

О. С. РЕШЕТНЯК^{*,**}, В. А. БРЫЗГАЛО^{*}, Л. С. КОСМЕНКО^{*}

^{*} Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, пр. Стачки 198, Ростов-на-Дону, 344090, Россия, olgare1@mail.ru, lkosmenko@gidrohimi.com, lkosmenko@gidrohimi.com

^{**} Институт наук о Земле ЮФУ, ул. Зорге 40, Ростов-на-Дону, 344090, Россия

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЯ И СВИНЦА В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ

Представлены результаты обобщения многолетней (1990–2012 гг.) режимной гидрохимической информации о содержании соединений кадмия и свинца в речных экосистемах разных природных зон и высотных поясов России. В работе использована информация о химическом составе воды в 91 пункте наблюдений на 75 реках. Многолетняя изменчивость содержания металлов рассмотрена по диапазонам колебаний концентрации за многолетний период, медианным значениям концентрации и частоте превышения ПДК. Показано, что в различных природных зонах и высотных поясах содержание соединений кадмия достаточно равномерно и колеблется от значений ниже предела обнаружения до 39–45 мкг/дм³ в большинстве изученных речных экосистем. Содержание соединений свинца в воде рек изменяется в широких пределах от нулевых значений до 44 мкг/дм³ (за исключением anomalously высоких концентраций в отдельных речных экосистемах). При этом наибольшие значения отмечаются в реках зоны тайги. Проведена оценка уровня загрязнения речных вод соединениями свинца и кадмия. Наибольшее число случаев высокого и экстремально высокого загрязнения воды зафиксировано по соединениям свинца. Доля речных экосистем, в которых наблюдались случаи высокого и экстремально высокого уровня загрязнения воды соединениями свинца, составила 21,2 и 46,9 % соответственно. Выявлено, что присутствие соединений кадмия и свинца в водных экосистемах не только ухудшает качество воды и состояние водных экосистем, но и нарушает функционирование гидробионтов. Поэтому результаты оценки многолетней изменчивости содержания в водной среде наиболее опасных тяжелых металлов — свинца и кадмия — могут быть использованы при разработке мероприятий по улучшению качества воды и восстановлению состояния речных экосистем.

Ключевые слова: кратность превышения ПДК, частота превышения ПДК, высокий уровень загрязнения, приоритетные загрязняющие вещества, тяжелые металлы, соединения кадмия и свинца.

O. S. RESHETNYAK^{*,**}, V. A. BRYZGALO^{*}, L. S. KOSMENKO^{*}

^{*} Hydrochemical Institute of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, pr. Stachki 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, olgare1@mail.ru, lkosmenko@gidrohimi.com, lkosmenko@gidrohimi.com

^{**} Institute of Earth Sciences SFedU, ul. Zorge, 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia

LONG-TERM VARIABILITY IN CONTENT OF CADMIUM AND LEAD COMPOUNDS IN RIVER ECOSYSTEMS OF RUSSIA

Presented are the results from summarizing many years (1990–2012) routine hydrochemical data on content of cadmium and lead compounds in river ecosystems of different natural zones and altitudinal belts of Russia. This study used data on chemical composition of water from 91 observation posts on 75 rivers. Long-term variability in content levels of metals is considered with respect to the ranges of variation in concentration of a long-term period, median values of concentration and the MAC exceedance frequency. It is shown that in different natural zones and altitudinal belts, the content level of cadmium compounds is relatively uniform and varies from values below the detection limit to 39–45 µg/dm³ in most of the river ecosystems used in this study. The content of lead compounds in the river water varies over a broad range, from zero values to 44 µg/dm³ (except for anomalously high concentrations in separate river ecosystems). And the highest values are observed in the rivers of the taiga zone. An assessment is made of the pollution level of the river waters by lead and cadmium compounds. The largest number of cases of high and extremely high water pollution was recorded for lead compounds. The proportion of the river ecosystems with a high and extremely high level of water pollution by cadmium and lead compounds constituted 21.2 and 46.9 %, respectively. It was found that not only does the presence of cadmium and lead compounds in aquatic ecosystem deteriorate the water quality and the state of aquatic ecosystems, but it also disturbs the functioning of hydrobionts. Therefore, results from assessing long-term variability in contents of the most dangerous heavy metals, lead and cadmium, in the water environment can be used in developing measures for water quality improvement and for recovery of the status of river ecosystems.

Keywords: MAC exceedance ratio, MAC exceedance frequency, high pollution level, priority pollutants, heavy metals, cadmium and lead compounds.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием промышленности в окружающую среду стало поступать очень большое количество загрязняющих веществ, что сделало практически невозможным контроль за содержанием каждого из них в природных экосистемах. Поэтому выделяют так называемые приоритетные загрязняющие вещества, которые производятся в крупных масштабах (более 1000 кг/год), обладают высоким токсичным воздействием и представляют особую опасность для различных экосистем [1, 2].

Согласно Международной программе по химической безопасности, в перечень наиболее важных (приоритетных) веществ, загрязняющих биосферу, вошли соединения тяжелых металлов, пестициды, полициклические ароматические углеводороды, хлорорганические соединения, нефтепродукты, фенолы, детергенты и нитраты. Из этого перечня наиболее опасны для экосистем тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды и хлорорганические соединения [2].

Среди перечисленных особо опасных химических веществ важное место занимают тяжелые металлы по следующим причинам [1–5]: соединения тяжелых металлов относятся к классу неспецифических веществ, т. е. присутствующих в определенных количествах практически во всех средах в незагрязненных (фоновых) природных экосистемах; в отличие от органических загрязняющих веществ, подвергающихся процессам разложения, металлы способны лишь к перераспределению между отдельными компонентами экосистемы; металлы сравнительно легко накапливаются в почвах, но трудно и очень медленно из нее выводятся, интенсивно аккумулируются органами и тканями человека, живыми организмами и гидробионтами; поступающие в экосистему соединения тяжелых металлов сравнительно быстро включаются в разнообразные внутрисистемные биохимические процессы; тяжелые металлы высокотоксичны для различных биологических объектов.

При этом важно отметить, что тяжелые металлы обладают высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях, а также способностью к биоаккумуляции и биомагнификации. Практически все металлы (за исключением свинца, ртути, кадмия и висмута, биологическая роль которых на настоящий момент не совсем ясна [1, 5]), активно участвуют в биологических процессах, входят в состав многих ферментов.

Тяжелые металлы, поступающие в окружающую среду из антропогенных источников, оказывают негативное влияние на водные экосистемы. Это находит отражение в увеличении содержания металлов в водной среде, донных отложениях и биоте, приводит к снижению продуктивности водных экосистем и потенциальной опасности и риску для здоровья человека [6]. Данные обстоятельства и обуславливают актуальность исследований, направленных на изучение содержания в природных водах особо опасных тяжелых металлов.

Работ, посвященных изучению распределения, трансформации и накопления тяжелых металлов в природных водах, достаточно много, но в большинстве из них рассматриваются озера. Гораздо меньше публикаций по содержанию, распределению тяжелых металлов в речных водах. Особое внимание уделяется опасным тяжелым металлам — свинцу и кадмию. В ряде работ рассмотрены содержание и миграция опасных тяжелых металлов в реках Дальнего Востока [7–9], накопление и распределение экотоксикантов в природных водах как отдельных рек [10, 11], так и крупных водосборных бассейнов [12–14].

Содержание кадмия в водных экосистемах может превышать нормативы как в незагрязненных водных объектах (например, в горных водах Дагестана) [11], так и в местах повышенной антропогенной нагрузки [14, 15]. В зонах загрязнения водной среды формируются обогащенные кадмием техногенные илы. Металл интенсивно аккумулируется в иловых водах за счет высокой миграционной способности, что представляет собой источник вторичного загрязнения экосистемы [15].

Загрязнение природных вод свинцом может быть связано с проблемами урбанизации территорий. Так, в [16] отмечается, что высокое содержание свинца в речных водах ($45\text{--}90\text{ мкг/дм}^3$) носит эпизодический характер и наблюдается в створах тех рек, где происходит сброс свинецсодержащих сточных вод промышленными предприятиями (например, в городах Набережные Челны, Тольятти, Самара, Сызрань и других населенных пунктах на р. Волге). Повышенные концентрации свинца в воде регистрируются в бассейнах рек Амур ($10\text{--}90\text{ мкг/дм}^3$), Тобол и Ишим ($30\text{--}40\text{ мкг/дм}^3$). В бассейнах таких крупных рек, как Дон, Северная Двина, Нева, Енисей, Обь, Иртыш, фиксируется умеренный уровень загрязнения соединениями свинца.

Следует отметить, что упомянутые работы основаны на разовых или экспедиционных исследованиях рек. Крупных обобщающих исследований, затрагивающих региональные особенности распределения опасных тяжелых металлов в речных водах различных регионов, практически не проводилось.

Восполнить данный пробел позволяет настоящее обобщение многолетней режимной информации о содержании соединений кадмия и свинца в речных экосистемах разных природных зон и высотных поясов России. Рассмотрена многолетняя изменчивость содержания в водной среде наиболее опасных тяжелых металлов, присутствие которых в экосистемах не только снижает качество воды, но и ухудшает состояние водных экосистем, а также нарушает функционирование гидробионтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки изменчивости содержания в водной среде речных экосистем опасных загрязняющих веществ — соединений кадмия и свинца — использована многолетняя (1990–2012 гг.) гидрохимическая информация государственной системы наблюдений Росгидромета.

Объекты исследования — речные экосистемы различных природных зон и высотных поясов России, воды которых имеют весьма сложный многокомпонентный химический состав, изменяющийся во времени и пространстве. Для изучения содержания и распределения опасных загрязняющих веществ в поверхностных водах суши среди водных объектов, входящих в сеть наблюдений Росгидромета, выбраны речные экосистемы (участки рек), функционирующие в различных природно-климатических условиях. В список исследуемых водных объектов вошли наиболее загрязненные экосистемы, в водной среде которых ожидается присутствие соединений тяжелых металлов. Отнесение пунктов наблюдений на реках к определенным природным зонам и высотным поясам проведено на основе карты физико-географического районирования Геопортала Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова [17].

Таким образом, в работе использована информация о химическом составе воды в 91 пункте наблюдений на 75 реках, в том числе в 7 пунктах наблюдений на 7 реках в зонах тундры и лесотундры, 27 пунктах наблюдений на 25 реках в зоне тайги, 17 пунктах наблюдений на 12 реках в зоне смешанных и широколиственных лесов, 15 пунктах наблюдений на 14 реках в зоне лесостепей и 8 пунктах наблюдений на 5 реках в зонах степей, полупустынь и пустынь, а также 17 пунктах наблюдений на 15 реках, расположенных в различных высотных поясах России.

Вклад отдельных загрязняющих веществ в общую загрязненность воды водных объектов в реальных условиях может определяться либо высокими концентрациями, наблюдаемыми в течение короткого промежутка времени, либо низкими концентрациями в течение длительного периода, либо другими возможными комбинациями рассматриваемых факторов оценки. Поэтому качество воды водных объектов — это функция не только отдельных показателей химического состава воды, но и продолжительности и меры воздействия каждого из них на экосистему.

Уровень загрязнения речных вод опасными тяжелыми металлами оценивали по кратности превышения ПДК и критериям высокого (ВЗ) и экстремально высокого (ЭВЗ) уровней загрязнения воды [18]. Для веществ 1-го и 2-го классов опасности уровень ВЗ соответствует кратности ПДК в интервале 3–5, ЭВЗ — 5 ПДК и более. Для соединений кадмия (Cd^{2+}) уровни ВЗ и ЭВЗ воды соответствуют концентрациям 3–5 и ≥ 5 мкг/дм³, для соединений свинца (Pb^{2+}) — 18–30 и ≥ 30 мкг/дм³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрено содержание опасных тяжелых металлов в водной среде рек различных природных зон и высотных поясов России (см. таблицу). Многолетняя (1990–2012 гг.) изменчивость содержания в речных водах соединений кадмия и свинца показана по таким характеристикам, как диапазон колебания концентрации (минимальное и максимальное значение), медианное значение концентрации и частота превышения ПДК за исследуемый многолетний период.

Изменчивость содержания в речных экосистемах соединений кадмия. В различных природных зонах и высотных поясах пределы изменчивости концентраций соединений кадмия достаточно равномерны и колеблются от значений ниже предела обнаружения ($< 0,05$ мкг/дм³) до 39–45 мкг/дм³ в большинстве изученных речных экосистем. Лишь на отдельных участках рек максимальные величины аномально высокие и достигают 734,5 мкг/дм³ (р. Ньюдай), 400 мкг/дм³ (р. Малиновка) и 172,5 мкг/дм³ (р. Арсеньевка) (см. таблицу).

Медианы большинства рядов наблюдений также ниже предела обнаружения соединений кадмия или не превышают предельно допустимого значения. Только для рек зон тундры, лесотундры (Щучья, Норилка, Амбарная) и зоны тайги (Ньюдай, Оредеж, Иртыш) зафиксировано превышение ПДК по медианным концентрациям соединений кадмия в 2,2–3,3 и 1,1–1,7 раз соответственно.

**Содержание соединений кадмия и свинца в речных водах различных природных зон
и высотных поясов (1990–2012 гг.)**

Река – пункт наблюдений	Соединения					
	кадмия			свинца		
	N	Концентрация, мкг/дм ³	К _{пдк} , %	N	Концентрация, мкг/дм ³	К _{пдк} , %
1	2	3	4	5	6	7
<i>Зона тундры и лесотундры</i>						
Печенга – пос. Корзуново	24	$\frac{< 0,05 * -6,00}{0,35}$	12,5	47	$\frac{< 1,0 * -16,8}{< 1,0}$	2,1
Щучья – г. Норильск	37	$\frac{< 0,05 - 15,2}{3,30}$	32,4	10	$\frac{\text{все } < 1,0}{< 1,0}$	0
Амбарная – устье	53	$\frac{< 0,05 - 17,7}{3,90}$	37,7	12	$\frac{< 1,0 - 135,6}{< 1,0}$	8,3
Норилка – устье	56	$\frac{< 0,05 - 16,2}{2,25}$	19,6	11	$\frac{\text{все } < 1,0}{< 1,0}$	0
Пур – пос. Самбург	35	$\frac{< 0,05 - 1,10}{0,06}$	0	14	$\frac{< 1,0 - 78,0}{< 1,0}$	21,4
Таз – пгт Тазовский	7	$\frac{< 0,05 - 1,10}{< 0,05}$	14,3	16	$\frac{< 1,0 - 6,18}{< 1,0}$	6,3
Обь – г. Салехард	59	$\frac{< 0,05 - 7,62}{< 0,05}$	0	40	$\frac{< 1,0 - 4,48}{< 1,0}$	0
<i>Зона тайги</i>						
Роста – г. Мурманск	36	$\frac{< 0,05 - 8,70}{0,36}$	11,1	144	$\frac{< 1,0 - 130,8}{3,85}$	41,7
Нюдауй – г. Мончегорск	67	$\frac{< 0,05 - 734,5}{1,20}$	23,9	145	$\frac{< 1,0 - 241,5}{4,0}$	46,9
Белая – г. Апатиты	49	$\frac{< 0,05 - 11,4}{0,20}$	8,2	116	$\frac{< 1,0 - 18,6}{< 1,0}$	14,7
Нева – г. Санкт-Петербург	86	$\frac{< 0,05 - 4,60}{< 0,05}$	0	86	$\frac{< 1,0 - 30,0}{< 1,0}$	27,9
Ижора – г. Санкт-Петербург	84	$\frac{< 0,05 - 4,20}{< 0,05}$	0	84	$\frac{< 1,0 - 48,0}{7,40}$	59,5
Обь – с. Александровское	92	$\frac{< 0,05 - 3,40}{< 0,05}$	0	132	$\frac{< 1,0 - 18,0}{< 1,0}$	5,3
Таргас – с. Северное	81	$\frac{< 0,05 - 39,0}{< 0,05}$	1,2	121	$\frac{< 1,0 - 54,0}{< 1,0}$	12,4
Тара – с. Кыштовка	64	$\frac{< 0,05 - 9,27}{< 0,05}$	1,6	76	$\frac{< 1,0 - 24,0}{< 1,0}$	11,8
Иня – с. Кумень	149	$\frac{< 0,05 - 9,78}{< 0,05}$	1,3	156	$\frac{< 1,0 - 134,0}{< 1,0}$	13,5
Кия – г. Мариинск	171	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	171	$\frac{< 1,0 - 68,0}{< 1,0}$	4,1
Томь – г. Томск	92	$\frac{< 0,05 - 12,0}{< 0,05}$	4,3	131	$\frac{< 1,0 - 60,0}{< 1,0}$	9,9
Колыма – пос. Усть-Среднекан		–		236	$\frac{< 1,0 - 310,0}{16,0}$	87,3
Северная Двина – г. Великий Устюг	78	$\frac{0,02 - 0,32}{0,12}$	0	105	$\frac{< 1,0 - 45,6}{3,60}$	29,5
Сухона – г. Сокол	79	$\frac{0,03 - 4,17}{0,18}$	0	109	$\frac{< 1,0 - 52,2}{5,40}$	46,8
Оредеж – дер. Моровино	8	$\frac{1,0 - 2,6}{1,70}$	0	8	$\frac{8,0 - 86,0}{18,0}$	8,0

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЯ И СВИНЦА

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
Охта – г. Санкт-Петербург	46	$\frac{< 0,05 - 2,6}{< 0,05}$	0	12	$\frac{< 1,0 - 13,8}{2,60}$	25,0
Надым – г. Надым	43	$\frac{< 0,05 - 3,56}{< 0,05}$	0	15	$\frac{< 1,0 - 3,24}{< 1,0}$	0
Чулым – г. Назарово	271	$\frac{< 0,05 - 12,7}{1,20}$	1,5	12	$\frac{\text{все } < 1,0}{< 1,0}$	0
Чулым – г. Ачинск	249	$\frac{< 0,05 - 9,8}{1,10}$	1,6	13	$\frac{< 1,0 - 26,2}{< 1,0}$	7,7
Иртыш – г. Тара	12	$\frac{< 0,05 - 3,64}{< 0,05}$	0	41	$\frac{< 1,0 - 29,6}{< 1,0}$	17,1
Иртыш – с. Усть-Ишим	9	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	27	$\frac{< 1,0 - 32,5}{< 1,0}$	11,1
Иртыш – г. Тобольск	11	$\frac{< 0,05 - 12,3}{5,28}$	54,5	40	$\frac{< 1,0 - 215,2}{< 1,0}$	12,5
Тобол – г. Тобольск	11	$\frac{< 0,05 - 5,34}{< 0,05}$	9,1	41	$\frac{< 1,0 - 81,8}{< 1,0}$	12,2
Пышма – с. Богандинское	12	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	39	$\frac{< 1,0 - 39,0}{< 1,0}$	2,6
Тавд – р. п. Нижняя Тавда	9	$\frac{< 0,05 - 2,06}{< 0,05}$	0	35	$\frac{< 1,0 - 83,2}{< 1,0}$	8,6
Вагай – с. Вагай	12	$\frac{< 0,05 - 30,2}{< 0,05}$	8,3	40	$\frac{< 1,0 - 32,5}{< 1,0}$	2,5
Тура – г. Тюмень	12	$\frac{< 0,05 - 1,7}{< 0,05}$	0	45	$\frac{< 1,0 - 59,2}{< 1,0}$	11,1
<i>Зона смешанных и широколиственных лесов</i>						
Ока – г. Павлово	48	$\frac{< 0,05 - 0,90}{0,30}$	0	48	$\frac{4,20 - 30,0}{12,0}$	89,6
Ока – г. Дзержинск	46	$\frac{< 0,05 - 0,69}{0,30}$	0	48	$\frac{3,60 - 36,0}{10,3}$	85,4
Нара – г. Серпухов		–		120	$\frac{< 1,0 - 22,0}{4,00}$	17,5
Москва – г. Звенигород		–		142	$\frac{< 1,0 - 11,0}{4,00}$	2,8
Москва – г. Москва		–		339	$\frac{< 1,0 - 42,0}{4,00}$	44,5
Москва – д. Нижнее Мячково		–		149	$\frac{< 1,0 - 28,0}{4,00}$	27,5
Москва – г. Воскресенск		–		150	$\frac{< 1,0 - 32,0}{4,00}$	31,3
Москва – г. Коломна		–		145	$\frac{< 1,0 - 28,0}{4,00}$	31,7
Истра – дер. Павловская Слобода		–		125	$\frac{< 1,0 - 24,0}{4,00}$	7,2
Пахра – дер. Нижнее Мячково		–		126	$\frac{< 1,0 - 30,0}{4,00}$	37,3
Нерская – г. Куровское		–		121	$\frac{< 1,0 - 16,0}{4,00}$	28,9
Клязьма – г. Шелково		–		126	$\frac{< 1,0 - 26,0}{4,00}$	43,2
Воря – г. Красноармейск		–		120	$\frac{< 1,0 - 30,0}{4,00}$	13,3

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
Арсеньевка – г. Арсеньев	214	$\frac{< 0,05 - 172,5}{< 0,05}$	12,6	221	$\frac{< 1,0 - 60,0}{< 1,0}$	3,2
Раздольная – г. Уссурийск	84	$\frac{< 0,05 - 5,0}{< 0,05}$	1,2	269	$\frac{< 1,0 - 21,6}{< 1,0}$	0,4
Илистая – с. Халкидон	106	$\frac{< 0,05 - 9,0}{< 0,05}$	2,8	117	$\frac{< 1,0 - 16,4}{< 1,0}$	2,6
Малиновка – с. Ракитное	60	$\frac{< 0,05 - 400,0}{< 0,05}$	1,7	192	$\frac{< 1,0 - 29,9}{< 1,0}$	1,6
<i>Зона лесостепей</i>						
Сок – с. Красный Яр	97	$\frac{< 0,05 - 16,4}{< 0,05}$	6,2	123	$\frac{< 1,0 - 64,0}{< 1,0}$	13,8
Самара – г. Самара	228	$\frac{< 0,05 - 28,5}{< 0,05}$	14,5	286	$\frac{< 1,0 - 38,4}{0,60}$	21,3
Большой Кинель – пгт Тимашево	95	$\frac{< 0,05 - 7,80}{< 0,05}$	10,5	121	$\frac{< 1,0 - 25,2}{< 1,0}$	19,8
Обь – г. Барнаул	100	$\frac{< 0,05 - 12,0}{< 0,05}$	1,0	162	$\frac{< 1,0 - 30,0}{< 1,0}$	8,6
Обь – г. Новосибирск	122	$\frac{< 0,05 - 45,0}{< 0,05}$	10,7	155	$\frac{< 1,0 - 20,0}{< 1,0}$	27,1
Барнаулка – г. Барнаул	95	$\frac{< 0,05 - 12,0}{< 0,05}$	4,2	144	$\frac{< 1,0 - 54,0}{< 1,0}$	9,0
Омь – г. Куйбышев	105	$\frac{< 0,05 - 6,00}{< 0,05}$	1,0	157	$\frac{< 1,0 - 52,0}{< 1,0}$	9,6
Чумыш – г. Заринск	88	$\frac{< 0,05 - 4,86}{< 0,05}$	0	124	$\frac{< 1,0 - 21,0}{< 1,0}$	8,9
Каргат – с. Здвинск	75	$\frac{< 0,05 - 12,0}{< 0,05}$	2,7	33	$\frac{\text{все } < 1,0}{< 1,0}$	0
Свияга – г. Ульяновск	30	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	30	$\frac{< 1,0 - 9,20}{< 1,0}$	6,7
Сельда – г. Ульяновск	30	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	30	$\frac{< 1,0 - 10,0}{< 1,0}$	10,0
Сызрань – с. Репьевка	30	$\frac{\text{все } < 0,05}{< 0,05}$	0	36	$\frac{< 1,0 - 12,8}{< 1,0}$	8,3
Кондурча – с. Красный Яр	95	$\frac{< 0,05 - 29,4}{< 0,05}$	5,3	119	$\frac{< 1,0 - 112,0}{0,40}$	17,6
Тобол – г. Ялуторовск	12	$\frac{< 0,05 - 8,14}{< 0,05}$	8,3	47	$\frac{< 1,0 - 44,8}{< 1,0}$	10,6
Каргат – с. Здвинск		–		110	$\frac{< 1,0 - 166,0}{< 1,0}$	17,3
<i>Зона степей</i>						
Чапаевка – г. Чапаевск	95	$\frac{< 0,05 - 12,0}{< 0,05}$	9,5	120	$\frac{< 1,0 - 120,0}{0,45}$	25,8
Чагра – с. Новотулка	113	$\frac{< 0,05 - 8,20}{< 0,05}$	4,4	143	$\frac{< 1,0 - 27,0}{< 1,0}$	16,8
Омь – г. Омск		–		35	$\frac{< 1,0 - 13,0}{< 1,0}$	5,7
Омь – г. Калачинск		–		111	$\frac{< 1,0 - 24,6}{< 1,0}$	0,9
Борзя – г. Борзя	35	$\frac{< 0,05 - 1,60}{< 0,05}$	0	37	$\frac{< 1,0 - 18,4}{< 1,0}$	8,1

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЯ И СВИНЦА

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
<i>Зона полупустынь и пустынь</i>						
Волга – с. Цаган-Аман	14	$\frac{0,03 - 0,30}{0,01}$	0	14	$\frac{0,40 - 9,20}{1,80}$	21,4
Волга – г. Астрахань, выше города	107	$\frac{0,02 - 11,32}{0,12}$	1	103	$\frac{0,30 - 20,0}{1,20}$	14,6
Волга – г. Астрахань, ниже города	74	$\frac{0,02 - 0,96}{0,12}$	0	74	$\frac{0,40 - 20,8}{1,66}$	25,7
<i>Таежный и тундрово-таежный пояс</i>						
Унда – с. Ново-Ивановск	36	$\frac{< 0,05 - 1,80}{< 0,05}$	0	83	$\frac{< 1,0 - 102,0}{< 1,0}$	13,3
Хилок – г. Хилок	45	$\frac{< 0,05 - 0,40}{< 0,05}$	0	59	$\frac{< 1,0 - 42,0}{< 1,0}$	11,9
Ага – с. Агинское	39	$\frac{< 0,05 - 0,60}{< 0,05}$	0	40	$\frac{< 1,0 - 7,20}{< 1,0}$	2,5
Ингода – ст. Тарская	62	$\frac{< 0,05 - 0,20}{< 0,05}$	0	112	$\frac{< 1,0 - 46,0}{< 1,0}$	10,7
Ингода – с. Краснояррово	71	$\frac{< 0,05 - 0,40}{< 0,05}$	0	142	$\frac{< 1,0 - 80,0}{< 1,0}$	8,5
Тауй – с. Талон		–		104	$\frac{< 1,0 - 258,0}{15,1}$	76
<i>Зона тайги и таежный, тундрово-таежный и горно-таежный пояса</i>						
Сусуя – г. Южно-Сахалинск	237	$\frac{< 0,05 - 1,80}{< 0,05}$	0	196	$\frac{< 1,0 - 200,0}{1,40}$	13,3
Лютога – г. Анива	236	$\frac{< 0,05 - 38,0}{< 0,05}$	1,7	194	$\frac{< 1,0 - 147,0}{1,00}$	8,2
Амур – г. Благовещенск	172	$\frac{< 0,05 - 5,10}{0,60}$	1,2	385	$\frac{< 1,0 - 220,0}{12,0}$	71,2
Амур – г. Хабаровск	66	$\frac{< 0,05 - 11,7}{0,60}$	6,1	131	$\frac{< 1,0 - 210,0}{9,60}$	62,6
Амур – г. Амурск	31	$\frac{< 0,05 - 2,00}{0,52}$	0	150	$\frac{< 1,0 - 192,0}{13,9}$	66
Амур – г. Комсомольск-на-Амуре	27	$\frac{< 0,05 - 3,00}{0,40}$	0	148	$\frac{< 1,0 - 92,0}{8,90}$	57,4
Зея – г. Благовещенск	104	$\frac{< 0,05 - 2,16}{0,40}$	0	314	$\frac{< 1,0 - 110,0}{8,00}$	57,6
Томь – г. Белогорск	37	$\frac{< 0,05 - 1,40}{0,40}$	0	35	$\frac{< 1,0 - 16,2}{4,20}$	37,1
Буряя – пгт Новобурейский	35	$\frac{< 0,05 - 10,0}{0,40}$	2,9	35	$\frac{< 1,0 - 43,4}{4,60}$	34,3
Сита – с. Князе-Волконское	55	$\frac{< 0,05 - 2,40}{0,20}$	0	11	$\frac{< 1,0 - 6,40}{3,40}$	9,1
Алей – г. Алейск	85	$\frac{< 0,05 - 33,0}{< 0,05}$	1,2	114	$\frac{< 1,0 - 27,0}{< 1,0}$	13,2

Примечание. N – количество проб; K_{пдк} – частота превышения ПДК, %. В числителе – диапазон концентраций, в знаменателе – медиана. Прочерк – нет данных.

* <0,05 или <1,0 мкг/дм³ – концентрация ниже предела обнаружения металлов атомно-абсорбционным методом [19].

Доля проб, в которых за период исследования наблюдалось превышение ПДК по соединениям кадмия, в речных водах зон тундры и лесотундры не превышала 37,7 %. Для остальных природных зон и высотных поясов значение этого показателя было существенно ниже (до 14,5 %), за исключением рек Ньюдауй (24 %) и Иртыш (54,5 %).

Изменчивость содержания в речных экосистемах соединений свинца. Содержание соединений свинца в воде исследуемых рек колеблется от значений ниже предела обнаружения ($<0,1$ мкг/дм³) до следующих значений (см. таблицу):

– 16,8 мкг/дм³ — в зонах тундры и лесотундры, кроме рек Амбарная (135,6 мкг/дм³) и Пур (78 мкг/дм³);

– 134 мкг/дм³ — в зоне тайги (за исключением рек Ньюдауй, Иртыш (г. Тобольск) и Колыма, где зафиксированы аномально высокие концентрации соединений свинца на уровне 241,5, 215,2 и 310 мкг/дм³ соответственно);

– 60 мкг/дм³ — в зоне смешанных и широколиственных лесов;

– 64 мкг/дм³ — в зоне лесостепей (кроме рек Каргат (с. Здвинск) и Кондурча (с. Красный Яр), где содержание в воде соединений свинца достигало 166 и 112 мкг/дм³ соответственно);

– 27 мкг/дм³ — в зонах степей (кроме р. Чапаевка — 120 мкг/дм³), полупустынь и пустынь.

Можно отметить достаточно равномерные изменения в значениях концентраций соединений свинца в водной среде речных экосистем зоны смешанных и широколиственных лесов.

Для речных экосистем таежного, тундрово-таежного и горно-таежного высотных поясов в целом характерно высокое содержание соединений свинца — до 210–258 мкг/дм³ (в основном это реки Дальневосточного региона).

При этом медианные значения концентраций в водных объектах зон тундры, лесотундры, лесостепей, степей, таежного, тундрово-таежного и горно-таежного высотных поясов находятся ниже предела обнаружения. В зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов для речных экосистем европейской территории России, а также в таежном и тундрово-таежном высотных поясах для отдельных участков рек Амур и Зея отмечены превышения медианных концентраций свинца над предельно допустимым значением в 1,5–2,3 раза.

Во всех створах рек доля проб, в которых наблюдалось превышение ПДК, изменяется в широких пределах — от отсутствия такового до следующих значений (см. таблицу):

– 21,4 % (наибольшее превышение — р. Пур) — в зонах тундры и лесотундры;

– 59,5 % — в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов в реках европейской части России (кроме р. Ока в пунктах у городов Дзержинск и Павлово — 85,4 и 89,6 % соответственно);

– 17,1 % — в зоне тайги азиатской части (кроме реки Колыма, где доля проб, превышающих ПДК, составила 87,3 %).

Аналогичное распределение этого показателя наблюдается для речных экосистем зон лесостепей, степей, полупустынь и пустынь, а также таежного, тундрово- и горно-таежного высотных поясов. Здесь доля проб, в которых отмечены превышения ПДК, варьирует до 27 %, и лишь для исследуемых участков рек Амур и Зея достигает 57–71 % (см. таблицу).

Оценить уровень загрязнения речных вод данными тяжелыми металлами можно с использованием критериев ВЗ и ЭВЗ. Наименьшее число случаев ВЗ и ЭВЗ воды отмечено по соединениям кадмия, наибольшее — по соединениям свинца. Из общего числа рассмотренных участков рек (речных экосистем) случаи ВЗ и ЭВЗ водной среды наблюдались в 21,2 и 46,9 % соответственно. Зафиксированы единичные случаи высокого уровня загрязнения соединениями кадмия воды рек Щучья, Амбарная и Норилка в зонах тундры и лесотундры, р. Сок в зоне лесостепей, экстремально высокого — рек Ньюдауй, Тартас, Вагай в зоне тайги, Арсеньевка и Малиновка — в зоне смешанных и широколиственных лесов, Кондурча, Самара и Обь (г. Новосибирск) — в зоне лесостепей, а также р. Алей — в высотной поясности.

Гораздо чаще наблюдалось высокое и экстремально высокое загрязнение воды рек соединениями свинца (как по максимальным, так и по медианным значениям концентраций). Уровни ВЗ и ЭВЗ воды соединениями свинца отмечены в большинстве речных экосистем практически всех природных зон и высотных поясов (за исключением зон тундры и лесотундры, где зафиксировано всего по два случая ЭВЗ в реках Амбарной и Пур).

Высокая частота встречаемости высоких и аномально высоких концентраций тяжелых металлов, обуславливающих ВЗ и ЭВЗ воды, крайне негативно сказывается на экологическом состоянии речных экосистем, усиливая экологический регресс сообществ водных организмов [20]. Это еще раз под-

тверждает актуальность проведенного исследования и обосновывает необходимость дальнейшего изучения влияния особо опасных загрязняющих веществ на экологическое состояние речных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях антропогенного воздействия на окружающую среду присутствие в речных водах опасных тяжелых металлов, в том числе кадмия и свинца, неизбежно. Многие речные экосистемы России испытывают повышенную антропогенную нагрузку за счет поступления недостаточно очищенных сточных вод, диффузионного стока с водосборных площадей и других источников загрязнения. Поступающие в речные воды экотоксиканты включаются в геохимические потоки, миграционные и внутриводоемные процессы, оказывая негативное воздействие на биотическую и абиотическую составляющие экосистемы.

На основе обобщения многолетней (1990–2012 гг.) режимной гидрохимической информации о содержании соединений кадмия и свинца в речных экосистемах России показано, что в различных природных зонах и высотных поясах содержание соединений кадмия достаточно равномерно и колеблется от значений ниже предела обнаружения до 39–45 мкг/дм³ в большинстве изученных речных экосистем. Содержание соединений свинца в воде рек изменяется от значений ниже предела обнаружения до 44 мкг/дм³ (за исключением аномально высоких концентраций в отдельных речных экосистемах), при этом наибольшие значения отмечаются в реках зоны тайги.

Оценка уровня загрязнения речных вод соединениями свинца и кадмия показала, что отмечалось наибольшее число случаев высокого и экстремально высокого загрязнения воды соединениями свинца. При этом доля речных экосистем или их участков, где наблюдались случаи высокого уровня загрязнения воды данным металлом, составила 21,2 %, а экстремально высокого — 46,9 %.

Присутствие соединений кадмия и свинца не только ухудшает качество воды и состояние водных экосистем, но и нарушает функционирование гидробионтов. Результаты оценки многолетней изменчивости содержания их в водной среде могут быть использованы при разработке мероприятий по улучшению качества воды и восстановлению состояния речных экосистем.

Рассмотрение региональных особенностей распределения растворенных форм тяжелых металлов в речных экосистемах различных природных зон и высотных поясов России позволит выявлять зоны (территории) с повышенным их содержанием в водной среде, что, в свою очередь, может быть использовано для выделения природной составляющей содержания данных металлов в поверхностных водах, оценки антропогенной нагрузки на водосборах, идентификации локальных загрязнений и т. п.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14–05–00144).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исидоров В. А. Экологическая химия: Учеб. пособие для вузов. — СПб.: Химиздат, 2001. — 304 с.
2. Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. — СПб.: Наука, 2004. — 294 с.
3. Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 1995. — 215 с.
4. Будников Г. К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // Соросовский образовательный журнал. Биология. — 1998. — № 5. — С. 23–29.
5. Никаноров А. М., Жулидов А. В. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 310 с.
6. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния / Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 288 с.
7. Чухлебова Л. М., Бердников Н. В. Особенности накопления тяжелых металлов в воде, донных отложениях и мышцах рыб среднего течения р. Амур // Региональные проблемы. — 2011. — Т. 14, № 1. — С. 54–58.
8. Шилова Т. М. Химико-экологическая оценка речных вод г. Уссурийска: тяжелые металлы: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Уссурийск, 2000. — 24 с.
9. Шулькин В. М. Тяжелые металлы в речных и прибрежно-морских экосистемах: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — Владивосток: Изд-во Тихоокеан. ин-та географии ДВО РАН, 2007. — 37 с.
10. Галатова Е. А. Накопление и распределение экотоксикантов в речной воды (на примере реки Уй) // Омск. науч. вестн. — 2009. — № 1 (84). — С. 19–21.

11. Бутаев А. М., Гуруев М. А., Магомедбеков У. Г., Осипова Н. Ф., Магомедрасулова Х. М., Магомедова А. Д., Мухучев А. А. Тяжелые металлы в речных водах Дагестана // Вестн. Дагестан. науч. центра РАН. — 2006. — № 26. — С. 43–50.
12. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода–взвешенное вещество–донные отложения речных экосистем. — Новосибирск: Изд-во Гос. публ. науч.-техн. библиотеки СО РАН, Ин-та водных и экол. проблем СО РАН, 2001. — 269 с.
13. Папина Т. С. Эколого-аналитическое исследование распределения тяжелых металлов в водных экосистемах бассейна р. Обь: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Барнаул, 2004. — 259 с.
14. Булаткина Е. Г., Плакитин В. А., Андрианов В. А. Динамика содержания микроэлементов в речной воде низовья Волги // Геология, география и глобальная энергия. — 2013. — № 3 (50). — С. 187–194.
15. Янин Е. П. Формы нахождения кадмия в техногенных илах реки Пахры и оценка его миграционных способностей // География и природ. ресурсы. — 2011. — № 1. — С. 42–46.
16. Снакин В. В. Свинец в биосфере // Вестн. РАН. — 1998. — Т. 68, № 3. — С. 214–224.
17. Геопортал МГУ [Электронный ресурс]. — URL:<<http://www.geogr.msu.ru:802/FGR/>> (дата обращения 11.01.2016).
18. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. — 49 с.
19. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. Л. В. Боевой. — Ростов-на-Дону: НОК. — 2009. — Ч. 1. — 1044 с.
20. Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Решетняк О. С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. — Ростов-на-Дону: НОК, 2012. — 308 с.

Поступила в редакцию 15 апреля 2016 г.
