

УДК 504.064

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ РЕК ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА: СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ И ЗАРУБЕЖНЫМ КРИТЕРИЯМ

© 2021 г. В. Е. Закруткин^а, В. Н. Решетняк^{а, б}, О. С. Решетняк^{а, с, *}, Е. В. Гибков^а

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

^бВсероссийский научно-исследовательский геологический институт угля, Ростов-на-Дону, Россия

^сГидрохимический институт, Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: olgare1@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2020 г.

После доработки 20.03.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Изучено распределение тяжелых металлов в донных отложениях рек в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса (в бассейнах Северского Донца и Тузлова). Содержание тяжелых металлов варьируется в широких пределах. При этом наибольшие концентрации характерны для железа и марганца, наименьшие — для свинца и кобальта. Для оценки уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами использована выделенная из них пелитовая фракция, которая не только доминирует в большинстве проб донных осадков, является концентратом большинства тяжелых металлов, но, что очень важно, обладает наилучшими индикаторными свойствами при характеристике загрязненности речных экосистем. В работе использованы общепринятые отечественные и зарубежные показатели — суммарный показатель загрязнения (Z_c), факторы загрязнения (C_f) и степень загрязнения (C_d), индекс геоаккумуляции (I_{geo}), а в качестве условного фона для пелитовой фракции использовались кларки глин и глинистых сланцев. Уровень загрязненности тяжелыми металлами донных отложений рек в бассейнах Северского Донца и Тузлова относится к категории “умеренный” по C_d , “низкий” или переходный “от низкого до умеренного” по индексу геоаккумуляции и “слабый” по Z_c . В целом же в бассейне Тузлова загрязненность металлами донных отложений выше, чем в бассейне Северского Донца, что связано с более интенсивной техногенной нагрузкой. Результаты использования различных подходов оказались вполне сопоставимыми, и в целом уровень загрязненности донных отложений рек в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса можно охарактеризовать как низкий.

Ключевые слова: бассейн Тузлова, бассейн Северского Донца, пелитовая фракция, суммарный показатель загрязнения, индекс геоаккумуляции

DOI: 10.31857/S2587556621040130

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, донные отложения являются важнейшим элементом аквальных ландшафтов и служат конечным звеном местных ландшафтных сопряжений. Считается, что по их составу можно судить о геохимических особенностях природной среды и степени техногенной нагрузки на ландшафты всего водосбора. В то же время донные отложения играют двоякую роль, являясь одновременно и аккумулятором загрязняющих веществ и, при определенных условиях, источником вторичного загрязнения воды (Закруткин и др., 2020а, б; Решетняк, Закруткин, 2016). В последнее время на фоне усиливающейся антропоген-

ной нагрузки на водные экосистемы суши концентрации различных загрязняющих веществ в донных отложениях на порядок выше, чем их концентрация в водной толще, и особенно это характерно для территорий с развитой промышленностью.

Территория восточной части Донецкого угольного бассейна (сокращенно — Восточный Донбасс) с физико-географической точки зрения разделяется на три зоны: северную, соответствующую бассейну Северского Донца, центральную (водораздельный Донецкий Кряж) и южную, включающую бассейн р. Тузлов.

Бассейн Северского Донца располагается в зоне умеренно-засушливого подтипа степных ландшафтов, геологический фундамент которых образован толщей пород каменноугольного возраста — песчаниками, глинистыми сланцами, известняками и ископаемыми углями. В геоморфологическом отношении это допалеоген- и палеоген-четвертичная грядово-холмистая равнина с сильным овражно-балочным расчленением на складчатом основании. Преобладающими типами почв являются южные и обыкновенные черноземы (Закруткин и др., 2016).

В бассейне р. Тузлов основу геоморфологического строения составляет плиоценовые и четвертичные равнины с умеренным овражно-балочным расчленением на моноклинально залегающих породах палеоген-неогенового возраста, в составе которых преобладают известняки-ракушечники и аллювиальные пески. В северной части на поверхность выходят породы карбона аналогичные по литологическому составу породам бассейна Северского Донца. Малое количество осадков, наряду с высокой испаряемостью определило преобладание здесь засушливого подтипа степных ландшафтов, развивающихся на черноземах обыкновенных (Закруткин и др., 2016).

Среди перечисленных природных факторов, влияющих на распределение химических элементов в ландшафте, особого внимания заслуживает состав выходящих на дневную поверхность горных пород, определяющий региональный геохимический фон поверхностных вод и донных отложений, а также других компонентов окружающей природной среды.

С геохимической точки зрения Восточный Донбасс представляет собой природно-техногенную аномальную зону, природные комплексы которой на протяжении длительного времени испытывают значительную антропогенную нагрузку, в общей доле которой основную роль играют объекты добычи и переработки угля (Закруткин и др., 2016).

Негативное влияние на природную среду резко усилилось в последние десятилетия в связи с реструктуризацией угольной промышленности, которая предусматривала ликвидацию нерентабельных шахт. К началу реструктуризации в Восточном Донбассе действовало 59 шахт, из них большая часть (47) была закрыта. При этом 45 шахт были ликвидированы путем затопления и только 2 — способом “сухой консервации”. Закрытие шахт осуществлялось на фоне глубокого экономического кризиса 1990-х годов, в связи с чем мероприятия по снижению экологических последствий проводились крайне ограничено, без единого системного подхода. Это в конечном счете привело к тому, что вместо оздоровления экологической обстановки, ожидавшейся при реструктуризации угольной отрасли, произошло ее

ухудшение. В результате затопления нерентабельных шахт массовым явлением стал самоизлив высокоминерализованных техногенных вод на дневную поверхность, что оказывало существенное влияние на качество речных вод (Гибков и др., 2020; Закруткин и др., 2016).

В большей степени подобному влиянию подвержены малые реки. С шахтными водами в реки поступает огромное количество тяжелых металлов, среди которых соединения железа, марганца, стронция, меди, а также сульфатов. При этом меняется химический состав не только водной толщи, но и донных отложений, происходит преобразование и минерального состава донных осадков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования донных отложений рек Восточного Донбасса проводились в период 2014–2019 гг. В качестве объектов исследования выбраны реки двух бассейнов: Северского Донца (Калитва, Кундрючья, Быстрая, Лихая, Большая Гнилуша, Большая и Малая Каменка) и Тузлова (Большой и Малый Несветай, Аюта, Грушевка, Кадамовка и Атюхта), испытывающие разный уровень антропогенного воздействия.

Особое внимание уделялось малым рекам региона, так как они имеют низкую самоочищаемость и являются чувствительным индикатором общего экологического состояния водосборных территорий. Именно на водосборах малых рек начинают формироваться негативные изменения в окружающей природной среде (Закруткин и др., 2020a).

Отбор проб донных отложений проводили в створах, расположенных в верховьях рек, на участках выше влияния источников загрязнения; в низовьях рек для оценки суммарного влияния различных техногенных источников загрязнения на водосборах, а также в районах расположения объектов угледобывающей промышленности (действующие и ликвидированные шахты, места сброса шахтных вод и т.п.). Схема расположения створов представлена на рис. 1.

В связи с неоднородностью донных отложений в каждом створе производили отбор нескольких проб, обычно от 3 до 5. Опробование донных отложений осуществлялось преимущественно из верхнего слоя мощностью 10–20 см. Предполагается, что именно в этом диапазоне содержащиеся в донных отложениях загрязняющие вещества будут наиболее активно взаимодействовать с водной толщей рек. На небольших и неглубоких водотоках отбирали пробы по поперечному профилю реки, на средних — у уреза воды в местах видимой аккумуляции наносов.

Отбор проб для проведения эколого-геохимических исследований донных отложений прово-

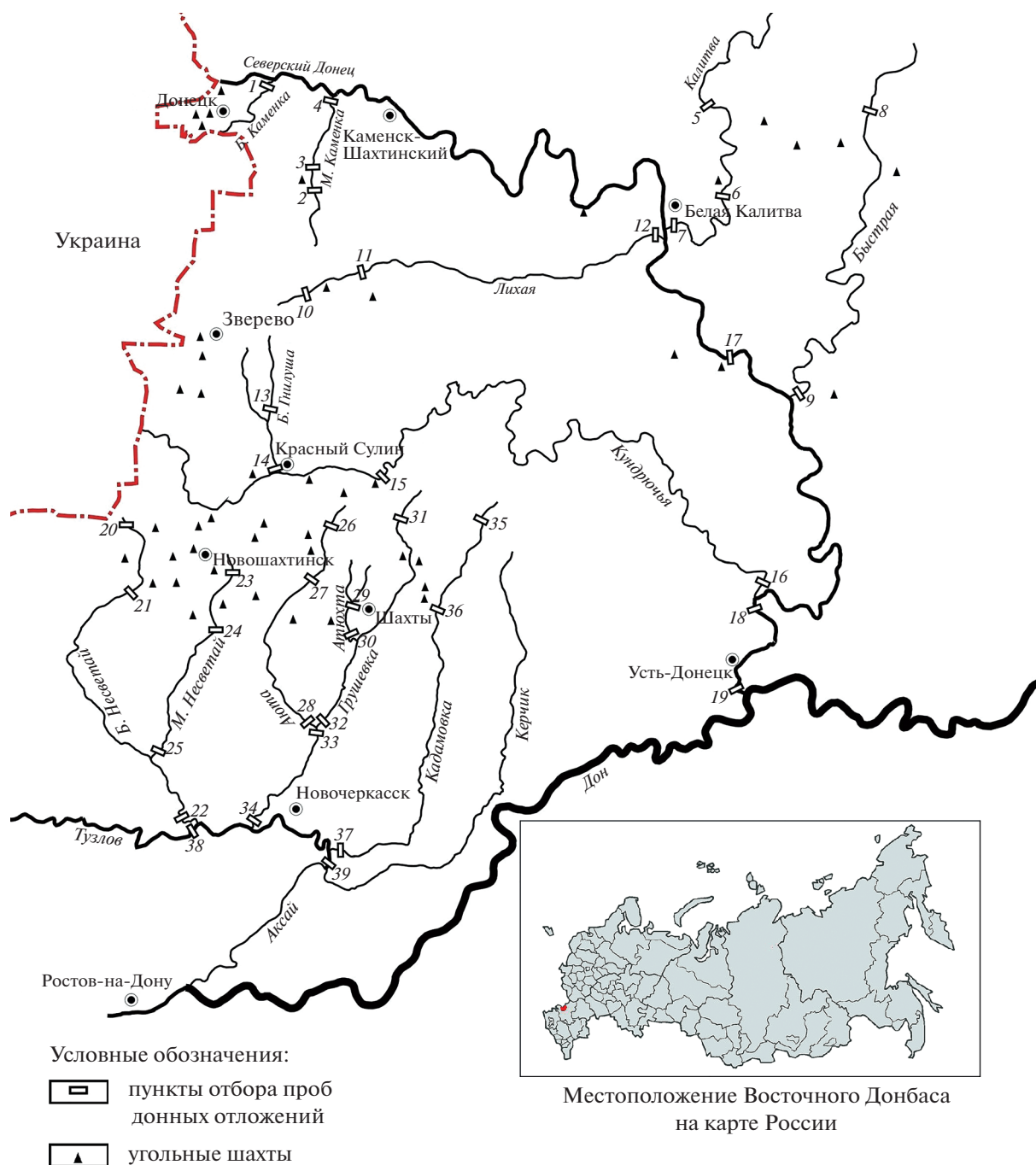


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб донных отложений рек Восточного Донбасса.

дили согласно нормативным документам (ГОСТ 17.1.5.01-80) с использованием дночерпателя и ручных пробоотборников. Масса отбираемых проб в каждом створе составляла от 1000 до 1500 г. После морфологического описания пробы донных осадков были высушены до воздушно-сухого состояния. Далее был произведен гранулометрический анализ осадка, определен минеральный состав выделенных фракций. Подготовленные подобным образом пробы передавались в

лабораторию для определения содержания тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра "Квант-2АТ".

Для оценки степени загрязненности донных отложений рек Восточного Донбасса были использованы следующие общепринятые отечественные и зарубежные показатели: суммарный показатель загрязнения Z_c (Саэт и др., 1990;

Таблица 1. Шкала оценки загрязненности донных отложений рек по индексу геоаккумуляции (I_{geo}) по (Abraham, Parker, 2008)

Класс	Значение I_{geo}	Характеристика уровня загрязненности донных отложений
0	<0	Низкий
1	0–1	От низкого до умеренного
2	1–2	Умеренный
3	2–3	От умеренного до высокого
4	3–4	Высокий
5	4–5	От высокого до чрезвычайно высокого
6	>5	Чрезвычайно высокий

Янин, 2002), факторы загрязнения (contamination factors, C_f) и степень загрязнения (degree of contamination, C_d), предложенные в (Nakanson, 1980), индекс геоаккумуляции (Geoaccumulation index, I_{geo}) (Müller, 1969). Несмотря на то, что данные критерии разработаны много лет назад, они до сих пор не потеряли своей актуальности и широко используются в последнее время (Abraham, Parker, 2008; Cao et al., 2014; Nasrabadi et al., 2010; Pazi, 2016; Raza et al., 2016).

Фактор загрязнения (C_f) представляет собой отношение концентрации элемента в исследуемых донных отложениях к его доиндустриальному (фоновому) содержанию или кларку элемента в определенной части литосферы или земной коры в целом (Nakanson, 1980) и рассчитывается по формуле (1):

$$C_f = \frac{C_x}{C_b}, \quad (1)$$

где C_x — содержание элемента в исследуемых донных отложениях, C_b — фоновое содержание или кларк элемента.

Факторы концентрации по элементам для определенного C_d створа используются при подсчете степени загрязненности донных отложений (C_d), которая определяется по формуле (2):

$$C_d = \sum_{i=1}^8 C_f^i. \quad (2)$$

Для оценки уровня загрязнения донных отложений разработана шкала (Nakanson, 1980), которая соотносит получаемые значения с уровнем загрязнения донных отложений. Если в исследовании использованы данные по 8 элементам, то критерии оценки следующие: при $C_d < 8$ уровень загрязнения — слабый, $8 < C_d < 16$ — умеренный, $16 < C_d < 32$ — значительный и при $C_d > 32$ — очень высокий.

Индекс геоаккумуляции (I_{geo}), предложенный в (Müller, 1969), позволяет оценить степень загрязнения донных отложений элементами по шкале из семи классов на основе увеличения числовых значений индекса. Этот индекс рассчитывается следующим образом согласно формуле (3):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_x}{1.5C_b}, \quad (3)$$

где C_x — содержание элемента в исследуемых донных отложениях, C_b — фоновое содержание или кларк элемента.

Коэффициент 1.5 вводится для минимизации влияния возможных вариаций фоновых значений содержания элемента в донных отложениях. Шкала оценки загрязнения донных отложений рек по индексу геоаккумуляции представлена в табл. 1. Обращает на себя внимание тот факт, что в этой шкале помимо основных градаций уровня загрязненности (низкий — умеренный — высокий — чрезвычайно высокий) присутствуют также и промежуточные, характеризующие переход от одного состояния к другому. Значениям индексов геоаккумуляции изучаемых элементов по створам присваивается соответствующее значение класса I_{geo} , после чего по минимальному и максимальному значениям класса присваивается характеристика качества донных отложений в целом для створа (реки), например, 0–3, “от низкого до умеренного и высокого”.

В нашей стране оценка уровня загрязненности донных отложений осуществляется в основном в соответствии с рекомендациями, разработанными в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) (Сает и др., 1990; Янин, 2002).

При этом на первом этапе для характеристики техногенных геохимических аномалий в донных отложениях рек рассчитываются коэффициенты концентрации (K_c) химических элементов (относительно их фоновых содержаний) для определе-

ния формулы геохимической ассоциации, включающей элементы со значениями K_c не менее 1.5 (предполагается, что концентрация элемента в 1.5 раза превышающая фон, превосходит природную вариацию, т.е. является минимально-аномальным содержанием). На втором этапе определяется суммарный показатель загрязнения Z_c , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации (K_c) элементов, входящих в геохимическую ассоциацию, согласно формуле (4):

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n-1), (4)$$

где K_c — коэффициенты концентрации элементов; n — количество элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

С учетом того, что донные отложения рек бассейнов Северского Донца и Тузлова характеризуются большим разнообразием гранулометрического состава, который, несомненно, оказывает существенное влияние на содержание микроэлементов, нами для сравнения степени загрязненности донных отложений в разных речных створах использованы не валовые пробы, а выделенные из них пелитовые фракции размером менее 0.01 мм. Это оправдано по ряду причин. Во-первых, пелитовая составляющая доминирует в большинстве проб донных осадков. Во-вторых, она является основным носителем большинства изученных элементов. В-третьих, именно пелитовая фракция, находясь в наиболее длительном контакте с водной средой, лучше всего сохраняет информацию о ее состоянии. И, наконец, изучая пелитовую фракцию донных отложений рек Восточного Донбасса, мы соблюдаем основное требование в сравнительной геохимии — однородность выборки (Гибков и др., 2020).

В качестве условного фона для пелитовой фракции использовались кларки глин и глинистых сланцев (Turekian, Wedepohl, 1961), поскольку определение достоверных параметров регионального фона в пределах техногенно нарушенных геосистем представляет собой чрезвычайно сложную, а иногда и нерешаемую задачу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали исследования, 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, преобладает песчано-алевритовый компонент (12–92%, в среднем 54%), а в бассейне Тузлова — пелитовый (34–76%, в среднем 65%), что подтверждается данными на рис. 2, где демонстрируется положение фигуративных точек донных отложений в том или

ином поле диаграммы Шеппарда. Из нее видно, что донные осадки бассейна Тузлова в большей степени сосредоточены в переходной от песков к глинам зоне, в то время как осадки рек Северского Донца характеризуются более разнородным составом.

Минеральный состав донных осадков отличается большим разнообразием. Пелитовая их фракция состоит преимущественно из глинистых минералов (гидрослюда с примесью монтмориллонита и каолинита). В подчиненных количествах присутствуют чешуйки слюды, современное органическое вещество, кальцит и частицы угля (Закруткин и др., 2016).

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) присутствуют мелкие обломки песчаника, углистых аргиллитов, алевролитов, карбонатов и кремнистых пород.

В составе тяжелой фракции преобладают терригенные минералы (ильменит, магнетит и гематит), на долю которых приходится в среднем 75% от общего состава фракции для рек бассейна Северского Донца и 80% — для бассейна Тузлова. К группе второстепенных относятся циркон, рутил, кианит, ставролит, турмалин. Существенно реже встречаются мусковит, биотит, амфиболы, хромит и хромшпинелиды (Закруткин и др., 2016).

В распределении тяжелых металлов в донных осадках изучаемых рек обнаружены как общие черты, так и некоторые различия. Так, в донных отложениях в бассейне Северского Донца установлены следующие содержания элементов (76 проб) в порядке их убывания: железа — от 5500 до 26600 мг/кг (в среднем 17647 мг/кг), марганца — от 170 до 4000 мг/кг (1041 мг/кг), никеля — от 13 до 300 мг/кг (75 мг/кг), цинка — от 42 до 300 мг/кг (116 мг/кг), хрома — от 36 до 150 мг/кг (79 мг/кг), меди — от 15 до 100 мг/кг (42 мг/кг), свинца — от 10 до 57 мг/кг (32 мг/кг) и кобальта — от 5 до 50 мг/кг (21 мг/кг).

В донных отложениях бассейна Тузлова (74 пробы) также доминируют железо (14800–39200 мг/кг, в среднем 30739 мг/кг) и марганец (414–3400 мг/кг, в среднем 1145 мг/кг), а в наименьших количествах присутствуют свинец (10–107 мг/кг, в среднем 30 мг/кг) и кобальт (7–28 мг/кг, в среднем 16 мг/кг), но иначе выглядит последовательный ряд остальных элементов: хром (91–840 мг/кг, в среднем 256 мг/кг), цинк (43–300 мг/кг, в среднем 121 мг/кг), медь (17–200 мг/кг, в среднем 58 мг/кг) и никель (22–116 мг/кг, в среднем 57 мг/кг).

Сравнивая речные бассейны между собой, следует подчеркнуть, что концентрации металлов в донных отложениях рек бассейна Тузлова вы-

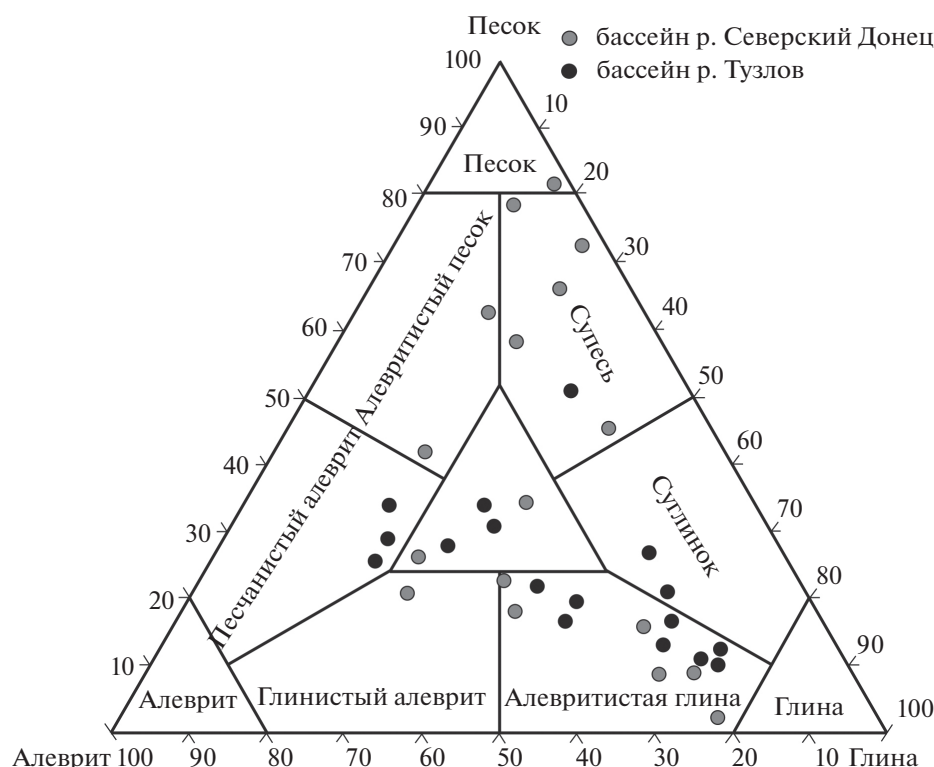


Рис. 2. Гранулометрический состав донных отложений рек Восточного Донбасса (Гибков и др., 2020).

ше, чем в бассейне Северского Донца. Связано это, в первую очередь, с более высокой техногенной нагрузкой в бассейне Тузлова и большим негативным влиянием техногенных шахтных вод — основного источника загрязнения малых рек, о чем подробнее будет сказано ниже.

Факторы загрязнения и степень загрязнения

На основе концентраций элементов в пелитовой фракции были рассчитаны факторы загрязнения по каждому элементу, сумма значений которых дает возможность судить о степени загрязнения донных отложений. Результаты расчетов данных показателей приведены в табл. 2. Из нее видно, что для рек бассейна Северского Донца значения фактора загрязнения, превышающие 1.0, характерны для следующих металлов: Pb (по всем рекам); Zn (по 5 рекам); Mn и Co (по 4 рекам); по остальным элементам — в единичных случаях. Исключением является Fe, для которого не выявлено превышения кларка ни в одном створе. В среднем по бассейну наибольшие значения факторов загрязнения характерны для Pb (1.7), Mn (1.3), Zn (1.2) и Co (1.1), для остальных элементов они не превышают 1.0.

Несколько отличается распределение значений фактора загрязнения донных отложений ме-

таллами в бассейне Тузлова. Как видно из данных табл. 2, здесь наибольшим значением данного показателя отличается Cг (в среднем 2.7), что отмечено во всех семи реках бассейна. Далее следует Pb, превышение которого над кларком (в среднем в 1.5 раза) наблюдается во всех реках, кроме Тузлова. Остальные элементы в зависимости от средних значений данного показателя, превышающих 1.0, располагаются в такой последовательности: Cu (1.4), Zn (1.3), Mn (1.2).

Сравнение значений факторов загрязнения металлами донных отложений показало, что как по абсолютным их значениям, так и по степени загрязнения ситуация несколько хуже в бассейне Тузлова, где данные показатели выше, чем в бассейне Северского Донца.

Индекс геоаккумуляции

Результаты расчета данного индекса (табл. 3) показали, что среди рек бассейна Северского Донца наиболее загрязненной является Большая Гнилуша, донные отложения которой характеризуются “умеренным” уровнем загрязненности по Mn и переходным — “от низкого до умеренного” по пяти элементам из восьми. Для остальных рек отклонения от “низкого” уровня загрязненности наблюдаются только по 1–2 элементам, чаще всего

Таблица 2. Значения факторов загрязнения (C_f) и степеней загрязнения (C_d) донных отложений рек Восточного Донбасса

Река	C_f								C_d
	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	
Бассейн Северского Донца									
Большая Каменка	0.5	1.2	1.3	1.0	1.0	2.4	1.3	1.0	9.8
Малая Каменка	0.4	1.0	0.8	0.9	0.8	2.2	1.3	0.9	8.3
Лихая	0.4	1.9	2.1	1.4	1.4	1.5	1.4	1.0	11.1
Калитва	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	1.2	0.6	0.6	4.8
Быстрая	0.4	0.7	0.7	0.7	0.5	1.5	0.9	0.8	6.2
Кундрючья	0.4	1.2	1.3	0.8	1.0	1.9	1.3	1.0	9.0
Большая Гнилуша	0.4	1.9	3.2	1.5	2.6	1.6	2.2	1.3	14.6
Северский Донец	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	1.0	0.9	0.5	3.8
Среднее по бассейну	0.4	1.1	1.3	0.9	1.0	1.7	1.2	0.9	8.5
Бассейн Тузлова									
Большой Несветай	0.6	0.7	2.0	0.7	0.6	1.4	0.9	1.5	8.5
Малый Несветай	0.6	1.2	2.0	0.7	1.2	1.2	1.2	3.2	11.2
Аюта	0.7	0.7	0.7	1.0	0.8	2.7	1.3	4.0	11.7
Атюхта	0.7	0.7	0.5	1.3	0.9	2.0	1.6	3.0	10.7
Грушевка	0.8	0.9	2.1	1.6	1.0	1.3	1.5	4.7	13.8
Кадамовка	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	1.1	0.7	1.3	6.2
Тузлов	—	1.1	0.8	3.9	0.8	0.9	2.1	1.1	10.7
Среднее по бассейну	0.7	0.8	1.2	1.4	0.8	1.5	1.3	2.7	10.4

Примечание. Цветом выделен уровень загрязнения донных отложений: зеленый – слабый; желтый – умеренный.

по Pb. Уровень загрязненности донных отложений рек в бассейне Северского Донца тяжелыми металлами можно в целом оценить как “низкий”.

Для рек бассейна Тузлова значения индексов геоаккумуляции выше, чем для рек бассейна Северского Донца, особенно по хрому (см. табл. 3). Для большинства рек бассейна Тузлова по этому элементу наблюдается переходный уровень загрязненности от “низкого к умеренному” или “умеренный”. Наиболее загрязненными являются рр. Атюхта и Грушевка, в донных отложениях которых отклонение от “низкого” уровня выявлено по трем элементам.

Таким образом, при использовании зарубежных показателей получается очень близкая картина: наименее загрязненными являются донные отложения рр. Калитва, Быстрая, Северский Донец в бассейне Северского Донца и р. Кадамовка в бассейне Тузлова. Самыми загрязненными соответственно являются донные осадки рр. Большая Гнилуша и Грушевка. В целом же уровень загрязненности донных отложений рек обоих бас-

сейнов характеризуется как “умеренный” (по C_d), “низкий” или переходный “от низкого до умеренного” (по I_{geo}). Однако при этом для бассейна Северского Донца загрязненность металлами донных отложений в среднем ниже, чем для бассейна Тузлова.

Суммарный показатель Z_c

Для оценки степени загрязненности донных осадков по этому показателю использовались содержания того же набора элементов в пелитовой фракции, что и при оценке по зарубежным критериям. В результате проведенных расчетов выявлено, что уровень загрязненности донных отложений рек в данном регионе преимущественно слабый и только в рр. Грушевка и Кадамовка отмечается средняя степень загрязненности речных осадков (табл. 4).

Сравнительная оценка уровней загрязненности донных отложений тяжелыми металлами с использованием отечественных и зарубежных

Таблица 3. Индексы геоаккумуляции (I_{geo}) металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса

Река	I_{geo}								Интервал I_{geo}
	Fe	Co	Mn	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	
Бассейн Северского Донца									
Большая Каменка	−1.53	−0.38	−0.18	−0.53	−0.56	0.69	−0.16	−0.58	0—1
Малая Каменка	−1.79	−0.65	−0.87	−0.80	−0.84	0.53	−0.16	−0.70	0—1
Лихая	−1.78	0.31	0.51	−0.11	−0.10	−0.01	−0.06	−0.62	0—1
Калитва	−2.54	−1.46	−1.76	−1.48	−1.58	−0.29	−1.21	−1.32	0
Быстрая	−1.98	−1.01	−1.15	−1.02	−1.51	−0.04	−0.78	−0.84	0
Кундрючья	−1.74	−0.37	−0.18	−0.83	−0.60	0.37	−0.22	−0.63	0—1
Большая Гнилуша	−1.83	0.36	1.08	0.02	0.80	0.05	0.52	−0.22	0—2
Северский Донец	−3.35	−2.11	−2.57	−1.95	−2.44	−0.53	−0.76	−1.70	0
Среднее	−2.07	−0.66	−0.64	−0.84	−0.86	0.10	−0.35	−0.83	0—1
Бассейн Тузлова									
Большой Несветай	−1.36	−1.08	0.40	−1.11	−1.21	−0.07	−0.77	0.02	0—1
Малый Несветай	−1.41	−0.37	0.41	−1.05	−0.38	−0.33	−0.33	1.09	0—2
Аюта	−1.1	−1.17	−1.17	−0.66	−0.96	0.85	−0.26	1.41	0—2
Атюхта	−1.03	−1.12	−1.45	−0.22	−0.76	0.40	0.10	1.00	0—2
Грушевка	−0.96	−0.75	0.46	0.10	−0.60	−0.16	−0.01	1.63	0—2
Кадамовка	−1.37	−1.34	−1.14	−1.27	−1.29	−0.50	−1.08	−0.18	0
Тузлов	—	−0.51	−0.87	1.37	−0.89	−0.78	0.49	−0.43	0—2
Среднее	−1.20	−0.91	−0.48	−0.40	−0.87	−0.08	−0.26	0.65	0—1

Примечание. Цветом выделен уровень загрязнения донных отложений по I_{geo} согласно табл. 1.

подходов показала вполне сопоставимые результаты. В целом уровень загрязненности донных отложений рек в бассейнах Северского Донца и Тузлова характеризуется как “слабый” (по Z_c), “умеренный” или переходный “от низкого до умеренного” (по C_d и I_{geo}) (см. табл. 4) с тенденцией ухудшения гидроэкологической ситуации в бассейне Тузлова. Это обусловлено, в первую очередь, различиями в степени техногенного воздействия на водосборах. Так, в бассейне Тузлова концентрируется большее количество действующих и ликвидированных шахт, и, по нашим данным (Закруткин и др., 2010), в притоки Тузлова ежегодно сбрасывается около 363 375 т различных загрязнителей, в том числе макрокомпонентов (сульфатов, ионов натрия и калия, хлоридов и гидрокарбонатов) и микрокомпонентов (железа, марганца, меди, стронция, алюминия и др.), что почти в 9 раз выше суммарного количества загрязняющих веществ, поступающих в бассейн Северского Донца (42 128 т/год).

ВЫВОДЫ

1. Химический состав донных отложений техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса (в пределах водосборов рр. Северский Донец и Тузлов) характеризуется схожим набором элементов (тяжелых металлов), концентрация которых варьирует в широких пределах. Наибольшее содержание металлов в донных отложениях рек обоих бассейнов принадлежит железу и марганцу, наименьшее – свинцу и кобальту. В целом концентрация металлов в донных отложениях рек бассейна Тузлова выше, чем в бассейне Северского Донца.

2. Оценка загрязненности донных отложений тяжелыми металлами с использованием различных показателей (Z_c , C_d и I_{geo}) позволяет отнести их преимущественно к слабому или низкому уровню. В целом же в бассейне Тузлова загрязненность металлами донных отложений выше, чем в бассейне Северского Донца, что связано с более интенсивной техногенной нагрузкой.

Таблица 4. Загрязненность донных отложений рек Восточного Донбасса тяжелыми металлами по различным показателям

Река	Z_c	Уровень загрязненности донных отложений по индексу:		
		Z_c	C_d	I_{geo}
Бассейн Северского Донца				
Большая Каменка	6.0	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Малая Каменка	5.4	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Лихая	7.7	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Калитва	2.4	Слабый	Слабый	Низкий
Быстрая	3.1	Слабый	Слабый	Низкий
Большая Гнилуша	11.9	Средний	Умеренный	От низкого до умеренного
Кундрючья	5.2	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Северский Донец	1.0	Слабый	Слабый	Низкий
Бассейн Тузлова				
Большой Несветай	4.4	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Малый Несветай	6.3	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Аюта	7.2	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Атюхта	6.9	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного
Грушевка	14.1	Средний	Умеренный	От низкого до умеренного
Кадамовка	2.8	Слабый	Слабый	Низкий
Тузлов	5.9	Слабый	Умеренный	От низкого до умеренного

3. Результаты использования различных подходов оказались вполне сопоставимыми, и в целом уровень загрязненности донных отложений рек в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса можно охарактеризовать как “низкий” или “от низкого до умеренного”.

Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для разработки и совершенствования региональной системы оценки качества воды и донных отложений рек Восточного Донбасса, а также для оценки экологического риска для населения, активно использующего речные воды в качестве источника питьевого водоснабжения и в технических целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гибков Е.В., Закруткин В.Е., Решетняк В.Н., Решетняк О.С. Эколого-геохимические особенности донных отложений рек Восточного Донбасса // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 1. С. 36–46.
- Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С., Решетняк В.Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020а. Т. 84. № 2. С. 259–271.
- Закруткин В.Е., Иваник В.М., Гибков Е.В. Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 94–102.
- Закруткин В.Е., Коронкевич Н.И., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2004. 252 с.
- Закруткин В.Е., Решетняк О.С., Бакаева Е.Н. Гидро-экологические особенности поверхностных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020б. Т. 84. № 3. С. 451–460.
- Закруткин В.Е., Складенко 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: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. 172 с.
- Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2016. № 4. С. 102–109.
- Саит Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 52 с.
- Abraham G.M.S., Parker R.J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland,

- New Zealand // *Environ. Monit. Assess.* 2008. Vol. 36. P. 227–238.
- Cao X., Shao Y., Deng W. et al. Spatial distribution and potential ecologic risk assessment of heavy metals in the sediments of the Nansi Lake in China // *Environ. Monit. Assess.* 2014. Vol. 186. P. 8845–8856.
- Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach // *Wat. Res.* 1980. Vol. 14. P. 975–1001.
- Müller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River // *Geojournal.* 1969. Vol. 2. P. 108–118.
- Nasrabadi T., Nabi Bidhendi G., Karbassi A. et al. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin // *Environ. Monit. Assess.* 2010. Vol. 171. P. 395–410.
- Pazi I. Assessment of heavy metal contamination in Canderli Gulf sediment, Eastern Aegean Sea // *Environ. Monit. Assess.* 2011. Vol. 174. P. 199–208.
- Raza A., Farooqi A., Javed A. et al. Distribution, enrichment, and source identification of selected heavy metals in surface sediments of the Siran River, Mansehra, Pakistan // *Environ. Monit. Assess.* 2016. Vol. 188. P. 572.
- Turekian K.K., Wedepohl D.H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust // *Bulletin Geol. Soc. of America.* 1961. Vol. 72. P. 175–192.

River Bottom Sediments of Technogenic Disturbed Geosystems of the Eastern Donbas: Comparative Assessment of Pollution Level with Heavy Metals by Russian and International Criteria

V. E. Zakrutkin¹, V. N. Reshetnyak^{1, 2}, O. S. Reshetnyak^{1, 3, *}, and E. V. Gibkov¹

¹South Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²All-Russian Research Institute of Coal Exploration, Rostov-on-Don, Russia

³Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

*e-mail: olgare1@mail.ru

The content distribution of heavy metals in river sediments within the technogenic disturbed geosystems of the Eastern Donbas (in the Seversky Donets and Tuzlov river basins) is studied. The content of heavy metals varies widely. At the same time, the highest concentrations are characteristic of iron and manganese and the lowest concentrations—of lead and cobalt. To assess the level of bottom sediments contamination with heavy metals we used the fraction <0.01 mm (pelitic fraction) extracted from gross samples. This fraction not only dominates most of sediments' samples but concentrates a major part of heavy metals, and has the best indicator properties when characterizing the pollution of river ecosystems. The work used generally accepted Russian and international indices such as total pollution index (Z_p), contamination factor (C_p), degree of contamination (C_d), geoaccumulation index (I_{geo}); in addition average continental shale values were used as a base-line concentration for the fraction <0.01 mm. The heavy metal pollution level of river bottom sediments in the Seversky Donets and Tuzlov river basins is classified as “moderate” by the degree of contamination index and “uncontaminated” or “uncontaminated to moderately contaminated” by the geoaccumulation index, and “low” by total pollution index. In general metal contamination of river sediments is lower in the Seversky Donets basin than in the Tuzlov basin, which is associated with a more intense anthropogenic load. The results of using different indices seem to be comparable. Generally, the pollution level of river bottom sediments within the technogenic disturbed geosystems of the Eastern Donbas can be described as relatively low.

Keywords: Tuzlov River Basin, Seversky Donets River Basin, pelitic fraction, total pollution index, geoaccumulation index

REFERENCES

- Abraham G.M.S., Parker R.J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environ. Monit. Assess.*, 2008. vol. 136, pp. 227–238.
- Cao X., Shao Y., Deng W. et al. Spatial distribution and potential ecologic risk assessment of heavy metals in the sediments of the Nansi Lake in China. *Environ. Monit. Assess.*, 2014, vol. 186, pp. 8845–8856.
- Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Ecological and geochemical features of river sediments of the East Donbas. *Izv. Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye Nauki*, 2020, no. 1, pp. 36–46. (In Russ.).
- Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Res.*, 1980, vol. 14, pp. 975–1001.
- Müller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
- Nasrabadi T., Nabi Bidhendi G., Karbassi A. et al. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin. *Environ. Monit. Assess.*, 2010, vol. 171, pp. 395–410.

- Pazi I. Assessment of heavy metal contamination in Candarli Gulf sediment, Eastern Aegean Sea. *Environ. Monit. Assess.*, 2011, vol. 174, pp. 199–208.
- Raza A., Farooqi A., Javed A. et al. Distribution, enrichment, and source identification of selected heavy metals in surface sediments of the Siran River, Mansehra, Pakistan. *Environ. Monit. Assess.*, 2016, vol. 188, 572 p.
- 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-Kavkazskiy Region. Estestvennye Nauki*, 2016, no. 4, pp. 102–109. (In Russ.).
- Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental Geochemistry]. Moscow: Nedra Publ., 1990, 335 p. (In Russ.).
- Turekian K.K., Wedepohl D.H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1961, vol. 72, pp. 175–192.
- Yanin E.P. *Tekhnogennye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)* [Technogenic Geochemical Associations in the Bottom Sediments of Small Rivers (composition, features, assessment methods)]. Moscow: IMGRE, 2002, 52 p. (In Russ.).
- Zakrutkin V.E., Gibkov E.V., Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N. River Sediments as River Waters' Primary Pollution Indicator and Secondary Pollution Source in East Donbass Coal-Mining Areas. *Izv. RAN. Ser. Geogr.* 2020a, vol. 84, no. 2, pp. 259–271. (In Russ.).
- Zakrutkin V.E., Ivanik V.M., Gibkov E.V. Ecological and geographical analysis of coal industry restructuring risks in Eastern Donbass. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 94–102. (In Russ.).
- Zakrutkin V.E., Koronkevich N.I., Shishkina D.Yu., Dolgov S.V. *Zakonomernosti antropogennogo preobrazovaniya malykh vodosborov stepnoi zony Yuga Rossii* [Patterns of Anthropogenic Transformation of Small Catchment Areas of the Steppe Zone of the South of Russia]. Rostov-on-Don: Rostov. Univ. Publ., 2004, 252 p. (In Russ.).
- Zakrutkin V.E., Reshetnyak O.S., Bakaeva E.N. Surface water hydroecological peculiarities of Eastern Donbass coal-mining areas. *Izv. RAN. Ser. Geogr.*, 2020b, vol. 84, no. 3, pp. 451–460. (In Russ.).
- 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 Groundwater within the Technologically Disturbed Geosystems of Eastern Donbass: the Formation of the Chemical Composition and Quality Assessment]. Rostov-na-Donu: Yuzhn. Fed. Univ. Publ., 2016, 170 p. (In Russ.).