

УДК 502.55

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ИНДИКАТОР ПЕРВИЧНОГО И ИСТОЧНИК ВТОРИЧНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД УГЛЕПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

© 2020 г. В. Е. Закругкин^а, Е. В. Гибков^{а, *}, О. С. Решетняк^{а, b}, В. Н. Решетняк^а

^аЮжный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

^бГидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: irvict@mail.ru

Поступила в редакцию 13.05.2019 г.

После доработки 20.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Впервые для углепромышленных районов Восточного Донбасса были изучены вещественный состав и уровни загрязненности донных отложений малых и средних рек. Получены данные о содержаниях широкой гаммы тяжелых металлов и других микроэлементов не только в валовых пробах донных отложений, но и в выделенной пелитовой фракции (<0.01 мм) как наиболее информативной при оценке степени загрязненности речных осадков. В результате проведенного модельного эксперимента получены данные о донных отложениях региона как источниках вторичного загрязнения водной среды. Определено, что при определенных гидродинамических условиях (ветровое взмучивание, изменение водности, проведение дноуглубительных работ) донные отложения могут являться источником вторичного загрязнения воды соединениями марганца, железа, меди, хрома и лития. Проведено ранжирование рек по степени опасности их вторичного загрязнения и негативного воздействия на качество воды. Установлено, что большая часть рек исследуемого региона характеризуется средним и низким уровнями потенциального воздействия на водную среду.

Ключевые слова: донные отложения, тяжелые металлы, загрязнение речных вод, реки Восточного Донбасса, углепромышленные территории

DOI: 10.31857/S2587556620020168

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Восточный Донбасс располагается на западе Ростовской области и представляет собой зону размещения месторождений угля и предприятий угледобывающей промышленности. На протяжении многих лет это один из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов юга России. Его основные геоэкологические проблемы хорошо изучены и широко представлены в работах [2, 4, 8, 10, 15, 18]. Наибольшую озабоченность у исследователей вызывают гидроэкологические проблемы, связанные, в первую очередь, с ухудшением качества поверхностных и подземных вод и невозможностью их использования населением для питьевых и хозяйственных целей. Данное обстоятельство в значительной степени обусловлено влиянием объектов добычи и переработки угля, в основном за счет поступления техногенных шахтных вод в поверхностные водные объекты [5, 15, 17]. При этом меняется химический состав не только водной толщи, но и донных отложений, которые, как известно, являются

своеобразным “хранилищем” загрязняющих веществ.

Донные отложения играют двоякую роль. С одной стороны, они являются депонирующей средой не только в водоемах, но и в водотоках с малыми течениями и высокой меандрированностью русла, и выполняют роль индикатора загрязненности речной воды, а с другой, при определенных условиях (взмучивании воды, резких изменениях гидрометеорологических условий и др.), служат источником вторичного ее загрязнения.

Как известно, донные отложения являются конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений, поэтому в значительной степени отражают геохимические особенности водосборной площади. Это позволяет по их составу выделить техногенные потоки и оценить степень техногенной нагрузки на водоток. По выражению В.И. Вернадского, донные отложения представляют собой “подводную почву” и поэтому определяют многие экологические особенности водных систем. В частности, имеющийся литератур-

Таблица 1. Фоновые значения содержаний тяжелых металлов в донных отложениях (мг/кг) и воде (мг/дм³) рек Восточного Донбасса

Бассейн	Компонент	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
р. Тузлов	Валовая проба	19000	8.5	1962	13.6	26.5	13.9	28.8	72.7
	Пелитовая фракция	23800	13.7	944	27.0	33.0	39.3	69.7	45.7
	Речная вода	0.05	0.001	0.014	0.001	0.001	0.001	0.005	0.001
р. Северский Донец	Валовая проба	24000	16.1	1007	19.6	24.5	6.50	34.4	86.5
	Пелитовая фракция	21400	17.3	780	21.5	44.3	29.6	54.3	63.0
	Речная вода	0.05	0.001	0.056	0.002	0.001	0.001	0.005	0.001

ный материал [12] свидетельствует о том, что в ряде случаев донные отложения, загрязненные тяжелыми металлами, обладают сублетальной токсичностью для многих водных организмов.

Как показывают результаты натуральных и экспериментальных наблюдений [3, 7, 9, 11, 20], возможен переход загрязняющих веществ из донных отложений в водную фазу, что необходимо учитывать даже при прекращении поступления химических веществ в речную сеть из антропогенных источников. Поэтому вывод химического элемента из водной фазы свидетельствует лишь о временном “самоочищении” водной массы, но не водного объекта в целом (как экологической системы). Таким образом, донные отложения, будучи важнейшим компонентом аквальных экосистем, могут являться, с одной стороны, индикатором степени загрязнения водной толщи, а с другой – источником ее вторичного загрязнения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами наших исследований являлись малые и средние степные реки Восточного Донбасса, принадлежащие двум бассейнам – Тузлова (рр. Аюта, Атюхта, Кадамовка, Грушевка, Большой и Малый Несветай) и Северского Донца (рр. Быстрая, Лихая, Кундрючья, Большая Гнилуша, Малая и Большая Каменка). Многие из водотоков характеризуются низкой скоростью течения (до 1 м/с) и, соответственно, высокой степенью меандрирования. Расположение створов наблюдений и мест отбора проб воды и донных отложений представлено на рис. 1.

Отбор проб донных отложений для минералогических исследований проводили согласно нормативным документам (ГОСТ 17.1.5.01-80). Опробование проведено летом и осенью 2015 г. На небольших и неглубоких водотоках отбирали осредненную пробу по поперечному профилю реки, на средних и больших реках – у уреза воды в местах видимой аккумуляции наносов. Отбор проб проводили специальными пробоотборниками из верхнего 10-сантиметрового слоя донных осадков. В зависимости от видов исследований масса

отбираемых донных отложений составляла обычно от 500 до 1500 г.

Как показывает опыт геохимических исследований донных отложений, отбор средней пробы, объединяющей фракции размером менее 1 мм, позволяет достаточно объективно оценить уровень их техногенного загрязнения. В связи с неоднородностью гранулометрического состава донных отложений каждую пробу составляли из нескольких (обычно 3–5) частных проб, отбираемых вблизи заданной точки опробования.

Такой способ отбора способствовал тому, что все пробы донных осадков отличались достаточно сходным алеврито-глинистым механическим составом. В дальнейшем из валовых проб методом отмучивания выделялись их пелитовые фракции (меньше 0.01 мм), которые, как выяснилось, обладают лучшими индикаторными свойствами. После морфологического описания отобранные пробы донных осадков высушивались до воздушно-сухого состояния и передавались в лабораторию для минералогического и химического анализов.

Для выявления геохимических аномалий и оценки уровня загрязнения донных отложений химическими элементами использовали фоновые значения концентраций металлов в донных отложениях рек (табл. 1). При этом точки отбора фоновых проб располагались в верховьях рек вне зоны влияния антропогенных источников (в нашем случае объектов угольной промышленности, действующих и ликвидированных шахт и др.).

Оценка уровня загрязненности донных отложений в соответствии с [15] проводилась в два этапа. На первом этапе для характеристики техногенных геохимических аномалий в донных отложениях рек определены коэффициенты концентрации (K_c) химических элементов, характеризующие степень их накопления (уровень аномальности) в донных отложениях относительно фонового содержания по следующей формуле:

$$K_c = \frac{C_i}{C_{\text{фон}}}, \quad (1)$$

где C_i – средняя концентрация металла в донных отложениях реки, $C_{\text{фон}}$ – фоновое содержание данного металла в речном бассейне.

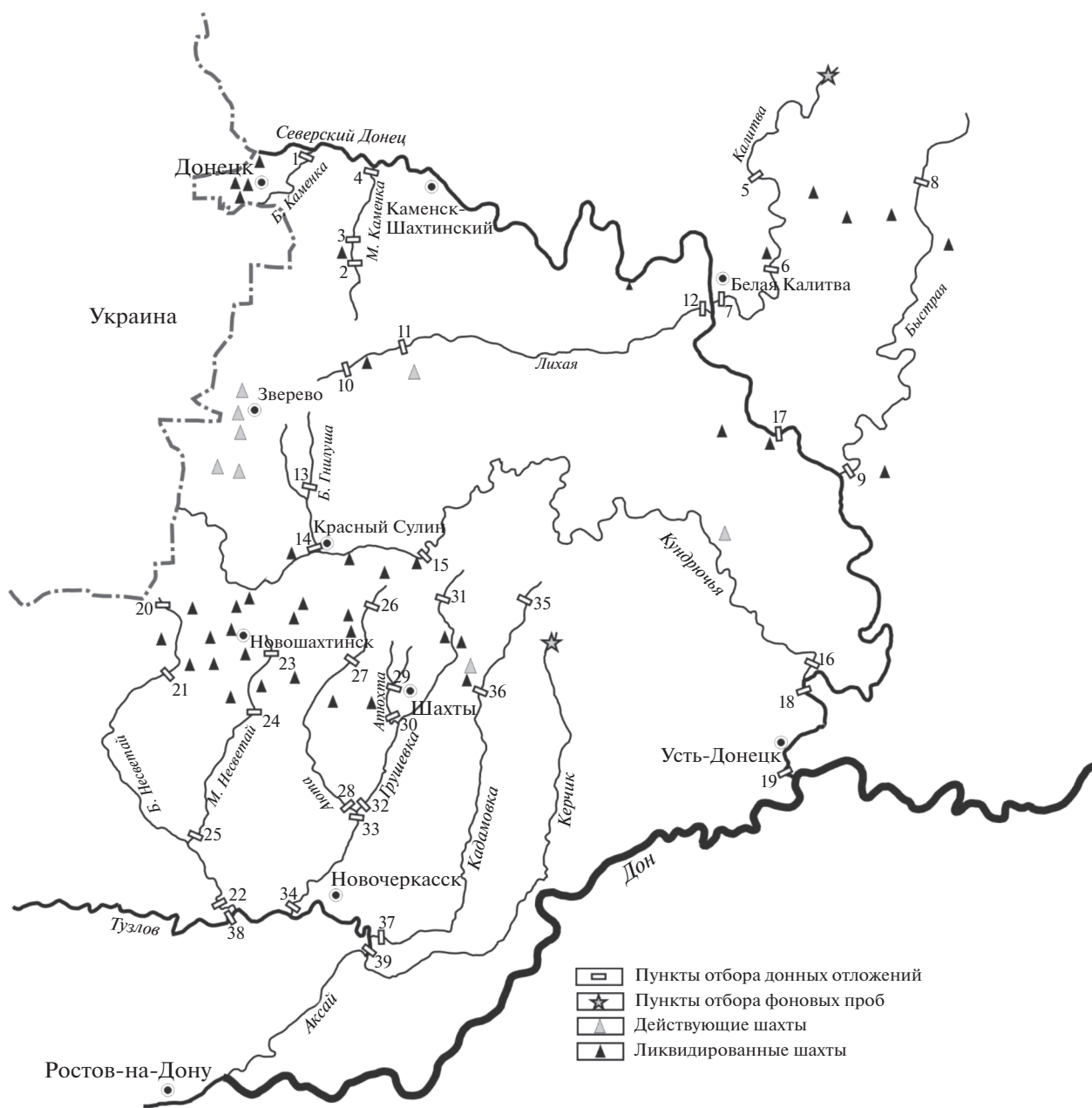


Рис. 1. Схема расположения мест отбора донных отложений рек Восточного Донбасса.

При этом за минимально аномальное содержание принята концентрация металла, в 1.5 раза превышающая фон. Чем больше K_c превышает это значение, тем выше уровень аномальности содержания металла в донных отложениях исследуемого объекта. Значение K_c ниже 1.5 указывает на природную вариацию содержания вещества (отсутствие аномалии).

На втором этапе был определен суммарный показатель загрязнения Z_c , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации (K_c) элементов, входящих в геохимическую ассоциацию,

и отражающий аддитивное превышение фонового уровня группой ассоциирующихся элементов

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1), \tag{2}$$

где n – количество элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Для оценки техногенного загрязнения рек по интенсивности накопления металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса использована ориентировочная шкала [15], по которой

при значениях Z_c менее 10 – уровень загрязнения оценивается как “слабый”, от 10 до 30 – “средний”, от 30 до 100 – “высокий”, от 100 до 300 – “очень высокий” и при Z_c более 300 – “чрезвычайно высокий”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований выяснилось, что донные осадки большинства рек Восточного Донбасса по гранулометрическому составу представлены слабо дифференцированным псаммит-алеврит-пелитовым материалом. При этом в речных осадках бассейна Северского Донца, как правило, доминирует песчано-алевритовый компонент (12–92%, в среднем 54%), а в бассейне Тузлова – пелитовый (34–76%, в среднем 65%). Следует также отметить, что для обоих бассейнов характерно обогащение речного аллювия органическим веществом, значительная часть которого в ряде случаев представлена углефицированным растительным детритом.

Анализ минерального состава проводился по специально выделенным фракциям – легкой (с подразделением на пелитовую и песчано-алевритовую) и тяжелой (терригенные и аутигенные минералы). Пелитовая фракция состоит преимущественно из глинистых минералов (гидрослюды с примесью монтмориллонита и каолинита). В подчиненном количестве присутствуют кварц и полевой шпат, чешуйки слюд, современное органическое вещество, кальцит и уголь (в сумме до 33% легкой фракции). Песчано-алевритовая фракция донных отложений представлена в основном зернами кварца и полевого шпата. В отдельных реках в заметном количестве (до 10% в бассейне Северского Донца и до 18% в бассейне Тузлова) присутствует терригенный обломочный материал в виде частиц песчаника, углистых аргиллитов, алевролитов, карбонатов и кремнистых пород. Так же, как и в пелитовой фракции, достаточно часто встречаются современное органическое вещество и частицы угля (в сумме достигают 14–19% от легкой фракции в реках Малая Каменка, Быстрая и Атюхта).

В составе тяжелой фракции преобладают ильменит (34% в бассейне Тузлова, 35% в бассейне Северского Донца), магнетит (18 и 24% соответственно). К второстепенным минералам относятся циркон, рутил, кианит, ставролит, турмалин. Существенно реже встречаются амфиболы, мусковит, биотит, хромит, хромшпинелиды. В целом на долю терригенных минералов приходится в среднем 70–80% от общего состава тяжелой фракции речных осадков. Из группы аутигенных минералов доминирующая роль принадлежит оксидам и гидроксидам железа (12% в бассейне Туз-

лова и 22% в бассейне Северского Донца), в отдельных реках значительная доля (до 27%) приходится на пирит. Присутствие в донных отложениях оксидов и гидроксидов железа в виде гетита и гидрогетита связано с поступлением в речную сеть техногенных шахтных вод [6].

Воздействие шахтных вод на минеральный состав донных отложений в большей степени проявляется на малых реках в бассейне Тузлова, поэтому здесь фиксируется повышенное количество гидроокислов железа. Следует отметить, что значительная часть их “соосаждается” с глинистыми минералами, и поэтому они присутствуют в составе не только в тяжелой, но и легкой фракции.

В табл. 2 приведены данные о содержании тяжелых металлов в донных отложениях рек. Донные осадки рек Восточного Донбасса обогащены широким спектром металлов, прежде всего Mn, Pb, Cu, Ni, Cr, Zn. Объясняется это в первую тем, что Восточный Донбасс в настоящее время представляет собой региональную природно-техногенную полиэлементную геохимическую аномалию. Вместе с тем, при сравнении абсолютных валовых содержаний тяжелых металлов выявляются различия между донными отложениями рек в исследуемых бассейнах.

Так, по средним валовым содержаниям тяжелых металлов (за исключением хрома) донные отложения рек бассейна Тузлова превосходят реки бассейна Северского Донца: от 1.2 по никелю, меди и стронцию до 4.8 – по свинцу (см. табл. 2).

Аномальное содержание металлов ($K_c > 1.5$) относительно фона наблюдалось в донных отложениях рек бассейна Тузлова: по пяти металлам – в рр. Большой и Малый Несветай, Атюхта, Грушевка и Кадамовка и по четырем – в р. Аюта. По пяти металлам фиксировалось превышение концентраций в большинстве рек бассейна Северский Донец (за исключением рр. Калитва и Быстрая – по одному металлу). Наиболее часто аномальное превышение фона отмечалось по следующим металлам: Cr – в двенадцати реках, Ni, Zn и Cu – в одиннадцати, Pb – в десяти, Mn – в трех реках изучаемых бассейнов.

Таким образом, выделяются общие для исследуемых бассейнов Восточного Донбасса приоритетные металлы-загрязнители – хром, медь, свинец, никель и цинк, содержание которых в донных отложениях имеет максимальные превышения над фоновыми региональными значениями.

Важно отметить, что такой набор приоритетных элементов характерен не только для донных отложений исследуемых рек Восточного Донбасса, но и соответствует речным водам и техногенным шахтным водам, которые, как не раз упоминалось, являются основным источником загрязнения поверхностных вод [6, 7]. Влияние шахтных вод

Таблица 2. Средние валовые содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса, мг/кг

Река	Mn	Ni	V	Cr	Zn	Pb	Cu	Sr
Бассейн Северского Донца								
Большая Каменка	<u>740*</u>	<u>40</u>	<u>100</u>	<u>150</u>	<u>80</u>	<u>15</u>	<u>40</u>	<u>30</u>
	0.73	1.63	—**	1.73	2.33	2.31	2.04	—
Малая Каменка	<u>533</u>	<u>40</u>	<u>93</u>	<u>367</u>	<u>70</u>	<u>13</u>	<u>33</u>	<u>37</u>
	0.53	1.63	—	4.24	2.03	2.00	1.68	—
Лихая	<u>1567</u>	<u>67</u>	<u>117</u>	<u>110</u>	<u>167</u>	<u>13</u>	<u>60</u>	<u>43</u>
	1.56	2.73	—	1.27	4.85	2.00	3.06	—
Калитва	<u>183</u>	<u>22</u>	<u>57</u>	<u>393</u>	<u>13</u>	<u>4</u>	<u>11</u>	<u>13</u>
	0.18	0.90	—	4.54	0.38	0.62	0.56	—
Быстрая	<u>200</u>	<u>18</u>	<u>100</u>	<u>210</u>	<u>20</u>	<u>5</u>	<u>12</u>	<u>15</u>
	0.20	0.73	—	2.43	0.58	0.77	0.61	—
Большая Гнилуша	<u>2850</u>	<u>80</u>	<u>100</u>	<u>550</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>95</u>	<u>50</u>
	2.83	3.27	—	6.36	0.38	2.15	4.85	—
Кундрючья	<u>750</u>	<u>45</u>	<u>100</u>	<u>200</u>	<u>90</u>	<u>15</u>	<u>40</u>	<u>40</u>
	0.74	1.84	—	2.31	2.62	2.31	2.04	—
Северский Донец	<u>150</u>	<u>18</u>	<u>50</u>	<u>55</u>	<u>95</u>	<u>8</u>	<u>15</u>	<u>25</u>
	0.15	0.73	—	0.64	2.76	1.23	0.77	—
Бассейн в целом	150–2850 (871)***	18–80 (41)	50–117 (90)	55–550 (254)	13–167 (69)	4–15 (11)	11–95 (38)	13–50 (32)
Бассейн Тузлова								
Большой Несветай	<u>1067</u>	<u>50</u>	<u>80</u>	<u>143</u>	<u>100</u>	<u>23</u>	<u>43</u>	<u>30</u>
	0.54	1.89	—	1.97	3.47	1.65	3.16	—
Малый Несветай	<u>3000</u>	<u>77</u>	<u>73</u>	<u>93</u>	<u>103</u>	<u>8</u>	<u>33</u>	<u>40</u>
	1.53	2.91	—	1.28	3.58	0.58	2.43	—
Аюта	<u>1400</u>	<u>47</u>	<u>87</u>	<u>117</u>	<u>70</u>	<u>18</u>	<u>47</u>	<u>33</u>
	0.71	1.77	—	1.61	2.43	1.29	3.46	—
Атюхта	<u>750</u>	<u>45</u>	<u>150</u>	<u>300</u>	<u>200</u>	<u>45</u>	<u>55</u>	<u>45</u>
	0.38	1.70	—	4.13	6.94	3.24	4.04	—
Грушевка	<u>1675</u>	<u>43</u>	<u>108</u>	<u>138</u>	<u>85</u>	<u>132</u>	<u>35</u>	<u>40</u>
	0.85	1.62	—	1.90	2.95	9.50	2.57	—
Кадамовка	<u>1433</u>	<u>40</u>	<u>100</u>	<u>233</u>	<u>93</u>	<u>133</u>	<u>47</u>	<u>40</u>
	0.73	1.51	—	3.20	3.23	9.57	3.46	—
Тузлов	<u>1000</u>	<u>40</u>	<u>100</u>	<u>250</u>	<u>450</u>	<u>9</u>	<u>55</u>	<u>45</u>
	0.51	1.51	—	3.44	15.63	0.65	4.04	—
Бассейн в целом	750–3000 (1475)	40–77 (49)	73–150 (100)	93–300 (182)	70–450 (157)	8–133 (53)	33–55 (45)	30–45 (39)

* В числителе – содержание элемента, в знаменателе – кратность превышения фонового значения.

** Нет данных по фону.

*** В скобках приведено среднее значение.

также проявляется в резком увеличении содержания сульфатов и минерализации речных вод [3].

Выявленные геохимические особенности и различия между донными отложениями рек двух бассейнов изначально связаны с особенностями литологического состава дренируемых пород. Так, бассейн р. Северский Донец на большей части площади представлен каменноугольными отложениями (песчаниками, алевролитами, аргил-

литами, прослоями известняков). В бассейне р. Тузлов и его притоков, напротив, преобладают известняковые отложения палеоген-неогенового возраста. Однако в дальнейшем, с начала эксплуатации угольных месторождений, заметную роль в формировании химического состава донных осадков стал играть антропогенный фактор.

Для оценки техногенного загрязнения рек по интенсивности накопления металлов в донных

Таблица 3. Геохимические ассоциации и уровень загрязнения рек Восточного Донбасса по накоплению металлов в донных отложениях (расчет по валовым пробам)

Река	Формула геохимической ассоциации	Z_c	Уровень загрязнения
Бассейн р. Северский Донец			
Калитва	$Cr_{4,5}$	4.54	Слабый
Большая Каменка	$Zn_{2,3} Pb_{2,3} Cu_{2,0} Cr_{1,7} Ni_{1,6}$	6.04	Слабый
Кундрючья	$Zn_{2,6} Cr_{2,3} Pb_{2,3} Cu_{2,0} Ni_{1,8}$	7.11	Слабый
Малая Каменка	$Cr_{4,2} Zn_{2,0} Pb_{2,0} Cu_{1,7} Ni_{1,6}$	7.59	Слабый
Лихая	$Zn_{4,9} Cu_{3,1} Ni_{2,7} Co_{1,9} Mn_{1,6}$	10.21	Средний
Большая Гнилуша	$Cr_{6,4} Cu_{4,9} Ni_{3,3} Mn_{2,8} Pb_{2,2}$	15.45	Средний
Бассейн р. Тузлов			
Аюта	$Cu_{3,5} Zn_{2,4} Ni_{1,8} Cr_{1,6}$	6.27	Слабый
Малый Несветай	$Zn_{3,6} Ni_{2,9} Cu_{2,4} Mn_{1,5}$	7.44	Слабый
Большой Несветай	$Zn_{3,5} Cu_{3,2} Cr_{2,0} Ni_{1,9} Pb_{1,7}$	8.14	Слабый
Грушевка	$Pb_{9,5} Zn_{3,0} Cu_{2,6} Cr_{1,9} Ni_{1,6}$	14.54	Средний
Атюхта	$Zn_{6,9} Cr_{4,1} Cu_{4,0} Pb_{3,2} Ni_{1,7}$	16.05	Средний
Кадамовка	$Pb_{9,6} Cu_{3,5} Zn_{3,2} Cr_{3,2} Ni_{1,5}$	16.97	Средний

Примечание: цифры у символа металла – коэффициенты концентрации (K_c).

отложения составлены формулы геохимических ассоциаций и рассчитаны значения Z_c . Геохимические ассоциации (ранжированный ряд металлов по значениям K_c) характеризуют качественный (элементный) состав и структуру геохимической аномалии. Результаты оценки техногенного загрязнения рек по интенсивности накопления металлов в донных отложениях приведены в табл. 3. Установлено, что уровень техногенного загрязнения большинства рек по интенсивности накопления металлов в донных отложениях в целом оценивается как “слабый” и “средний”.

Определение суммарного показателя загрязнения (Z_c) пелитовой фракции показало, что для большей части речных осадков уровень ее загрязнения, как и валовых проб, является “слабым” для всех рек бассейна Северского Донца, “слабым” и “средним” – бассейна Тузлова (табл. 4).

Для оценки донных отложений как индикатора загрязнения водной среды рассчитаны коэффициенты корреляции между Z_c валовых проб и пелитовых фракций и суммарным показателем загрязненности воды ($Z_{c \text{ вода}}$). Последний был определен относительно фоновых параметров каждого из бассейнов по тому же набору элементов, что и для донных отложений. Этим он отличается от общепринятой комплексной методики оценки качества водной среды с использованием ПДК, что может давать существенные отклонения при сопряженном анализе полученных суммарных показателей загрязненности.

В результате исследования выявлена значимая отрицательная зависимость между уровнями загрязненности воды и донных отложений в целом ($Z_{c \text{ вал}}$) для рек бассейна Северского Донца ($r = -0.43$), что свидетельствует об эффективных процессах самоочищения поверхностных вод. В бассейне Тузлова, наоборот, обнаружена слабая положительная корреляционная связь между этими показателями ($r = 0.18$). В первом приближении это может быть объяснено хроническим загрязнением водотоков данного бассейна в результате высокой долговременной антропогенной нагрузки, превышающей самоочищающую способность водной среды. Дополнительным фактором здесь может служить низкая водность рек, которая определяет относительно слабую разбавляющую способность по отношению к техногенному воздействию.

Что касается уровней загрязненности воды и пелитовой фракции донных отложений, то между ними была выявлена прямая значимая корреляционная зависимость с коэффициентами корреляции 0.46 в бассейне Тузлова и 0.56 в бассейне Северского Донца. Полученные результаты вполне объяснимы известными данными о высокой сорбционной емкости частиц данной размерности, представленной здесь преимущественно гидрослюдой и монтмориллонитом. Также следует отметить, что именно эта часть донных отложений в большей степени участвует в процессах взаимного обмена микроэлементами с водной толщей при многократных циклах взмучивания материала донных отложений и его последующим

Таблица 4. Геохимические ассоциации и уровень загрязнения рек Восточного Донбасса по накоплению металлов в пелитовой фракции донных отложений

Река	Формула геохимической ассоциации	Z_c	Уровень загрязнения
Бассейн р. Северский Донец			
Быстрая	$Cu_{1.6} Zn_{1.5}$	2.58	Слабый
Малая Каменка	$Zn_{2.4} Cu_{1.8} Co_{1.8} Fe_{1.6}$	4.75	Слабый
Кундрючья	$Zn_{2.3} Co_{2.3} Mn_{2.0} Cu_{1.8} Fe_{1.6} Ni_{1.5}$	6.13	Слабый
Большая Гнилуша	$Mn_{2.5} Co_{2.3} Zn_{2.0} Cu_{1.7} Fe_{1.5}$	6.90	Слабый
Большая Каменка	$Cu_{2.2} Co_{2.2} Mn_{2.0} Fe_{1.9} Pb_{1.6} Ni_{1.5}$	8.00	Слабый
Лихая	$Mn_{3.1} Zn_{2.9} Co_{2.7} Cu_{2.5} Ni_{1.5} Fe_{1.6}$	9.47	Слабый
Бассейн р. Тузлов			
Кадамовка	$Cr_{2.6} Fe_{1.9}$	3.46	Слабый
Большой Несветай	$Cr_{3.0} Mn_{2.4} Fe_{1.9}$	5.79	Слабый
Атюхта	$Cr_{5.9} Fe_{2.3} Zn_{2.2} Cu_{2.2} Ni_{1.8}$	10.42	Средний
Малый Несветай	$Cr_{6.3} Mn_{2.4} Ni_{2.4} Fe_{1.8} Zn_{1.6} Co_{1.6}$	10.83	Средний
Аюта	$Cr_{7.8} Fe_{2.2} Zn_{1.7} Pb_{1.7} Cu_{1.6}$	11.39	Средний
Грушевка	$Cr_{11.2} Fe_{2.5} Mn_{2.4} Ni_{2.1} Zn_{2.0} Cu_{1.7}$	16.94	Средний

Примечание: цифры у символа металла – коэффициенты концентрации (K_c).

оседанием. Данное обстоятельство показывает, что уровень загрязненности именно пелитового материала осадочных отложений в значительной степени отражает качество речных вод и может быть использован как один из критериев для интегральной оценки состояния рек Восточного Донбасса.

Для оценки роли донных отложений как источника вторичного загрязнения водной среды проведена серия лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия донных отложений и речных вод (на примере рек бассейна Тузлова). Опробование проводилось в летний период 2015 г. Образцы донных отложений, отобранные в р. Малый Несветай, являются наиболее типичными по минеральному и гранулометрическому составу для бассейна р. Тузлов. Пробы речной воды отобраны в рр. Большой Несветай и Аюта, которые характеризуются разным уровнем техногенного воздействия и разной минерализацией. Проба № 1 из р. Большой Несветай на участке выше влияния объектов угольной промышленности характеризуется минерализацией воды 1696.0 ± 152.6 мг/дм³, № 2 – из р. Аюта на участке ниже выхода техногенных шахтных вод значительно более минерализованная (4828.0 ± 434.5 мг/дм³). Подробно методика эксперимента описана в работе [12].

Кислотность среды в обоих образцах соответствует слабощелочной реакции (8.0–8.5), поэтому влияние кислотности воды на миграционные особенности металлов в системе “вода–донные отложения” не исследовалось. Но как показано в

работах [4, 10] при повышении рН в осенний период происходит накопление ряда металлов в донных отложениях. Обратный процесс протекает в кислой среде, когда активизируется процесс десорбции тяжелых металлов с поверхности твердых частиц донных отложений [8]. Процессы сорбции и десорбции металлов в значительной мере зависят от наличия эффективных (активных) сорбционных центров в донных отложениях [21].

В эксперименте выполнялось равномерное перемешивание (имитация взаимодействия) донных осадков с природными речными водами различной минерализации, что позволило выявить поведение ряда металлов (железа, марганца, меди, цинка, стронция, лития и хрома) в системе “донные отложения–речная вода”. Оказалось, что большая часть из них (железо, марганец, медь, хром и литий) переходит в существенных количествах из донных отложений в раствор достаточно быстро, в первые 10, реже 60 мин взаимодействия. Более длительный контакт заметно влияет на поведение этих металлов и увеличение их концентраций в воде не оказывает. Что касается стронция и цинка, то их содержания в водном растворе вне зависимости от продолжительности эксперимента оставались практически постоянными. Это означает, что в системе “речная вода–донные отложения” эти металлы присутствуют в равновесных концентрациях [12].

Ориентировочные равновесные концентрации ряда металлов, которые устанавливаются после интенсивного взаимодействия (перемешивания) с донными осадками, значительно превыша-

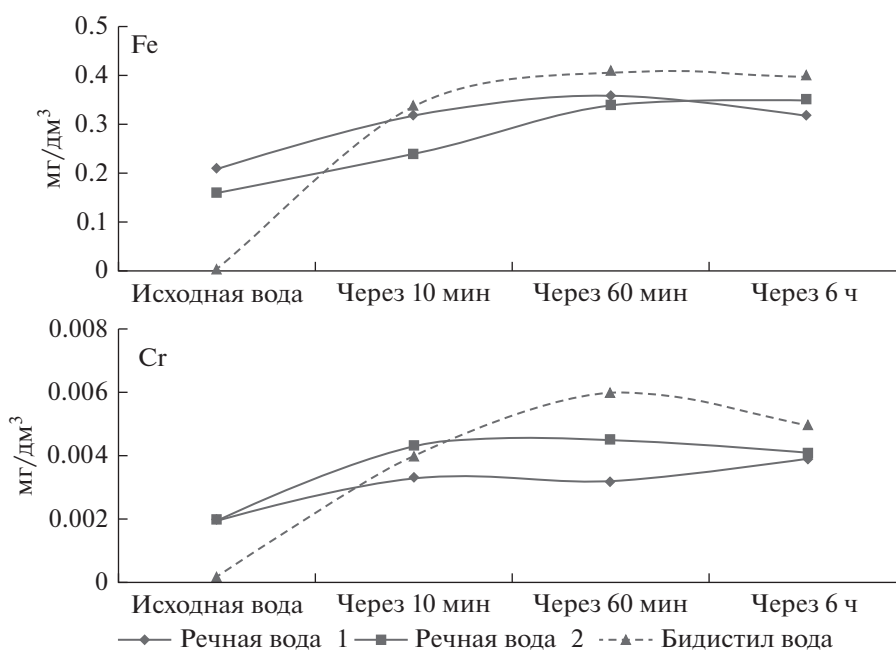


Рис. 2. Изменчивость содержания соединений железа и хрома в воде до и после эксперимента (здесь и на рис. 3: речная вода № 1 — из р. Большой Несветай; речная вода № 2 — из р. Аюта, более минерализованная).

ют и ПДК, и фоновые значения. Так, например, содержание железа в воде после перемешивания устанавливается на уровне 0.32–0.35 мг/дм³, что соответствует 3.2–3.5 ПДК и превышает фон в 6.4–7.0 раз; содержание меди — 0.005–0.008 мг/дм³, что соответствует 5.0–8.0 ПДК и превышает фон также в 5.0–8.0 раз; содержание хрома — 0.004–0.005 мг/дм³, что не превышает ПДК, но превышает фон в 4.0–5.0 раз. Таким образом, донные отложения могут являться источником вторичного загрязнения водной толщи соединениями металлов, особенно марганца, железа, меди, хрома и др.

Рассмотрение изменения содержания металлов в воде при контакте с донными осадками различной длительностью позволило выявить ряд новых особенностей. Так, например, выход (десорбция) из донных отложений таких металлов как железо и хром не зависит от минерализации речной воды (рис. 2), в то время как десорбция марганца и лития увеличивается при контакте с более минерализованной водой (рис. 3). Последнее может быть связано с образованием устойчивых сульфатных комплексов ионов металлов (концентрация сульфатов в образце 2 составляет 2655 мг/дм³).

Такое поведение элементов в эксперименте в первую очередь обусловлено наличием подвижных и устойчивых форм их нахождения в донных осадках и степенью насыщения ионами этих металлов водной толщи. Проще говоря, это определяется наличием или отсутствием динамического

равновесия между двумя контактирующими средами (вода и донные осадки).

Таким образом, можно полагать, что при определенных условиях (ветровое взмучивание, изменение водности, проведение дноуглубительных работ) донные отложения рек Восточного Донбасса могут являться источником вторичного загрязнения водной толщи многими химическими элементами, в том числе соединениями марганца, железа, меди, хрома и лития [12].

Миграционную способность металлов из воды в донные отложения можно оценить с помощью коэффициента распределения $LgK_{распр} = [M_{до}]/[M_{вода}]$, где $LgK_{распр}$ — коэффициент распределения; $[M_{до}]$ — содержание металла в донных осадках, мг/кг; $[M_{вода}]$ — содержание металла в воде, мг дм⁻³ [17, 20]. Чем больше значение коэффициента распределения, тем интенсивнее протекает процесс миграции металла из воды в донные отложения за счет осаждения, сорбции или хемосорбции металла донными осадками.

Результаты расчета коэффициентов распределения для изучаемых рек показали, что наиболее интенсивные процессы осаждения металла и сорбции донными отложениями характерны для железа (среднее значение $LgK_{распр} = 5.0$) и хрома (4.6), средний характер миграции наблюдается для меди (3.7), цинка (3.5) и марганца (3.2). Для стронция и лития средние значения коэффициентов распределения минимальны ($LgK_{распр} = 2.1$ и $LgK_{распр} = 2.35$ соответственно), что свидетель-

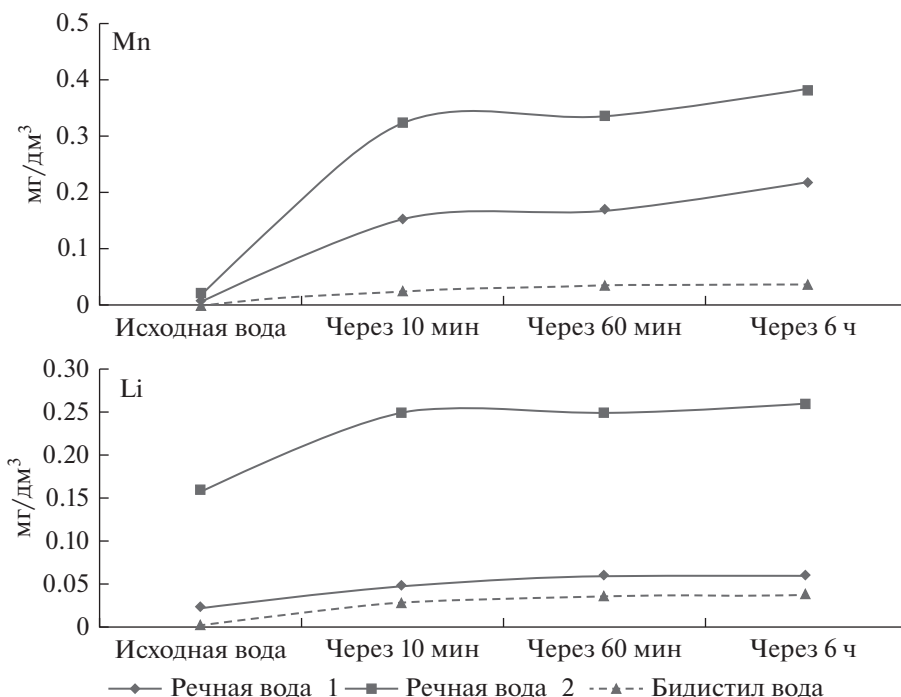


Рис. 3. Изменчивость содержания соединений марганца и лития в воде до и после эксперимента.

ствует о возможности протекания и обратного миграционного процесса – десорбции металла из донных отложений в воду.

Данные эксперимента с речными водами разной минерализации показали, что в более минерализованных водах уменьшается интенсивность процесса осаждения марганца, лития и стронция и усиливается степень перехода металлов из донных отложений в воду.

Чтобы оценить степень влияния донных отложений на состав речных вод, а также потенциальное количество тяжелых металлов, которое может поступать в речные воды от донных осадков, рассчитана накопленная масса элементов в донных отложениях рек. Затем, в соответствии с результатами эксперимента, найдены усредненные значения массы элементов, доступных для перехода в водную толщу из наиболее активного слоя донных осадков.

При расчете накопленной массы элементов в донных отложениях рек Восточного Донбасса за основу принята формула [1], в которую добавлен параметр мощности верхнего активного слоя донных осадков:

$$Q = bh\rho_{до} \int_{L_2}^{L_1} c(l)dl, \quad (3)$$

где Q – накопленная масса элемента на участке реки, кг/км; b – усредненная ширина русла реки, м; L – расстояние между двумя створами, км; h –

усредненная мощность слоя донных отложений, м; $\rho_{до}$ – усредненное значение плотности донных отложений, г/см³; $c(l)$ – математическое уравнение зависимости концентрации элемента (мг/кг) от протяженного участка реки.

Исследуемые реки были разбиты на участки между створами, в которых производился отбор проб донных отложений. Учитывались параметры длины участков рек, а также усредненные значения ширины русел рек. В качестве значений концентрации элемента на участке взяты средние значения по створам, ограничивающим участок.

Плотность донных отложений определялась расчетным путем на основе справочных значений и соотношения глинистой и песчаной фракций.

В качестве усредненной мощности слоя донных отложений была взята величина 10 см – это средняя глубина опробования на исследуемых реках. Предполагается, что именно в этом слое донного осадка, содержащие тяжелые металлы будут наиболее активно взаимодействовать с водной толщей, следовательно, и этот слой является основным источником вторичного загрязнения вод.

Результаты расчетов для рек бассейнов Тузлова и Северского Донца представлены в табл. 5. Из данных таблицы видно, что реки бассейна Северского Донца по значениям накопленных масс элементов в донных отложениях (за исключением кобальта и свинца) превосходят реки бассейна Тузлова.

Таблица 5. Накопленные массы элементов (кг/км) в донных отложениях рек Восточного Донбасса

Река	Элемент							
	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr
Бассейн р. Тузлов								
Большой Несветай	110.70	0.10	4.01	0.11	0.22	0.18	0.56	0.55
Малый Несветай	117.02	0.10	4.34	0.12	0.25	0.20	0.61	0.48
Аюта	14.83	0.01	0.54	0.02	0.03	0.02	0.07	0.06
Атюхта	22.65	0.02	0.68	0.03	0.05	0.01	0.07	0.11
Грушевка	78.83	0.07	2.68	0.08	0.15	0.08	0.36	0.50
Кадамовка	59.55	0.05	2.10	0.06	0.12	0.08	0.29	0.33
Тузлов	320.97	0.26	11.41	0.33	0.69	0.39	1.53	1.37
Среднее по бассейну	103.51	0.09	3.68	0.10	0.22	0.14	0.50	0.49
Бассейн р. Северский Донец								
Калитва	84.40	0.03	1.34	0.07	0.17	0.03	0.68	2.73
Быстрая	160.66	0.08	3.37	0.14	0.28	0.08	0.72	2.45
Кундрючья	187.73	0.09	4.22	0.15	0.33	0.04	0.43	1.23
Большая Каменка	260.52	0.14	7.39	0.27	0.46	0.12	1.16	1.82
Малая Каменка	85.36	0.05	2.63	0.09	0.15	0.04	0.35	0.58
Лихая	162.55	0.09	6.70	0.17	0.29	0.08	0.54	0.83
Большая Гнилуша	88.23	0.05	2.65	0.09	0.15	0.04	0.37	0.61
Среднее по бассейну	147.06	0.08	4.04	0.14	0.26	0.06	0.61	1.46

Таблица 6. Масса элемента (мг/км), доступная для перехода из донных отложений в речную воду

Река	Элемент				
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr
Большой Несветай	6082.66	90718.67	120.95	2801.04	68.44
Малый Несветай	6429.94	98193.74	131.98	3035.61	59.08
Аюта	814.92	12123.30	16.93	365.82	7.71
Атюхта	1244.37	15293.60	27.97	368.35	13.84
Грушевка	4331.44	60490.35	83.62	1808.12	62.27
Кадамовка	3271.96	47443.56	64.41	1443.28	40.90
Тузлов	17635.92	257949.88	369.02	7658.45	170.26

Основываясь на данных эксперимента (по пяти металлам), для рек бассейна Тузлова была рассчитана масса элемента, которая при определенных условиях (взмучивание, перемешивание) потенциально способна переходить в водную толщу (табл. 6). При этом, естественно, необходимо учитывать разбавляющую способность реки (расход воды) и химический состав воды, особенно содержание различных форм металлов.

Таким образом, для оценки потенциальной опасности вторичного загрязнения речных вод использованы два показателя: масса элемента, потенциально доступная для перехода в речную воду, и расход воды. Общие диапазоны значений этих показателей для исследуемых рек бассейна Тузлова были разбиты на четыре градации, каж-

дой из которых присваивался балл от 1 до 4. При этом интервалу значений показателя с наибольшей степенью опасности (с наибольшей массой элемента и наименьшим расходом воды в реке) присваивался высший балл. Баллы по элементам усреднялись, и выводился средний балл по доступной массе металла.

Итоговый общий балл, отражающий уровень потенциальной опасности вторичного загрязнения водной толщи, определялся по формуле (4) согласно методическому подходу, описанному в работе [14]:

$$B_{\text{общ}} = (B_1 B_2)^{1/2}, \quad (4)$$

где B_1 – оценочный балл массы элементов, потенциально доступной; B_2 – оценочный балл по рас-

Таблица 7. Промежуточные и итоговый оценочный баллы потенциальной опасности вторичного загрязнения речных вод в бассейне Тузлова

Река	Баллы по массам элемента, потенциально доступным для перехода в речную воду					Средний балл по массе (Б1)	Расход воды в устье, м ³ /с	Балл по расходу воды (Б2)	Общий оценочный балл
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr				
Большой Несветай	2	2	2	2	2	2	1.32	4	2.8
Малый Несветай	2	2	2	2	2	2	0.50	4	2.8
Аюта	1	1	1	1	1	1	0.45	4	2
Атюхта	1	1	1	1	1	1	0.13	4	2
Грушевка	1	1	1	1	2	1.2	1.47	4	2.2
Кадамовка	1	1	1	1	1	1	0.42	4	2
Тузлов	4	4	4	4	4	4	6.13	1	2

ходу воды в устье реки; $B_{общ}$ – общий балл уровня потенциальной опасности вторичного загрязнения водной толщи.

Для ранжирования исследуемых рек бассейна Тузлова нами выделено три интервала: $B_{общ} = 1.0–2.0$ – низкий, $B_{общ} = 2.1–3.0$ – средний, $B_{общ} = 3.1–4.0$ – высокий уровень.

Полученные значения общих оценочных баллов для условной оценки степени потенциальной опасности вторичного загрязнения рек приведены в табл. 7. Исходя из этих данных, реки Грушевка, Большой и Малый Несветай относятся к градации средней потенциальной опасности вторичного загрязнения, а реки Аюта, Атюхта, Тузлов и Кадамовка – низкого уровня опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Показана роль донных отложений рек углепромышленных территорий Восточного Донбасса при оценке состояния водной среды. При этом, как выяснилось, наиболее чувствительным индикатором современной гидроэкологической обстановки оказалась пелитовая фракция осадков, в то время как валовые содержания микроэлементов показывают эффект долговременного антропогенного воздействия на всю водосборную площадь.

2. Результаты экспериментальных исследований выявили, что при определенных гидродинамических условиях (ветровое взмучивание, изменение водности, проведение дноуглубительных работ и др.) донные отложения региона могут являться источником вторичного загрязнения водной толщи соединениями марганца, железа, меди, хрома и лития. На основе балльной методики проведено ранжирование рек по степени опасности их вторичного загрязнения и оценено потенциальное негативное воздействие на качество воды.

3. Полученные результаты показали, что большая часть водотоков исследуемого региона характеризуются средним и низким уровнями потенциального воздействия донных отложений на водную толщу. Тем не менее, вероятность вторичного загрязнения речных вод следует учитывать при расстановке приоритетов в водоохранной политике и разработке мероприятий, направленных на сохранение экосистем малых и средних рек Восточного Донбасса. Это позволит сохранить тенденцию стабилизации гидроэкологической обстановки в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимova Г.С., Земцова Е.С., Токарева А.Ю. Средняя плотность запасов тяжелых металлов в донных отложениях малых рек бассейна Верхней Оби – Самсоновская, Лев и Ванрас // Успехи современного естествознания. 2016. № 3. С. 110–113.
2. Гавришин А.И., Корadini А., Мохов А.В., Бондарева Л.И. Формирование химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе. Новочеркасск: УПЦ “Набла”, ЮРГТУ (НПИ), 2003. 188 с.
3. Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С. Распределение химического состава шахтных вод на территории Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. 2018. № 2. С. 5–15.
4. Давыдова О.А., Коровина Е.В., Ваганова Е.С. и др. Физико-химические аспекты миграционных процессов тяжелых металлов в природных водных системах // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Химия. 2016. Т. 8. № 2. С. 40–50.
5. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Склярченко Г.Ю., Решетняк О.С. Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий // Проблемы безопасности окружающей среды / Сб. трудов международной науч. конф. государств-членов Организации договора о коллективной безопасности. Ереван, 27–29 сентября 2016 г. Ереван: Изд-во “Гитутюн” НАН РА, 2016а. С. 85–92.
6. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно

- нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 172 с.
7. *Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Склярченко Г.Ю., Решетняк О.С.* Сравнительная оценка качества поверхностных и подземных вод Восточного Донбасса по гидрохимическим показателям // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2016. № 2. С. 91–99.
 8. *Михеева Т.Н., Шайдулина Г.Ф., Кутлиахметов А.Н. и др.* Количественная и качественная оценка роли донных отложений в процессах формирования состава контактирующих с ними водных масс // Гео-ресурсы. 2012. № 8 (50). С. 51–56.
 9. *Мохов А.В., Журбицкий Б.И., Карасев Г.К., Дымна А.И.* Влияние угольного комплекса на геэкологическую ситуацию // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. С. 129–138.
 10. *Нахшина Е.П.* Тяжелые металлы в системе “вода–донные отложения” водоемов (обзор) // Гидробиологический журн. 1985. Т. 21. № 2. С. 80–90.
 11. *Приваленко В.В.* Загрязненность поверхностных вод // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. С. 143–147.
 12. *Решетняк О.С., Закруткин В.Е.* Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. 2016. № 4. С. 102–109.
 13. *Саит Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
 14. Экологический атлас Ростовской области / под ред. В.Е. Закруткина и др. Ростов-н/Д., 2000. 120 с.
 15. *Янин Е.П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 52 с.
 16. Экологический мониторинг ликвидации перспективных шахт Восточного Донбасса / под ред. В.М. Еремеева. Шахты: ЮРО АГН, 2001. 182 с.
 17. *Gueguen C., Dominik J., Pardos M., Benninghoff C., Thomas R.L.* Partition of metals in the Vistula River and in effluents from sewage treatment plants in the region of Cracow // Lakes & Reservoirs: Research and management. 2000. № 5. P. 59–66.
 18. *Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Sklyarenko G.Y.* Changing hydrochemical indicators of the rivers of East Donbass in a consequence the liquidation of the unprofitable coal mines / 15th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2015. С. 113–120.
 19. *Zakrutkin V., Sklyarenko G., Gibkov E., Reshetnyak O., Rodina A.* Environmental problems of coal-mining territories (water pollution) / SGEM Vienna GREEN Extended Sci. Sessions, SGEM 2016. Conf. Proc., 2016. Book 3. V. 3. P. 87–94.
 20. *Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N.* Bottom Sediments of Rivers as a Natural Sorbent Material for Metals (According to Experimental Data) / 2018 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2018). Busan, Republic of Korea, August 9–11, 2018. P. 291–292.
 21. *Santschi P., Hohener P., Benoit G., Buchholz-ten Brink M.* Chemical processes at the sediment–water interface / Mar. Chem. 1990. V. 30. P. 269–315.

River Sediments as River Waters’ Primary Pollution Indicator and Secondary Pollution Source in East Donbass Coal-Mining Areas

V. E. Zakrutkin¹, E. V. Gibkov^{1, #}, O. S. Reshetnyak^{1, 2}, and V. N. Reshetnyak¹

¹Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²FGBI Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

[#]e-mail: irvict@mail.ru

For the first time for East Donbass coal-mining areas the material structure and impurity levels of small and average rivers’ bottom sediments were studied. Data of a wide range of heavy metals and minerals in bottom sediments and in the pelitic fraction (<0.01 mm), which is the most informative at assessment of river alluvium impurity degree, are obtained. As the made model experiment result data on region bottom sediments as aquatic environment secondary pollution source are obtained. It is defined that under certain hydrodynamic conditions such as wind resuspension, water discharge change, dredging etc. region river sediments can be a secondary water pollution source with compounds of manganese, iron, copper, chrome and lithium. The rivers were ranked according to the secondary pollution danger’s degree and negative impact on water quality based on the scoring method. The obtained data showed that the major part of the region rivers are characterized by medium and low levels of potential impact on the rivers aquatic environment.

Keywords: river sediments, heavy metals, river water pollution, rivers of the Eastern Donbass, coal-mining areas

REFERENCES

1. Alimova G.S., Zemtsova E.S., Tokareva A.Yu. Medium density of heavy metals stocks in bottom sediments

- of small rivers the basin of the Upper Ob – Samsonovskaya, the Lev and the Vandras. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2016, no. 3, pp. 110–113. (In Russ.).
2. Gavrishin A.I., Coradini A., Mokhov A.V., Bondareva L.I. *Formirovanie khimicheskogo sostava shakhtnykh vod v vostochnom Donbasse* [Formation of Mine Water Chemistry in the Eastern Donbass]. Novocherkassk: Nabla Publ., 2003. 188 p.
 3. Gavrishin A.I., Borisova V.E., Toropova E.S. Distribution of chemical composition of mine waters in the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*, 2018, no. 2, pp. 5–15. (In Russ.).
 4. Davydova O.A., Korovina E.V., Vaganova E.S., Guseva I.T., Krasun B.A., Isaeva M.A., Martseva T.Y., Mulyukova V.V., Klimov E.S., Buzaeva M.V. Physical-chemistry aspects of migratory processes of heavy metals in natural aqueous systems. *Vestn. Yuzhn.-Ural. Gos. Univ., Ser. Khimiya*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 40–50. (In Russ.).
 5. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. Environmental problems of coal-mining areas. In *Problemy bezopasnosti okruzhayushchei sredy* [Environmental Safety Issues]. Erevan: Gitutyun Publ., 2016, pp. 85–92. (In Russ.).
 6. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. *Poverkhnostnye i podzemnye vody v predelakh tekhnogenno narushennykh geosistem Vostochnogo Donbassa: formirovanie khimicheskogo sostava i otsenka kachestva* [Surface and Underground Water within Technogenic Damaged Geosystems of the Eastern Donbass: Formation of the Chemical Composition and Assessment of Quality]. Rostov-on-Don: Yuzhn. Fed. Univ., 2016. 172 p.
 7. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu., Reshetnyak O.S. Comparative evaluation of the quality of the Eastern Donbass surface and groundwater by the hydrochemical indicators. *Izv. VUZov. Severo-Kavkazskii Region. Ser.: Estestvennye Nauki*, 2016, no. 2, pp. 91–99. (In Russ.).
 8. Mikheeva T.N., Shaidulina G.F., Kutliakhmetov A.N., Safarova V.I., Kudasheva F.Kh., Kurbangaleev V.S. Qualitative and quantitative evaluation of the bottom sediments role in the formation of water masses composition contacting with them. *Georesursy*, 2012, no. 8 (50), pp. 51–56. (In Russ.).
 9. Mokhov A.V., Zhurbitskii B.I., Karasev G.K., Dymna A.I. Impact of the coal-mining complex on the environment. In *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Challenges and Prospects for the Integrated Development of the Eastern Donbass Mineral Resources]. Matishov G.G., Ed. Rostov-on-Don: Yuzhn. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk, 2005, pp. 129–138. (In Russ.).
 10. Nakhshina E.P. Heavy metals in water-bottom sediments system (overview). *Gidrobiol. Zh.*, 1985, vol. 21, no. 2, pp. 80–90. (In Russ.).
 11. Privalenko V.V. Impurity of a surface water. In *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya mineral'nykh resursov Vostochnogo Donbassa* [Challenges and Prospects for the Integrated Development of the Eastern Donbass Mineral Resources]. Matishov G.G., Ed. Rostov-on-Don: Yuzhn. Nauchn. Tsentr Akad. Nauk, 2005, pp. 143–147. (In Russ.).
 12. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. Bottom sediments as a source of secondary water pollution by metals (according to the laboratory experiment). *Izv. VUZov. Severo-Kavkazskii Region. Ser.: Estestvennye Nauki*, 2016, no. 4, pp. 102–109. (In Russ.).
 13. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environment Geochemistry]. Moscow: Nedra Publ., 1990. 335 p.
 14. *Ekologicheskii atlas Rostovskoi oblasti* [Ecological Atlas of Rostov Region]. Zakrutkin V.E., Ryshkov M.M., Kizitskii M.I., Smagina T.A., Shishkina D.Yu., Tsvylev E.M., Kozhin A.A., Larina T.N., Eds. Rostov-on-Don: Rostov. Gos. Univ., 2000. 120 p.
 15. Yanin E.P. *Tekhnogennye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)* [Anthropogenic Geochemical Associations in Bottom Sediments of Small Rivers (Composition, Features, Methods of Assessment)]. Moscow: IMGRE, 2002. 52 p.
 16. Ereemeev V.M. *Ekologicheskii monitoring likvidatsii neperspektivnykh shakht Vostochnogo Donbassa* [Environmental Monitoring of Elimination of non-Prospective Mines of the Eastern Donbass]. Shakhty: YuRO AGN Publ., 2001. 182 p.
 17. Gueguen C., Dominik J., Pardos M., Benninghoff C., Thomas R. Partition of metals in the Vistula River and in effluents from sewage treatment plants in the region of Cracow (Poland). *Lakes Reserv. Res. Manag.*, 2000, vol. 5, no. 2, pp. 59–66.
 18. Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Sklyarenko G.Yu. Changing hydrochemical indicators of the rivers of East Donbass in a consequence the liquidation of the unprofitable coal mines. In *15th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2015, pp. 113–120.
 19. Zakrutkin V., Sklyarenko G., Gibkov E., Reshetnyak O., Rodina A. Environmental problems of coal-mining territories (water pollution). In *SGEM Vienna GREEN Extended Sci. Sessions, SGEM 2016. Conf. Proc.*, 2016, book 3, vol. 3, pp. 87–94.
 20. Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N. Bottom sediments of rivers as a natural sorbent material for metals (according to experimental data). In *Int. Conf. on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2018)*. Busan, Republic of Korea, 2018, pp. 291–292.
 21. Santschi, P., Hohener P., Benoit G., Buchholz-ten Brink M. Chemical processes at the sediment–water interface. *Mar. Chem.*, 1990, vol. 30, pp. 269–315. doi 10.1016/0304-4203(90)90076-O