23]. Большую роль в переносе кадмия в водной среде играет взвешенное вещество. При снижении значений pH кадмий, связанный со взвесью или с донными отложениями, может экстрагироваться и возвращаться в воду [27], усиливая токсическое воздействие на водные организмы.

По сведениям [9; 14], при низких скоростях течения около 30% кадмия, находящегося в составе коллоидной формы миграции, осаждается в верхней части эстуариев. В сильно окислительных условиях кадмий способен образовывать собственные минералы ( $\text{CdO}$ ,  $\text{CdCO}_3$ ), а также накапливаться в фосфатах и биогенных осадках.

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

На примере мезокосменного эксперимента [22], в ходе которого смоделировано мощное загрязнение водоема кадмием, установлено, что большая часть поступившего кадмия выводится из водной толщи в течение первых нескольких суток, главным образом, в составе осаждающихся на дно водоема взвешенных частиц, в том числе остатков погибшего планктона. По мнению авторов [22], подобный механизм активизирует самоочищение воды от токсичного элемента, способствуя в дальнейшем восстановлению численности фитопланктона и усилению его продуктивности.

Отметим, что в ранее проведенных исследованиях [4; 5; 8; 18] были изучены уровни содержания кадмия в воде по континууму «река Дон – Таганрогский залив – Азовское море». В настоящей работе, основанной на данных экспедиционных исследований, проведенных в августе 2020 г., впервые приведены сведения о концентрациях валового кадмия, а также двух его миграционных форм: растворенной и взвешенной и особенностях их распределения по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив Азовского моря».

## Материалы и методы

Исследуемый континуум «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив» рассматривается нами как единая водная система, характеризующаяся постепенным и непрерывным переходом р. Миус в Миусский лиман и затем в Таганрогский залив Азовского моря. Данная водная система расположена в пределах правобережной части Причерноморской низменности, выделяемой в качестве самостоятельного геоморфологического района – Приазовской равнины [1].

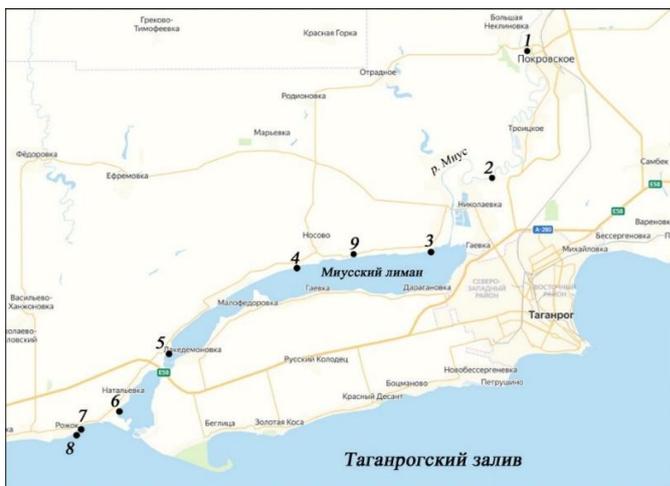


Рис. 2. Карта-схема района исследования р. Миус, Миусского лимана (Миусского водохранилища) и Таганрогского залива. Черными кругами и цифрами рядом с ними указаны, соответственно, местоположение станций наблюдения и их номера: станция 1 – река Миус, село Покровское; станция 2 – р. Миус, село Николаевское; станция 3 – Миусский лиман, село Золотарево; станция 4 – Миусский лиман, хутор Калинин; станция 5 – Миусский лиман, хутор Ломакин; станция 6 – Миусский лиман, село Натальевка; станция 7 – Таганрогский залив, база отдыха Рожок; станция 8 – Таганрогский залив, в 100 м от станции 7; станция 9 – общественный колодец, пос. Грузиновка

Fig. 2. Schematic map of the study area of the Mius River, the Miussky Liman (the Miussky Reservoir) and the Taganrog Bay. Black circles and numbers next to them indicate, respectively, the location of the observation stations and their numbers: station 1 – Mius River, Pokrovskoye village; station 2 – Mius River, Nikolaevskoye village; station 3 – Miussky Liman, Zolotarevo village; station 4 – Miussky Liman, Kalinin village; station 5 – Miussky Liman, Lomakin village; station 6 – Miussky Liman, Natalyevka village; station 7 – Taganrog Bay, recreation center Rozhok; station 8 – Taganrog Bay, 100 m from the station 7; station 9 – a common well, Gruzinovka village

Река Миус – это трансграничный водоток, русло которого представляет собой каскадную систему с небольшими водохранилищами и искусственными рыбопродуктивными прудами. Река в пределах российской территории неглубоко врезана в берега, покрытые луговой растительностью и кустарником. Русло реки извилистое, шириной 15–25 м (в низовье – до 45 м). Глубина русла на плёсах – до 6 м, на перекатах – до 0.5 м. Уклон реки 1,1 м/км, обуславливающий ее медленное течение. Воды р. Миус поступают в Миусский лиман, представляющий собой часть эстуарной экосистемы, где происходит трансформация речных вод, сопровождающаяся затем смешением с водами Таганрогского залива. Миусский лиман, который в настоящее время зарегулирован, можно в техническом смысле отнести к водохранилищу [17].

*Гидрология**Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.*

В период наблюдений в августе 2020 г. отбор проб воды производился в трехкратной повторности на 8 станциях, расположенных в прибрежной зоне исследуемого континуума (в 2,5–3,5 м от берега – в р. Миус и в 15–25 м от берега – в Миусском лимане и Таганрогском заливе; глубина от 0,5 до 0,6 м), с целью определения концентраций кадмия в нефльтрованных (валовое содержание) и фильтрованных (растворенная форма миграции) пробах. Кроме этого, были отобраны питающие Миусский лиман подземные воды первого от поверхности водоносного горизонта (глубина от поверхности земли до уровня воды 11 м). В пробах воды, наряду с кадмием, определены температура, значения pH и минерализация (таблица, рис. 2).

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение в них перечисленных показателей проведены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [13; 15]. Значения pH и температура измерены портативным иономером «Экотест 2000» сразу после отбора проб.

Фильтрация проб воды через предварительно очищенные и взвешенные мембранные фильтры «Владипор» типа МФАС-ВА с размером пор 0,45 мкм (450 нм) проведено с помощью портативной фильтровальной установки сразу же после отбора проб. После чего фильтрат, а также нефльтрованные пробы в соответствии с методикой [13] подкисляли концентрированной азотной кислотой до  $\text{pH} < 2$ .

Подготовка проб воды к измерениям и количественное определение в них валового (в нефльтрованной пробе) и растворенного кадмия (в фильтрованной пробе) выполнены в Гидрохимическом институте Росгидромета методом атомно-абсорбционного анализа с прямой электротермической атомизацией проб по методике [13]. Погрешность определения кадмия в пробах воды не превышала 10–15%. По разности содержаний валового кадмия и его растворенной формы рассчитано содержание элемента во взвеси (объемная концентрация). Под растворенной формой миграции понимается сумма истинно растворенного кадмия и кадмия, находящегося в воде в коллоидном состоянии, а под взвешенной формой миграции кадмия – его содержание во взвешенных органических и минеральных частицах размером более 0,45 мкм.

Для математико-статистической обработки данных и корреляционного анализа связи изучаемых форм миграции кадмия между собой и другими исследуемыми физико-химическими параметрами применялась программа Excel.

**Результаты и обсуждение**

В период экспедиционных исследований наблюдались умеренные ветра (от 5 до 7,5 м/с), а средняя температура воздуха составила 23,8°C. Температура воды варьировалась от +18°C – в р. Миус (станция 1) до +25°C – в центральной части Миусского лимана (станция 4) (таблица). В Миусском лимане, вследствие взмучивания илистых отложений ветровым волнением в условиях открытых мелководных пространств лимана, в воде находилось большое количество тонкой фракции взвешенного вещества, забивающего фильтры и существенно увеличивающего время фильтрации проб [17].

В нижнем течении р. Миус (станции 1 и 2) минерализация вод изменялась в пределах 2,2–2,36 г/дм<sup>3</sup> (в среднем 2,28 г/дм<sup>3</sup>) (таблица, рис. 3, а), что, по классификации О.А. Алекина, соответствует высокоминерализованным водам (>1,0 г/л). Отметим, что в прошлом в меженный период минерализация воды в реке была несколько ниже, в среднем составляя 1,9 г/дм<sup>3</sup> [17].

Значения pH в реке изменялись в слабощелочном диапазоне (8,16–8,26, в среднем 8,2) и были заметно выше, чем во время наблюдений, проводившихся в 2006–2010 гг. (7,0–7,8, в среднем 7,4) [17]. В ходе описываемых исследований при смешении вод р. Миус с водами

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

Миусского лимана и затем в верхнем бьефе по мере продвижения в направлении плотины, помимо увеличения значений рН с 8,56 до 8,67, наблюдается рост солёности с 3,43 до 4,23‰ (в среднем 3,77‰), что почти в 1,5 раза выше по сравнению с летним периодом 2006–2010 гг., когда солёность в лимане была на уровне 2,33–2,95‰ (в среднем 2,64‰), а значения рН не превышали 7,6–8,0 (в среднем 7,8) [17]. По-видимому, повышенные значения рН в 2020 г. обусловлены ростом солёности и, возможно, интенсивными процессами фотосинтеза (интенсивное цветение водорослей) в лимане, вследствие чего поглощается  $\text{CO}_2$  и происходит подщелачивание вод. Летний период 2020 г. характеризовался продолжительным засушливым периодом, что обусловило чрезвычайно высокую солёность вод в нижнем бьефе Миусского лимана – до 9,48‰, а также вод, более активно обменивающихся с ним, Таганрогского залива – до 8,67‰. По сведениям, во время экспедиций 2006 г. [19] солёность в районе выхода вод Миусского лимана в Таганрогский залив в условиях различных ветровых обстановок не превышала 0,8–4,0‰. Таким образом, солёность в 2020 г. в Таганрогском заливе была почти в 3 раза выше относительно той, что наблюдалась в 2006 г. Заметный рост солёности в Таганрогском заливе в аномально засушливый летний период 2020 г. объясняется снижением стока р. Дон, сопровождающегося увеличением испарения с поверхности залива.

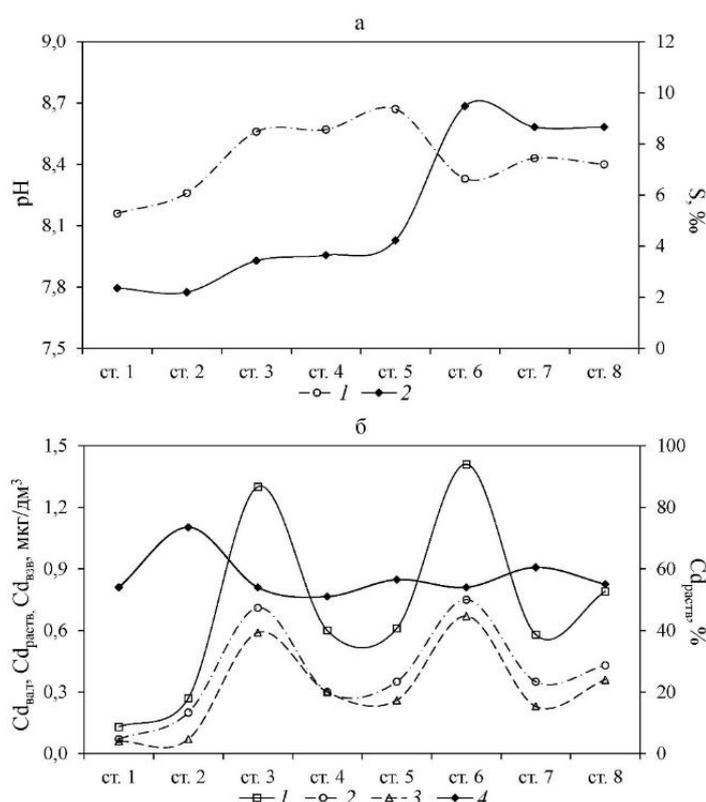


рис. 3. Вариации исследованных гидрохимических параметров в воде системы «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив».

На рис. 3, а: 1 – значение рН; 2 – минерализация (солёность); на рис. 3, б: 1 – валовая концентрация кадмия, 2 – концентрация растворенной формы кадмия, 3 – концентрация взвешенной формы кадмия, 4 – доля растворенной формы кадмия, % от валового его содержания

Fig. 3. Variations of the investigated hydrochemical parameters in the water of the 'Mius River – Miusky Liman – Taganrog Bay' system. Figure 3a: 1 – pH value; 2 – mineralization (salinity); Figure 3b: 1 – gross concentration of cadmium, 2 – concentration of the dissolved form of cadmium, 3 – concentration of the suspended form of cadmium, 4 – share of the dissolved form of cadmium in % of its gross content.

Валовое содержание кадмия ( $\text{Cd}_{\text{вал}}$ ) и концентрация его растворенной формы миграции ( $\text{Cd}_{\text{раств}}$ ) возрастают вниз по течению р. Миус. В том же направлении увеличивается значение рН, в то время как концентрация взвешенной формы кадмия ( $\text{Cd}_{\text{взв}}$ ) и минерализация воды остаются примерно на одном уровне (рис. 3). Содержание растворенной формы кадмия в воде р. Миус не выходит за пределы максимальных значений диапазона его концентраций в пресных поверхностных водах земного шара [9]. Соотношение концентраций  $\text{Cd}_{\text{вал}}$  и  $\text{Cd}_{\text{раств}}$  указывает на то, что в среднем до 64% кадмия мигрирует в воде реки в растворенной форме. При этом своего максимума (73,5%) относительное содержание  $\text{Cd}_{\text{раств}}$  достигает в воде нижнего течения реки (станция 2), где наблюдается снижение скорости течения. Очевидно, что на участках водотоков с замедленным стоком роль миграции кадмия во взвеси может снижаться относительно его растворенной формы за счет осаждения взвеси на дно, что характерно и для других металлов (например, меди [14]).

## Гидрология

*Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.*

В зоне непосредственного смешения вод Миусского лимана с речными водами (станция 3) возрастают соленость и значения рН. Воды становятся солоноватыми, существенно увеличиваются валовое содержание кадмия и содержание всех рассматриваемых форм его миграции (таблица, рис. 3). Далее по продольному профилю лимана, наряду с отчетливым снижением исследованных форм кадмия, отмечаются их незначительные флуктуации. В зоне смешения вод Миусского лимана с водами Таганрогского залива (станция 6), на фоне резкого увеличения солености и некоторого снижения значений рН (рис. 3), концентрации всех форм кадмия снова существенно возрастают.

В барьерных зонах, каковыми являются зоны «река Миус – Миусский лиман» (станция 3) и «Миусский лиман – Таганрогский залив» (станция 6), характеризующихся наличием механических и физико-химических геохимических барьеров, в штилевых условиях, обычно, происходит интенсивное осаждение на дно кадмия, с одной стороны, выносимого водами р. Миус, с другой стороны, поступающего в нижний бьеф в составе попускаемых вод из Миусского лимана (водохранилища), а также с водами Таганрогского залива во время нагонных явлений. Однако, в условиях высокой ветровой активности, наблюдавшейся в период описываемых исследований, на открытых мелководных пространствах Миусского лимана происходило взмучивание наилка и, по всей видимости, значительная часть осажденного ранее кадмия перешла из отложений в воду, существенно увеличив в ней концентрации, как растворенной, так и взвешенной его форм, особенно на станциях, приуроченных к указанным барьерным зонам. Несмотря на наличие двух ярко выраженных пиков максимумов концентраций всех исследованных форм кадмия в воде Миусского лимана, доля  $Cd_{\text{раств}}$  по отношению к  $Cd_{\text{вал}}$  по всему продольному профилю лимана изменяется в небольшом диапазоне – 50–60% (в среднем 54%), тем самым указывая на примерно равное количество кадмия, мигрирующего в растворенной и взвешенной формах в воде лимана.

В воде Таганрогского залива (станции 7 и 8) наблюдается некоторое снижение валового содержания кадмия, а также концентраций его растворенной (в среднем  $0,39 \text{ мкг/дм}^3$ ) и взвешенной (в среднем  $0,30 \text{ мкг/дм}^3$ ) форм, при этом относительное содержание растворенной формы кадмия незначительно возрастает (до 58%). В целом, концентрации  $Cd_{\text{раств}}$  в воде исследуемого континуума не превышают ПДК, как для пресных, так и морских вод [10].

Выполнено сравнение приведенных выше современных данных по концентрациям растворенной формы миграции кадмия на прибрежных станциях 7 и 8 в Таганрогском заливе с данными ранее проведенных исследований [5; 8; 18]. По обобщенным сведениям, представленным в работе [5], в период с 1986 по 2006 г. содержание  $Cd_{\text{раств}}$  летом в Таганрогском заливе изменялось от  $<0,1$  до  $0,56 \text{ мкг/дм}^3$  (в среднем  $0,13 \text{ мкг/дм}^3$ ). При этом информация по солености, значениям рН и погодным условиям в этой работе отсутствовала. По сведениям [18], летом 2006 г. во время шторма концентрации  $Cd_{\text{раств}}$  варьировались в диапазоне  $0,18\text{--}0,6 \text{ мкг/дм}^3$  (в среднем  $0,29 \text{ мкг/дм}^3$ ), а осенью в условиях относительного штиля – в пределах  $0,01\text{--}0,14 \text{ мкг/дм}^3$  (в среднем  $0,05 \text{ мкг/дм}^3$ ). Таким образом, независимо от погодных условий в воде Таганрогского залива в 2020 г. отмечается увеличение концентраций  $Cd_{\text{раств}}$ , по сравнению с 2006 г. В качестве объяснения причин роста в современный период концентраций  $Cd_{\text{раств}}$  можно предположить как возможное антропогенное влияние, так и флуктуации физико-химической обстановки и динамики водных масс. Однако рабочая гипотеза о росте в воде Таганрогского залива концентраций  $Cd_{\text{раств}}$ , связанного с увеличением антропогенного пресса, не подтверждается, поскольку в работе [4] на основании анализа многолетнего массива данных за период с 1986 г. по 2017 г. был, напротив, установлен тренд снижения его концентраций в водах залива.

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

Вероятной причиной высоких концентраций  $Cd_{\text{раств}}$  в 2020 г. является сопровождающееся ростом температуры и минерализации усиление выщелачивания кадмия из донных отложений с образованием свободного иона  $Cd^{2+}$ , точнее, аква-иона  $[Cd(H_2O)_4]^{2+}$ , а также неорганических комплексных ионов ( $[CdCl]^{+}$ ,  $[CdOH]^{+}$ ,  $[CdHCO_3]^{+}$ ,  $[CdCl_3]^{-}$ ,  $[CdCl_4]^{2-}$ ,  $[Cd(OH)_3]^{-}$  и  $[Cd(OH)_4]^{2-}$ ), и органических хелатов [12].

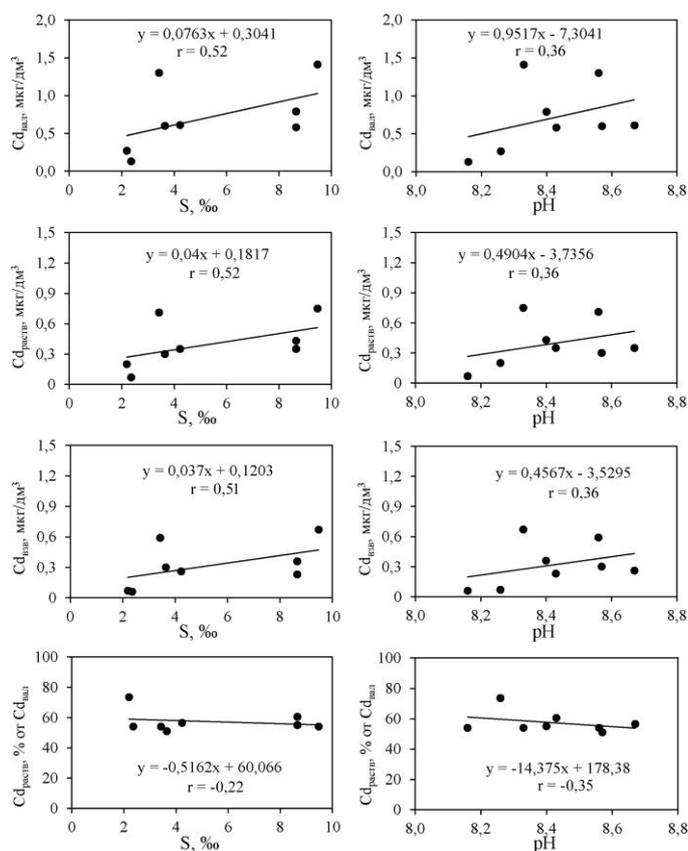


Рис. 4. Зависимости концентраций исследованных форм кадмия и процентного содержания его растворенной формы от солености и pH

Fig. 4. Dependences of the concentrations of the studied forms of cadmium and the percentage of its dissolved form on salinity and pH

максимальная доля растворенной формы кадмия по отношению к валовому его содержанию наблюдается в воде р. Миус, характеризующейся большей закрытостью от ветра, чем Миусский лиман, и относительно низкими скоростями течения, определяющими меньшее количество в речных водах взвеси и связанных с ней взвешенных форм кадмия. Некоторое влияние на высокое процентное содержание растворенной формы кадмия, вероятно, оказывает и более кислая среда речных вод, обуславливающая менее интенсивную сорбцию взвесью и донными отложениями из раствора катионогенных элементов, включая кадмий. С другой стороны, станции Миусского лимана, особенно его барьерные участки – «река Миус – Миусский лиман» (станция 3) и «Миусский лиман – Таганрогский залив» (станция 6), на фоне максимальных концентраций взвешенной формы кадмия, обусловленной его поступлением в воду в составе взмученного в условиях наблюдаемой высокой ветровой активности наилка, характеризовались одними из самых низких процентных содержаний растворенной формы кадмия по отношению к его валовому содержанию.

Сопоставление распределения концентраций валового железа, его растворенной и взвешенной форм в воде по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив,

В целом, в воде по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив Азовского моря» наблюдается сходство в изменениях концентраций  $Cd_{\text{вал}}$ ,  $Cd_{\text{раств}}$  и  $Cd_{\text{взв}}$  не только между собой, но и со значениями pH и солености (рис. 3). При этом поведение по данному профилю исследованных форм кадмия более синхронизировано с изменением солености (коэффициенты корреляции  $r$  составляют 0,51–0,52), чем с изменением pH ( $r$  для всех форм составляет 0,36) (рис. 4). Процентное содержание  $Cd_{\text{раств}}$  по отношению к валовому его содержанию в воде находится в противофазе с абсолютной концентрацией всех исследованных форм миграции кадмия (коэффициенты корреляции  $r$  варьируют в пределах – 0,34...–0,50), а также со значениями pH ( $r = -0,35$ ) и солености ( $r = -0,22$ ) (рис. 4 и 5).

Установленные отрицательные связи между концентрациями исследованных форм миграции кадмия и процентным содержанием  $Cd_{\text{раств}}$  сформированы в результате того, что, с одной стороны,

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

описанное в работе [17], с распределением концентраций кадмия по этому профилю, рассматриваемое в настоящей статье, показывает наличие относительно не высоких, но значимых прямых связей ( $r = 0,36-0,52$ ,  $P < 0,01$ ) между исследованными формами миграции данных металлов (рис. 5). Установленные связи, очевидно, обусловлены тем, что в условиях насыщения воды Миусского лимана кислородом, вследствие фотосинтеза и активной аэрации вод, происходит вывод кадмия и других металлов в составе обладающих высокими сорбционными свойствами оксидов и гидроксидов железа и марганца, которые в наблюдаемой слабощелочной обстановке ( $pH > 8$ ) осаждаются на поверхность донных отложений. Часть железа и кадмия осаждаются в составе детрита, а также различных минералов и почвенных частиц, поступающих с поверхности водосбора. Повышение ветровой активности, наблюдаемое в период исследований, привело к взмучиванию наилка и, как следствие, синхронному поступлению в воду значительной части ранее осажденных на дно железа и кадмия. Другим источником кадмия могла служить осаждающаяся на акваторию пыль, которая образовалась вследствие ветровой эрозии почв. Это косвенно подтверждается тем, что на некоторых станциях мониторинга бассейна Таганрогского залива установлено загрязнение почв обменными формами меди, цинка и кадмия, что говорит об их техногенном накоплении [25]. Таким образом, ветровая обстановка является одним из важнейших факторов для гидрохимии тяжелых металлов, что согласуется с выводами ранее проведенных исследований [17; 18].

Изучены концентрации форм миграции кадмия и физико-химических показателей в грунтовых водах (станция 9), как возможного источника поступления кадмия в Миусский лиман (таблица). Значение pH в подземных водах характеризовалось слабощелочной реакцией (7,68) и соленостью, равной 2,69‰. Концентрации исследованных форм кадмия были ниже в грунтовых водах по сравнению с поверхностными водами, при этом растворенная форма его миграции преобладала над взвешенной формой в 1,5 раза.

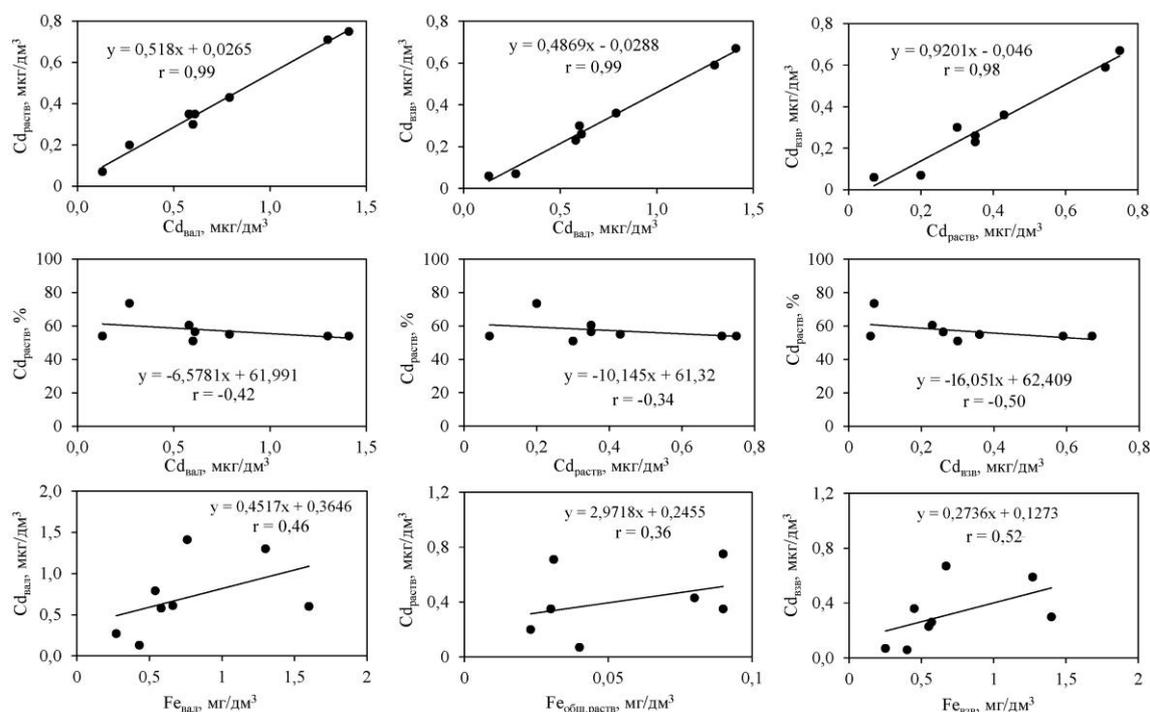


Рис. 5. Зависимости концентраций исследованных форм миграции кадмия между собой и с процентным содержанием его растворенной формы, а также с концентрациями валового железа и кадмия, их растворенной и взвешенной форм в воде по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив»

5. Dependences of the concentrations of the studied forms of cadmium migration among themselves and with the percentage of its dissolved form, as well as with the concentrations of total iron and cadmium, their dissolved and suspended forms in the water along the continuum 'Mius River – Miussky Liman – Taganrog Bay'.

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

Таблица

Содержание различных форм Cd в воде по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив»  
 The content of various forms of Cd in the water of the mixing zone 'Mius River – Miussky Liman – Taganrog Bay'

Водный объект	Местоположение станций отбора проб	Координаты, с.ш./в.д.	T, °C / pH	Минерализация, г/дм <sup>3</sup> (соленость, ‰)	Cd <sub>вал.</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	Cd <sub>раств.</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	Cd <sub>раств.</sub> , % от Cd <sub>вал.</sub>	Cd <sub>взв.</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Река Миус, ширина русла 25–30 м	Станция 1 Село Покровское, в 30 м от моста, левый берег, в 3,5 м от берега, глубина – 0,5 м	<u>47°24.921'</u> <u>38°53.385'</u>	<u>18</u> 8,16	2,364	<u>0,1–0,16</u> * 0,13 (3)	<u>0,05–0,09</u> 0,07 (3)	<u>50–62,5</u> 54 (3)	<u>0,05–0,07</u> 0,06 (3)
	Станция 2 Село Николаевское, левый берег, в 2,5 м от берега, глубина 0,6 м	<u>38°51.178'</u> <u>38°51.178'</u>	<u>22</u> 8,26	2,200	<u>0,22–0,32</u> 0,27 (3)	<u>0,16–0,24</u> 0,2 (3)	<u>72–75</u> 73,5 (3)	<u>0,06–0,08</u> 0,07 (3)
Миусский лиман, верхний бьеф Миусского водохранилища, выше плотины	Станция 3 Село Золотарево, в 20 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°16.359'</u> <u>38°47.423'</u>	<u>22</u> 8,56	3,43	<u>1,03–1,57</u> 1,3 (3)	<u>0,55–0,87</u> 0,71 (3)	<u>53–55</u> 54 (3)	<u>0,48–0,7</u> 0,59 (3)
	Станция 4 Хутор Калинин, спуск по ул. Набережная, в 20 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°15.627'</u> <u>38°39.002'</u>	<u>25</u> 8,57	3,65	<u>0,27–0,93</u> 0,60(3)	<u>0,14–0,46</u> 0,30 (3)	<u>52–50</u> 51 (3)	<u>0,13–0,47</u> 0,3 (3)
	Станция 5 Хутор Ломакин, в 15 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°11.924'</u> <u>38°30.985'</u>	<u>23</u> 8,67	4,23	<u>0,43–0,80</u> 0,61 (3)	<u>0,23–0,48</u> 0,35 (3)	<u>53–60</u> 56,5 (3)	<u>0,20–0,32</u> 0,26 (3)
Миусский лиман, нижний бьеф Миусского водохранилища, ниже плотины	Станция 6 Село Натальевка, в 25 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°09.555'</u> <u>38°27.929'</u>	<u>22,5</u> 8,33	9,48	<u>0,91–1,91</u> 1,41 (3)	<u>0,52–0,97</u> 0,75 (3)	<u>57–51</u> 54 (3)	<u>0,39–0,94</u> 0,67 (3)
Таганрогский залив	Станция 7 База отдыха Рожок, в 20 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°08.770'</u> <u>38°25.549'</u>	<u>22</u> 8,43	8,66	<u>0,40–0,75</u> 0,58 (3)	<u>0,24–0,46</u> 0,35 (3)	<u>60–61</u> 60,5 (3)	<u>0,16–0,29</u> 0,23 (3)
	Станция 8 В 100 м от станции 7, в 25 м от берега, глубина 0,6 м	<u>47°08.701'</u> <u>38°25.456'</u>	<u>22</u> 8,40	8,66	<u>0,64–0,94</u> 0,79 (3)	<u>0,37–0,49</u> 0,43 (3)	<u>58–52</u> 55 (3)	<u>0,27–0,45</u> 0,36 (3)
Грунтовые воды (техническая вода, солончатая)	Станция 9 Общественный колодец, пос. Грузиновка, ул. Набережная, глубина до поверхности воды 11 м	<u>47°16.171'</u> <u>38°42.756'</u>	<u>8</u> 7,68	2,690	0,08 (1)	0,05 (1)	62,5 (1)	0,03 (1)

Примечание. \* – в столбцах 6–9 в числителе приведены пределы изменения, в знаменателе – средние значения, в скобках – количество измерений.

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

**Заключение**

Выполнены исследования особенностей распределения концентраций валового кадмия, а также содержания его растворенной и взвешенной форм миграции по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив», в пределах которого расположены две барьерные зоны – зона смешения вод р. Миус с водами Миусского лимана и зона смешения вод лимана с водами Таганрогского залива.

В период наблюдений для всего исследуемого континуума растворенная форма миграции кадмия незначительно преобладала над взвешенной формой и составляла от 50 до 75% (в среднем 57%) валового его содержания. При этом абсолютное содержание растворенной формы миграции кадмия не выходило за пределы максимальных значений диапазона его концентраций в пресных поверхностных и морских водах земного шара, а также значений ПДК для соответствующих сред.

Воды р. Миус, на фоне минимальных для исследуемого континуума концентраций всех рассмотренных форм кадмия, характеризуются максимальной долей растворенной формы кадмия (до 75%) по отношению к его валовому содержанию. Это связано с большей защищенностью реки от ветровых волнений и с низкими скоростями течения ее вод, обуславливающих меньшее количество в речных водах взвеси и связанных с ней взвешенных форм кадмия. В первой барьерной зоне – зоне непосредственного смешения речных вод с водами Миусского лимана – существенно увеличиваются валовое содержание кадмия и концентрации его растворенной и взвешенной форм. Далее по продольному профилю лимана наряду с отчетливым снижением исследованных форм кадмия отмечается их незначительные флуктуации. Во второй барьерной зоне – зоне смешения вод лимана с водами Таганрогского залива – концентрации всех форм кадмия снова существенно возрастают. При этом диапазон изменения процентного содержания растворенной формы кадмия по отношению к валовому его содержанию (50–60%, в среднем 54%) в воде всех станций Миусского лимана указывает на примерно равное количество растворенной и взвешенной миграционных форм кадмия. В воде Таганрогского залива наблюдается некоторое снижение всех форм кадмия, в то время как доля его растворенной формы незначительно возрастает (до 58%).

В целом, в воде исследуемого континуума наблюдается положительная корреляция концентраций  $Cd_{\text{вал}}$ ,  $Cd_{\text{раств}}$  и  $Cd_{\text{взв}}$  не только между собой, но и со значениями pH и солености. При этом процентная доля  $Cd_{\text{раств}}$  по отношению к валовому его содержанию находится в противофазе с абсолютной концентрацией рассматриваемых форм миграции кадмия.

Пики максимумов концентраций всех миграционных форм кадмия, приуроченные к указанным транзитным барьерным зонам, были связаны с повышенной ветровой активностью, наблюдавшейся в период исследований, вследствие чего на открытых мелководных пространствах Миусского лимана происходили взмучивание наилка и миграция в воду значительной части ранее осажденного на геохимических барьерах кадмия. В этих условиях, наряду с кадмием, возможно синхронное поступление в воду из поднятых со дна седиментов и других металлов, в частности железа, что подтверждается установлением при проведении настоящих исследований значимых прямых корреляционных связей между всеми рассмотренными формами данных металлов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 19-05-50097 (проведение экспедиции, анализ и обработка проб) и РФФИ №19-05-00770 (выявление связи между содержанием железа и кадмия).*

*The work was funded by the RFBR, projects No. 19-05-50097 (expedition, sample analysis and processing) and No. 19-05-00770 (identification of the relationship between iron and cadmium content).*

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

## Библиографический список

1. Безуглова О.С., Приваленко В.В., Остробородько Н.П. Биогеохимическая характеристика почв побережья Таганрогского залива // Экосистемные исследования Азовского моря и побережья. Т. IV / под ред. Г.Г. Матишова, Ю.А. Жданова, Н.В. Лебедева, Ю.А. Федорова и др. Апатиты: Изд.-во КНЦ РАН, 2002. С. 12–28.
2. Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхенбергер Э. и др. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов: пер. с англ. / под ред. Х. Зигель, А. Зигель. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Бузмаков С.А., Дзюба Е.А. Определение фонового содержания циклических элементов в почвах Тулымского камня (Пермский край) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. Ростов н/Д., 2016. № 3. С. 49–57.
4. Доценко И.В., Михайленко А.В., Федоров Ю.А., Солодко Д.Ф. Пространственно-временные закономерности распределения тяжелых металлов в воде Таганрогского залива // Материалы междунар. конф. «Проблемы антропогенной трансформации природной среды» / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: Изд.-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2019. С. 56–58.
5. Клёнкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко И.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: Изд.-во Азовского научно-исследовательского института рыбного хозяйства, 2007. 324 с.
6. Линник П.Н. Формы нахождения тяжелых металлов в природных водах – составная часть эколого-токсикологической характеристики водных экосистем // Водные ресурсы. 1987. № 5. С. 84–96.
7. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. СПб.: Гидрометеоздат, 1986. 270 с.
8. Михайленко А.В., Федоров Ю.А., Доценко И.В. Тяжелые металлы в компонентах ландшафтов Азовского моря. Ростов н/Д; Таганрог: Изд.-во Южного федерального университета, 2018. 214 с.
9. Мур Дж.В., Раммурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 286 с.
10. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приложение к приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552 (с изменениями на 10.03.2020 г.).
11. Орадовский С.Г., Зубакина А.Н., Кузнецова И.М. Изучение форм существования загрязняющих веществ в морской среде (на примере Таганрогского залива Азовского моря) // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 69–78.
12. Прилепа М.В. Формы нахождения кадмия в объектах окружающей среды: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2007. 24 с.
13. РД 52.24.377-2008. Массовая концентрация алюминия, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, серебра, хрома и цинка в водах // Методика выполнения измерений методом атомной абсорбции с прямой электротермической атомизацией проб. Ростов-н/Д.: Изд.-во Гидрохимического института, 2008. 34 с.
14. Роева Н.Н., Ровинский Ф.Я., Кононов Э.Я. Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах // Журнал аналитической химии. 1996. Т. 51. № 4. С. 384–397.
15. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 1 / под ред. Л. В. Боевой. Ростов-н/Д: НОК, 2009. 1037 с.
16. Технический регламент Евразийского экономического союза 037/2016. «Об ограничении применения опасных веществ в изделиях электротехники и радиоэлектроники». Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 18 октября 2016 года N 113. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420387089> (дата обращения: 21.05.2021).
17. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Доценко И.В., Чепурная В.И., Трубник Р.Г. Геохимия железа в системе река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив Азовского моря // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 5(59). С. 172–181.
18. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В. Поведение тяжелых металлов в воде Азовского моря во время ветровой активности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки. 2015. № 3. С. 108–112.
19. Федоров Ю.А., Сапожников В.В., Агатова А.И., Аржанова Н.В., Белов А.А., Кузнецов А.Н., Лапина Н.М., Логинов Е.Б., Предеина Л.М., Семочкина Т.Б., Торгунова Н.И. Комплексные экосистемные исследования в Российской части Азовского моря (18–25 июля 2006 г.) // Океанология. 2007. Т. 47, № 2. С. 316–319.
20. Щербов Д.П., Матвеев М.А. Аналитическая химия кадмия. М.: Наука, 1973. 254 с.
21. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council URL: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:EN:PDF>: (дата обращения: 21.05.2021).

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

22. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Knyazeva T.V. and Tambieva N.S. Field Simulation of Cadmium Pollution of a Freshwater Body // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. № 5. P. 514–525.
23. Goldberg E. Minor Elements in Sea water // In *Chemical Oceanography* / Eds. Riley J.P., Skirrow G. – London, Academic Press, 1965. Chap. 5. P. 163–196.
24. Luoma S.N. Bioavailability of trace metals to aquatic organisms – areview // *Science of the Total Environment*. 1983. Vol. 28. N 1. P. 1–22.
25. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Mandzhieva S.S. and Chaplygin V.A. Heavy metals in Soils and Plants of the Don River Estuary and the Taganrog Bay // *Pochvovedenie*. 2017. No. 9. pp. 1074–1089.
26. Nriagu J.O. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere // *Nature*. 1979. Vol. 279. P. 409–411.
27. Ros J.P.M. and Slooff W. Integrated criteria document. Cadmium. Bilthoven, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Report No. 758476004. 1987.
28. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2007. 195 p.
29. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2020. 200 p.
30. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2000. 198 p.
31. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2002. 197 p.
32. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2014. 196 p.
33. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017. 202 p.
34. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. – 4<sup>th</sup> dition. Geneva: 2011. 564 p.

## References

1. Bezuglova, O.S., Privalenko, V.V., Ostroborod'ko, N.P. (2002), *Biogeoхимическая характеристика почв побережья Таганрогского залива в кн. Экосистемные исследования Азовского моря и побережья* [Biogeochemical characteristic of coastal soils of the Taganrog Bay, in *Ecosystem Studies of the Azov Sea and Its Coastal Zone*], vol. 4, in Matishov G. G., Zhdanov Yu.A., Lebedev N.V., Fedorov Yu.A. and others (ed.), Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, pp. 12–28.
2. Bingham, F.T., Kosta, M., Ejhengerger, E. and others (1993), *Nekotorye voprosy toksichnosti ionov metallov* [Some Issues of Toxicity of Metal Ions], Translated by Davydova S.L., in H. Zigel', A. Zigel' (ed.), Mir, 368 p.
3. Buzmakov, S.A., Dzyuba, E.A. (2016), “Opredelenie fonovogo sodержaniya ciklicheskih elementov v pochvah Tulumskogo kamnya (Permskij kraj)” [Determination of the background content of cyclic elements in the soils of the Tulum stone (Perm region)], *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij, Severo-Kavkazskij region, Seriya: Estestvennye nauki*, no. 3, pp. 49–57.
4. Dotsenko, I.V., Mikhailenko, A.V., Fedorov, Yu.A., Solodko, D.F. (2019), “Spatio-temporal regularities of heavy metals distribution in the water of Taganrog Bay”, *Problemy antropogennoj transformacii prirodnoj sredy* [Proceedings of the 4th International “Conference Problems of anthropogenic transformation of the natural environment“], in Buzmakov S.A. (ed.), Perm State National Research University, Perm, pp. 56–58.
5. Klyonkin, A.A., Korpakova, I.G., Pavlenko, I.F., Temerdashev Z.A. (2007), *Ekosistema Azovskogo моря: antropogennoe zagryaznenie* [Ecosystem of the Sea of Azov: anthropogenic pollution], Azov sea research fisheries institute, Krasnodar, 324 p.
6. Linnik, P.N. (1987), “Formy nahozhdeniya tyazhelyh metallov v prirodnyh vodah – sostavnaya chast' ekologo-toksikologicheskoy karakteristiki vodnyh ekosistem” [Forms of finding heavy metals in natural waters – an integral part of the ecological and toxicological characteristics of aquatic ecosystems], *Vodnye resursy*, no. 5, pp.84–96.
7. Linnik, P.N., Nabivanec, B.I. (1986), *Formy migracii metallov v presnyh poverhnostnyh vodah* [Forms of metal migration in fresh surface waters], Gidrometeoizdat, Leningrad, 270 p.
8. Mikhailenko, A.V., Fedorov, Yu.A., Dotsenko, I.V. (2018), *Tyazhelye metally v komponentah landshaftov Azovskogo моря* [Heavy metals in the components of the Azov Sea landscapes], Southern Federal University, Rostov-on-do, Taganrog, 214 p.
9. Moore, J.W., Ramamoorthy, S. (1987), *Tyazhelye metally v prirodnyh vodah. Kontrol' i oценка vliyaniya* [Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment], Mir, Moscow, 286 p.
10. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, (2016), № 552 *Normativy kachestva vody vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativy predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya. Prilozhenie k prikazu Minsel'hoza Rossii ot 13.12.2016 g. (s izmeneniyami na 10.03.2020 g.)* [Water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies. Appendix to the order of the Ministry of Agriculture of Russian Federation dated 13.12.2016 No. 552 (as amended on 10.03.2020).], Ministry of Agriculture of Russian Federation, Moscow, Russia.
11. Oradovskij, S.G., Zubakina, A.N., Kuznecova, I.M. (1994), “Izuchenie form sushchestvovaniya zagryaznyayushchih veshchestv v morskoy srede (na primere Taganroгskogo zaliva Azovskogo моря)” [Study of the

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

forms of existence of pollutants in the marine environment (on the example of the Taganrog Bay of the Azov Sea)], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 69–78.

12. Prilepa, M.V. (2007), “Forms of finding cadmium in environmental objects“, Abstract of Ph.D. dissertation, chemical sciences, Moscow, 24 p.

13. Hydrochemical Institute, (2008), 52.24.377-2008 *Massovaya koncentraciya alyuminiya, berilliya, vanadiya, zheleza, kadmiya, kobal'ta, marganca, medi, molibdena, nikelya, svinca, serebra, hroma i cinka v vodah. Metodika vypolneniya izmerenij metodom atomnoj absorbcii s pryamoj elektrotermicheskoj atomizaciej prob* [52.24.377-2008 Mass concentration of aluminum, beryllium, vanadium, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, molybdenum, nickel, lead, silver, chromium and zinc in waters. A technique for performing measurements by atomic absorption with direct electrothermal atomization of samples], Rostov-on-Don, Russia, 34 p.

14. Roeva, N.N., Rovinskij, F.Ya., Kononov, E.Ya. (1996), “Specific features of the behavior of heavy metals in various natural environments“, *Zhurnal analiticheskoy himii*, vol. 51, no. 4, pp. 384–397.

15. *Rukovodstvo po himicheskomu analizu poverhnostnyh vod sushi. Chast' 1* [Guidelines for the Chemical Analysis of Land Surface Waters. Part 1], (2009), in L. V. Boeva (ed.), NOK, Rostov-on-Don, Russia, 1037 p.

16. Eurasian Economic Union, (2016), *Tekhnicheskij reglament Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza 037/2016. «Ob ogranichenii primeneniya opasnyh veshchestv v izdeliyah elektrotekhniki i radioelektroniki»*. *Reshenie Soveta Evrazijskoj ekonomicheskoy komissii ot 18 oktyabrya 2016 goda N 113* [ Technical Regulations of the Eurasian Economic Union 037/2016. "On the limitation of the use of hazardous substances in electrical and radio electronics products." Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission of October 18, 2016 N 113.]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420387089> (accessed 21 May 2021).

17. Fedorov, Yu.A., Garkusha, D.N., Dmitrik, L.Yu., Dotsenko, I.V., Chepurnaya, V.I., Trubnik, R.G. (2020), “Iron geochemistry in the Mius river – Mius estuary – Taganrog Bay of the Azov Sea system“, *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, no. 5(59), pp. 172–181.

18. Fedorov, Yu.A., Dotsenko, I.V., Mikhailenko, A.V. (2015), “The behaviour of heavy metals in water of the Azov Sea during a wind-driven activity“, *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region, Seriya Estestvennye nauki*, no. 3, pp. 108–112.

19. Fedorov, Yu.A., Sapozhnikov, V.V., Agatova, A.I., Arzhanova, N.V., Belov, A.A., Kuznetsov, A.N., Lapina, N.M., Loginov, E.B., Predeina, L. M., Semochkina, T.B., Torgunova, N.I. (2007), “Multidisciplinary ecosystem studies in the Russian part of the Sea of Azov (july 18-25, 2006)“, *Oceanology*, vol. 47, no. 2, pp. 316–319.

20. Shcherbov, D.P., Matveets, M.A. (1973), *Analiticheskaya himiya kadmiya* [Analytical chemistry of cadmium], Nauka, Moscow, Russia, 254 p.

21. “Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council“. Available at: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:EN:PDF> (accessed 21 May 2021).

22. Gar'kusha, D.N., Fedorov, Yu.A., Knyazeva, T.V., Tambieva N.S. (2018), “Field Simulation of Cadmium Pollution of a Freshwater Body“, *Water Resources*, vol. 45, no. 5, pp. 514–525.

23. Goldberg, E. (1965), “Minor Elements in Sea water“, *In Chemical Oceanography*, eds. Riley J.P., Skirrow G. London, Academic Press, chap. 5, pp. 163–196.

24. Luoma, S.N. (1983), “Bioavailability of trace metals to aquatic organisms – arewiev“, *Science of the Total Environment*, vol. 28, no. 1. pp. 1–22.

25. Minkina, T.M., Fedorov, Yu.A., Nevidomskaya, D.G., Pol'shina, T.N., Mandzhieva, S.S., Chaplygin, V.A. (2017), “Heavy metals in Soils and Plants of the Don River Estuary and the Taganrog Bay“, *Pochvovedenie*, No/ 9, pp. 1074-1089.

26. Nriagu, J.O. (1979), “Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere“, *Nature*, vol. 279, pp. 409–411.

27. Ros, J.P.M., Slooff, W. (1987), Integrated criteria document. Cadmium. Bilthoven, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Report No. 758476004.

28. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2007, 195 p.

29. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2020, 200 p.

30. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2000, 198 p.

31. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2002, 197 p.

32. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2014, 196 p.

33. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017, 202 p.

34. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, 4<sup>th</sup> dition, Geneva, 2011, 564 p.

Поступила в редакцию: 11.06.21

## Гидрология

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф.

## Сведения об авторах

## About the authors

**Юрий Александрович Федоров**

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет;  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40

e-mail: fedorov@sfedu.ru

**Дмитрий Николаевич Гарькуша**

кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет;  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40

e-mail: gardim@sfedu.ru

**Виктория Игоревна Чепурная**

аспирант кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет;  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40

e-mail: vchepurnaya@sfedu.ru

**Ирина Владимировна Доценко**

кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет;  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40

e-mail: dotsenko@sfedu.ru

**Дарья Федоровна Костенко**

аспирант кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет;  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40

e-mail: solodko@sfedu.ru

**Yury A. Fedorov**

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

40, Zorge st., Rostov-on-Don, 344090, Russia

**Dmitry N. Gar'kusha**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

40, Zorge st., Rostov-on-Don, 344090, Russia

**Victoria I. Chepurnaya**

Postgraduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

40, Zorge st., Rostov-on-Don, 344090, Russia

**Irina V. Dotsenko**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

40, Zorge st., Rostov-on-Don, 344090, Russia

**Daria F. Kostenko**

Postgraduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

40, Zorge st., Rostov-on-Don, 344090, Russia

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф. Кадмий в воде по континууму «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив Азовского моря» // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. №3(58). С. 115–129. doi: 10.17072/2079-7877-2021-3-115-129.

**Please cite this article in English as:**

Fedorov, Yu.A., Gar'kusha, D.N., Chepurnaya, V.I., Dotsenko, I.V., Kostenko, D.F. (2021). Cadmium in water along the continuum 'the Mius estuary – the Taganrog Bay of the Azov. *Geographical bulletin*. No. 3(58). Pp. 115–129. doi: 10.17072/2079-7877-2021-3-115-129.