

## Интегральная оценка техногенного загрязнения речных отложений углепромышленной территории Восточного Донбасса

© 2022. В. Н. Решетняк, аспирант,  
В. Е. Закруткин, д. г.-м. н., профессор, Е. В. Гибков, к. г. н., доцент,  
Южный федеральный университет,  
344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, д. 40,  
e-mail: vnresh3@gmail.com

Длительная добыча и переработка угля, а также воздействие объектов угледобывающей промышленности на компоненты окружающей среды в пределах Восточного Донбасса привели к возникновению ряда гидроэкологических проблем, которые усугубились в дальнейшем после ликвидации угольных шахт.

На основе анализа существующих методов и подходов сформулированы основные принципы интегральной оценки уровня загрязнения донных отложений рек, предложен интегральный показатель и разработаны критерии оценки загрязнённости речных отложений. Для апробации методики произведён расчёт и оценка уровней загрязнённости речных осадков углепромышленной территории Восточного Донбасса (Ростовская область). Результаты оценки загрязнения донных отложений по интегральному показателю сопоставлены с результатами, полученными с использованием общепринятых индексов и показателей. Предлагаемый авторами интегральный показатель загрязнённости донных отложений учитывает коэффициенты опасности элементов для водных экосистем и долю пелитовой фракции. Это позволяет отразить не только уровень накопления загрязнителей в донных отложениях, но и учесть опасность вторичного загрязнения воды материалом донных осадков.

В целом, донные отложения на большинстве участков рек в пределах Восточного Донбасса можно отнести к умеренно загрязнённым. Высокий уровень загрязнения донных отложений на некоторых участках рек обусловлен более высокой техногенной нагрузкой. Таким образом, интегральный показатель загрязнённости донных отложений позволяет корректно оценивать уровень загрязнения речных осадков в пределах техногенно нарушенных территорий.

**Ключевые слова:** донные отложения, углепромышленные территории, интегральный показатель загрязнённости донных отложений, вторичное загрязнение вод.

## Integral assessment of river sediments technogenic contamination within Eastern Donbass coal-mining area

© 2022. V. N. Reshetnyak ORCID: 0000-0003-4360-2514,  
V. E. Zakrutkin ORCID: 0000-0001-5902-374X, E. V. Gibkov ORCID: 0000-0003-0278-8658,  
Southern Federal University,  
40, Zorge St., Rostov-on-Don, Russia, 344090,  
e-mail: vnresh3@gmail.com

Long-term coal mining and processing as well as the impact of coal mining facilities on environmental components within the Eastern Donbass have led to a number of hydroecological problems, which have been intensified by the liquidation of coal mines.

Based on the analysis of conventional methods and approaches the main principles of the integral assessment of the river sediments contamination level have been formulated, the integral contamination index of river sediments has been proposed and criteria for assessing the river sediments contamination level have been developed. For testing the proposed approach the calculation and assessment of the levels of sediments contamination in the rivers of the coal-mining area of the Eastern Donbass (Rostov region, Russia) has been carried out. The results of the assessment obtained using the integral contamination index of river sediments are compared with the results obtained using conventional indices and indicators. The integral contamination index of river sediments proposed by the authors includes the element hazard coefficients for aquatic ecosystems and the pelitic fraction share. This allows us to reflect not only the level of pollutant accumulation in sediments, but also to consider the risk of secondary water pollution with the sediments material.

In general, river sediments in the most part of the river sections within the Eastern Donbass can be classified as moderately polluted. The high level of river sediments contamination in some sections of the rivers still remains due to a higher technogenic load. Thus, the integral contamination index of river sediments allows researchers to correctly assess the level of river sediments pollution within technogenically disturbed areas.

**Keywords:** river sediments, coal-mining areas, integral contamination index of river sediments, secondary water pollution.

Донные отложения являются одним из наиболее информативных компонентов водных экосистем. Обладая депонирующими свойствами, они способны аккумулировать загрязняющие вещества, поступающие в водные объекты в течение длительного времени и, следовательно, являются надёжным индикатором экологического состояния не только самих водных объектов, но и обширных водосборных площадей. Благодаря этому донные отложения представляют особую ценность в системе мониторинга техногенно нарушенных территорий.

Горнодобывающая промышленность традиционно считается одним из наиболее мощных факторов антропогенного преобразования окружающей среды. При этом углепромышленные территории, в частности Восточный Донбасс, по праву являются одними из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов Российской Федерации. Природный комплекс здесь подвергается интенсивному техногенному воздействию, причём основной вклад в осложнение экологической ситуации вносят предприятия угольной промышленности. Начавшаяся в 90-е годы XX века реструктуризация угледобывающей отрасли, заключающаяся в основном в ликвидации нерентабельных шахт, заметно усилила негативные явления. При этом наиболее высокую техногенную нагрузку испытывают поверхностные и подземные воды региона. Особенно уязвимыми оказались малые реки, многие из которых утратили свои естественные природные функции, произошла массовая гибель фито- и зоопланктона, стало невозможным использование поверхностных вод не только для питьевых нужд населения, но и для хозяйственных целей [1].

В научной литературе описано большое количество подходов к оценке загрязнённости донных отложений водных объектов. Часть из них предполагает оценку лишь по отдельным элементам (коэффициент концентрации  $K_c$ , фактор обогащения  $E_p$ , индекс геоаккумуляции  $I_{geo}$ , нормативы *USEPA*, коэффициент донной аккумуляции и другие). Наибольший интерес представляют так называемые интегральные показатели, которые позволяют дать оценку уровня загрязнённости донных отложений по совокупному влиянию загрязняющих веществ.

В работах российских учёных уровень загрязнённости донных отложений обычно оценивают по суммарному показателю загрязнения  $Z_c$  (СПЗ) [2, 3]. В его основе лежит ко-

эффициент концентрации, представляющий собой отношение содержания элемента в донных отложениях к его фоновой концентрации.

Для оценки уровня загрязнённости донных отложений в зарубежной литературе предлагаются показатели загрязнения, по сути, идентичные коэффициентам концентрации (степень загрязнения Хокансона, индекс суммарного загрязнения PLI) [4–6]. Разница между интегральными подходами заключается в количестве элементов, используемых для расчёта, и в определении величины их фонового содержания.

Например, оценочная шкала СПЗ разработана для учёта не менее 40 химических элементов, в то же время показатель степени загрязнения Хокансона рассчитывается и оценивается на основе содержаний 7 металлов и полихлорированных дифенилов (ПХД) [4]. Особенность модифицированного показателя степени загрязнения [7] заключается в том, что сумма коэффициентов концентрации делится на число исследуемых элементов, благодаря чему шкала оценки может быть использована для любого набора веществ.

В качестве фонового уровня содержания элемента при изучении донных отложений используют либо геохимические кларки земной коры или осадочных пород [7, 8], либо фоновые (доиндустриальные) содержания элементов [6, 9–12].

Особое внимание при изучении донных отложений уделяется выбору той части донных отложений, которая позволит получить репрезентативную информацию о степени их загрязнённости. В частности, при расчёте СПЗ предполагается использование концентраций элементов в валовой пробе. Хокансон [13] указывает на то, что наибольшая информативность пробы достигается после её просеивания через сито с размером ячеек 63 мкм. В современных исследованиях загрязнённости донных отложений предпочтение отдаётся либо уже упомянутой фракции с размером частиц < 63 мкм [7, 14, 15], либо < 2 мм [10, 16, 17].

Обращает на себя внимание, что в основе всех методов интегральной оценки уровня загрязнённости донных отложений лежат коэффициенты концентрации элементов. Однако они характеризуют лишь уровень аномальности содержаний тех или иных элементов, но не степень загрязнённости донных отложений, которая предполагает оценку их опасности для водных экосистем в целом и для человека.

По этой причине в ряде работ при оценке состояния донных отложений вводятся

коэффициенты, учитывающие токсическое действие элементов на живые организмы [3, 4, 18]. В работах [3, 19] описан показатель санитарно-токсикологической опасности  $Z_{ст}$ , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации элементов 1 и 2 классов опасности. Подобный подход используется и при оценке почв – суммарный показатель токсичного загрязнения СПТЗ [20].

При этом очень редки попытки исследователей привлечь к оценке факторы, влияющие на содержание и распределение тяжёлых металлов в системе «вода – донные отложения», и таким образом учесть опасность вторичного загрязнения водной толщи.

Цель исследования – усовершенствовать методику оценки уровня загрязнённости донных отложений рек углепромышленных территорий.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись донные отложения рек бассейнов Северского Донца (реки Калитва, Кундрючья, Быстрая, Лихая, Большая Гнилуша, Большая и Малая Каменка) и Тузлова (реки Большой и Малый Невсетаи, Аюта, Грушевка, Кадамовка и Атюхта) в пределах Ростовской области. Для оценки суммарного влияния различных техногенных источников загрязнения в пределах водосборной площади опробование осуществляли в верховьях и в низовьях рек, а также в районах расположения объектов угледобывающей промышленности (действующие и ликвидированные шахты, места сброса шахтных вод и т. п.).

Отбор проб донных отложений проводили согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 и ГОСТ Р 51232-98 с использованием дночерпателя Ван-Вина. В связи с гранулометрической неоднородностью речных осадков каждую смешанную пробу составляли из нескольких (обычно 3–5) индивидуальных проб, охватывающих всю ширину русла. Масса отбираемых донных отложений из каждого створа составляла от 1 до 1,5 кг.

Из смешанных проб выделяли пелитовую фракцию путём многократного взмучивания традиционным методом Сабанина при температуре суспензии 15 °С [21]. Результаты выхода пелитовой фракции выражали в процентах по массе на сухое вещество. Содержание микроэлементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием прибора «Квант-2АТ».

### Результаты и обсуждение

Система интегральной оценки степени загрязнённости донных отложений, с нашей точки зрения, должна основываться на следующих принципах.

**Работа с однородным материалом – пелитовой фракцией (< 0,01 мм) донных отложений.** Как известно, донные отложения рек вообще характеризуются различным гранулометрическим составом. Так, в пределах исследуемого района выделяются реки преимущественно песчаного (р. Быстрая) и преимущественно глинистого (р. Большая Гнилуша) составов [22].

Содержание металлов в различных гранулометрических фракциях возрастает с уменьшением размера фракции, что обусловлено увеличением удельной площади поверхности частиц [23]. По этой причине количество пелитовой фракции и её химический состав будут наиболее информативными показателями для оценки уровня загрязнения донных отложений в целом.

**Использование кларков глин и глинистых сланцев в качестве геохимического фона.** Использование фоновых содержаний элементов при оценке загрязнённости донных отложений является наиболее правильным, общепринятым подходом. Однако в районах, подверженных длительному техногенному воздействию, отбор фоновых проб либо затруднён, либо вовсе невозможен. В частности, для рек Восточного Донбасса загрязнение донных отложений будет происходить не только в результате осаждения элементов из речных вод, но и за счёт их поступления с шахтными и подземными водами. Такие процессы зачастую происходят и в верховьях рек, что исключает возможность использования верхних створов в качестве фоновых.

В связи с оценкой содержания элементов в пелитовой фракции наиболее корректным будет использование в качестве фоновых значений кларков континентальных глин и глинистых сланцев [24].

**Учёт класса опасности элемента в окружающей среде.** Оценка загрязнения донных отложений с помощью интегрального показателя без учёта степени токсичности элементов позволит выявить геохимическую аномалию, но не их опасность для пресноводных экосистем, поэтому имеет смысл внести в формулу добавочный коэффициент, позволяющий учесть класс опасности того или иного элемента.

Классы опасности элементов, как и ПДК, для донных отложений рек не разработаны, поэтому можно учитывать классы опасности элементов для вод разных категорий назначения, либо по общему воздействию элементов на живые организмы.

**Учёт потенциального риска вторичного загрязнения воды.** Одним из основных процессов, способствующих поступлению металлов из донных осадков в водную толщу, является взмучивание донных отложений, в результате которого происходит выделение элементов из раствора иловых вод и тонких частиц [25].

Важно подчеркнуть, что основным носителем загрязнения является именно пелитовая фракция, в которой за счёт высокой удельной площади поверхности частиц тяжёлые металлы будут содержаться в более высоких концентрациях. В [17, 26, 27] показано, что имеется положительная корреляция содержания тяжёлых металлов и других загрязнителей с количеством тонкодисперсной фракции.

При разработке интегрального показателя важным является определение набора типоморфных элементов донных отложений – геохимической ассоциации, представляющей собой совокупность элементов, для которых  $K_c > 1,5$  [3]. Чем больше значение коэффициента концентрации элемента, тем выше уровень его аномальности в донных отложениях рек.

Исходя из этого, показатель оценки степени загрязнённости должен включать среднее арифметическое коэффициентов концентрации элементов, входящих в геохимическую ассоциацию. Это позволит использовать одинаковую оценочную шкалу для выявления степени загрязнённости донных отложений независимо от числа исследуемых элементов.

Таким образом, формула интегрального показателя загрязнённости донных отложений (ИПЗ<sub>до</sub>), по нашему мнению, будет выглядеть следующим образом:

$$\text{ИПЗ}_{\text{до}} = \log_{10}(PF) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_c \cdot K_t}{n},$$

где  $K_t$  – коэффициент, зависящий от класса опасности элемента;  $K_c$  – коэффициент концентрации элемента, представляющий собой отношение содержания элемента в пробе к его фоновому (кларковому) содержанию;  $n$  – число исследуемых элементов, для которых  $K_c > 1,5$ ;  $PF$  – доля пелитовой фракции, %.

В соответствии с нормативами качества вод водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г.) для элементов четырёх классов опасности были присвоены следующие коэффициенты (табл. 1).

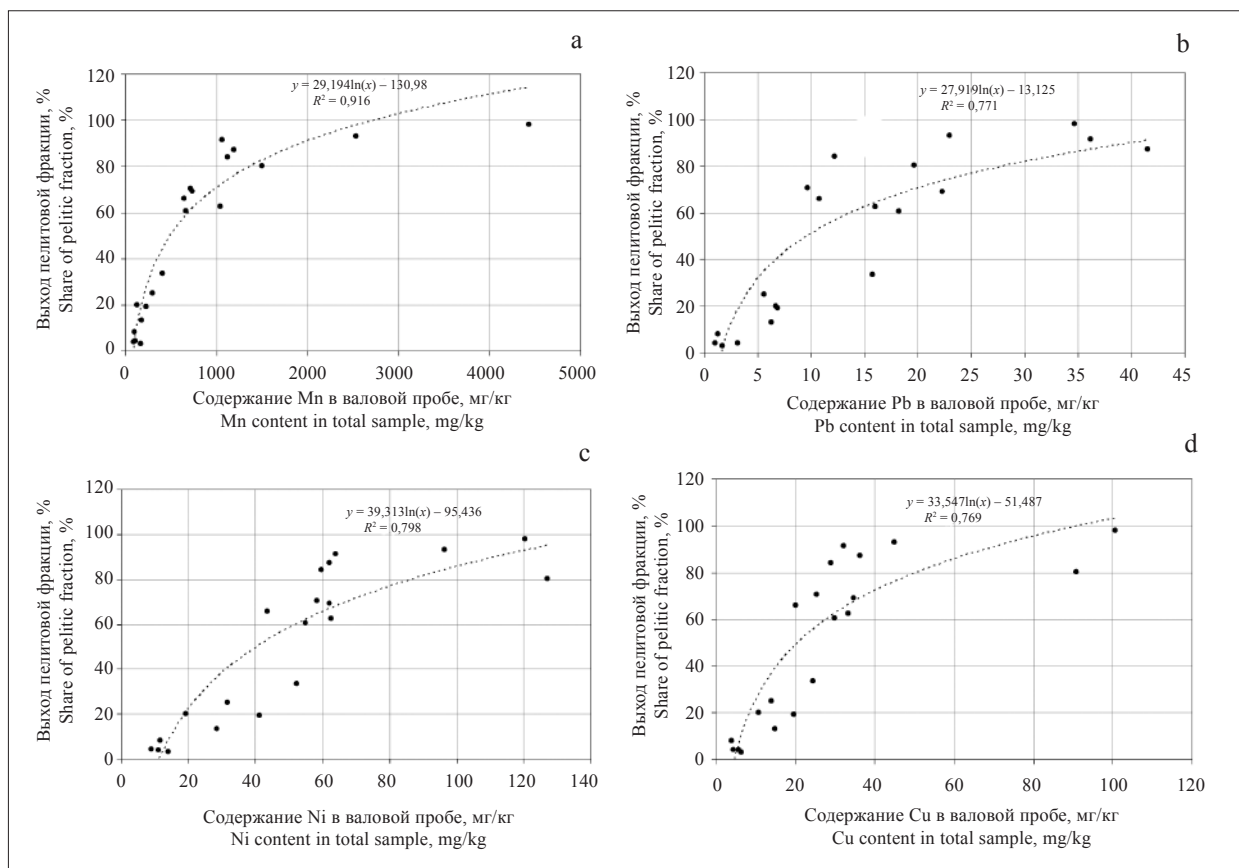
Как показывают наши исследования, наилучшим образом зависимость содержания элементов в донных отложениях от доли пелитовой фракции описывается логарифмическим законом (рис.). Поэтому коэффициент содержания пелитовой фракции в итоговой формуле будет иметь вид  $\log_{10}(PF)$ , где  $PF$  – доля пелитовой фракции, %. Таким образом, коэффициент будет принимать значения меньше 1, если выход пелитовой фракции составляет менее 10% – для преимущественно песчаных осадков. Для донных отложений с долей пелитовой фракции менее 1% значение данного коэффициента рекомендуется принимать равным 0 во избежание отрицательных значений логарифма. При максимальном выходе пелитовой фракции – 100% значение коэффициента будет равным 2.

Для ИПЗ<sub>до</sub> нами была разработана оценочная шкала, основанная на сопряжённом анализе результатов наших исследований [1, 26]. Уровни загрязнённости и соответствующие им диапазоны значений установлены, исходя из результатов оценки степени загрязнённости донных отложений и речных вод Восточного Донбасса по показателям СПЗ,

Таблица 1 / Table 1

Характеристика опасности элементов для водных экосистем  
Characteristics of elements hazard for aquatic ecosystems

Класс опасности для вод рыбохозяйственного значения Hazard class for fishery waters	Элементы Elements	Коэффициент класса опасности $K_t$ Element hazard factor $K_t$
4	Fe, Mn	0,5
3	Cr, Ni, Cu, Co, Zn	1,0
2	Pb	1,2
1	Hg	1,5



**Рис.** Зависимость содержания марганца (а), свинца (b), никеля (c), меди (d) в пробах донных отложений Северского Донца (мг/кг) от выхода пелитовой фракции (%)  
**Fig.** Correlation between the content of manganese (a), lead (b), nickel (c), copper (d) in total samples of river sediments in the Seversky Donets River Basin (mg/kg) and the share of pelitic fraction (%)

степени загрязнения Хокансона и удельного комбинаторного индекса загрязнённости воды (УКИЗВ). Результаты расчётов показателей представлены в таблице 2. В таблице 3 показана итоговая оценочная шкала ИПЗ<sub>до</sub>.

Методика оценки степени загрязнённости донных отложений рек с использованием ИПЗ<sub>до</sub> была опробована на реках Восточного Донбасса (табл. 2). Для расчёта показателей уровня загрязнённости донных отложений нами были выбраны 8 элементов: Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, Co, Zn, Pb. В то же время для расчёта УКИЗВ и оценки степени загрязнённости воды по комплексной методике РД 52.24.643-2002 использовано 18 макро- и микрокомпонентов речных вод.

Речные воды по показателю УКИЗВ в целом характеризуются более высоким уровнем загрязнения, нежели донные отложения по любому из показателей, что объясняется процессами самоочищения донных отложений и поступления элементов из осадков в водную толщу. Однако УКИЗВ учитывает большее число компонентов, поэтому прямое сравне-

ние с показателями донных отложений будет не вполне корректным. По показателю СПЗ донные отложения оцениваются в основном как слабозагрязнённые, лишь в отдельных створах они попадают в градацию среднезагрязнённых. По показателю степени загрязнения Хокансона значительная часть створов характеризуется средним уровнем загрязнения донных отложений, в отдельных случаях – низким или высоким. Стоит отметить, что среди показателей степени загрязнённости рассматриваемых донных отложений именно ИПЗ<sub>до</sub> имеет большую сопоставимость с уровнем загрязнения речных вод по УКИЗВ.

По предлагаемому нами ИПЗ<sub>до</sub> большую часть участков рек можно классифицировать как умеренно загрязнённую. В целом для рек бассейна Северского Донца характерен более низкий уровень загрязнения, чем для рек бассейна Тузлова, что согласуется с различиями в уровнях техногенной нагрузки в данных речных бассейнах [26]. Высокая загрязнённость отмечена для среднего участка реки Атюхта и устьевого участка реки Тузлов,



Таблица 2 / Table 2

Характеристика уровня загрязнённости донных отложений рек и речных вод Восточного Донбасса  
 Characteristics of the contamination level of river sediments and waters within the Eastern Donbass

Река River	Тип створа Site type	Уровень загрязнения по $Z_c$ $Z_c$ pollution level	Уровень загрязнения $C_d$ (Хокансон) Degree of contamination $C_d$	Степень загрязнённости по ИПЗ <sub>до</sub> $ICI_{RS}$ contamination level	Уровень загрязнённости воды по УКИЗВ Water pollution level (SCIWP)
Малый Несветай Maluu Nesvetay	средний middle	слабый low	умеренный moderate	3,99 умеренная moderate	экстремально грязная extremely dirty
	верхний upper	средний moderate	высокий considerable	3,05 слабая low	очень грязная very dirty
Грушевка Grushevka	устьевой lower	слабый low	умеренный moderate	4,97 умеренная moderate	экстремально грязная extremely dirty
	средний middle		высокий considerable	5,46 умеренная moderate	
Тузлов Tuzlov	устьевой lower	средний moderate	умеренный moderate	7,26 высокая high	
	верхний upper			5,28 умеренная moderate	
Малая Каменка Malaya Kamenka	устьевой lower	слабый low	умеренный moderate	3,01 слабая low	очень грязная very dirty
	средний middle			5,12 умеренная moderate	экстремально грязная extremely dirty
	верхний upper	6,33 умеренная moderate			
Лихая Likhaya	средний middle	средний moderate	умеренный moderate	4,77 умеренная moderate	очень грязная very dirty
	верхний upper			4,92 умеренная moderate	
Большая Гнилуша Bolshaya Gnilusha	устьевой lower	слабый low	умеренный moderate	7,27 высокая high	экстремально грязная extremely dirty
	верхний upper			3,92 умеренная moderate	
Кундрючья Kundryuchya	средний middle	слабый low	умеренный moderate	6,41 умеренная moderate	

Таблица 3 / Table 3

Оценочная шкала интегрального показателя загрязнённости донных отложений  
 Descriptive scale of the integral contamination index of river sediments

Диапазон значений Range of values	Характеристика степени загрязнённости Designation of contamination level
< 3,5	слабая / low
3,5–7	умеренная / moderate
7–14	высокая / high
> 14	экстремально высокая / extremely high

а также для устьевых участков реки Большая Гнилуша.

Обращают на себя внимание отдельные створы, в которых отмечены несоответствия характеристик уровня загрязнённости донных отложений рек, рассчитанных с использованием разных показателей. В тех створах, донные

отложения которых характеризуются низким выходом пелитовой фракции, значения показателя и уровень загрязнённости по ИПЗ<sub>до</sub> ниже, чем по СПЗ или уровню загрязнения Хокансона. В донных отложениях участков рек, где отмечены аномальные содержания элементов первого и второго классов опас-

ности, по ИПЗ<sub>до</sub> получают более высокие значения и уровни загрязнения по сравнению с результатами оценки, полученными с использованием других индексов.

В остальных случаях результаты оценки уровня загрязнённости донных отложений с использованием ИПЗ<sub>до</sub> сопоставимы с результатами, полученными другими способами оценки. Выявленные различия объясняются разным содержанием пелитовой фракции в донных осадках и учётом классов опасности изучаемых элементов.

### Заключение

Таким образом, для оценки загрязнённости донных отложений рек предложен интегральный показатель загрязнённости (ИПЗ<sub>до</sub>), в основу которого заложены следующие принципы: работа с однородным материалом – пелитовой фракцией (< 0,01 мм), что позволяет одинаковым образом оценивать уровни загрязнённости донных отложений разного гранулометрического состава и сравнивать их между собой; учёт коэффициентов класса опасности типоморфных элементов; использование кларков глин и глинистых сланцев в качестве геохимического фона, что обусловлено невозможностью определения регионального фона на территориях, подверженных длительному техногенному воздействию угледобывающей промышленности. Учёт доли пелитовой фракции в пробе и класса опасности элементов является основным отличием ИПЗ<sub>до</sub> от общепринятых индексов. Это позволяет отразить не только уровень накопления загрязнителей в донных отложениях, но и опасность вторичного загрязнения воды. Предлагаемый нами комплексный показатель усиливает информативность донных отложений как индикатора загрязнённости водной среды.

В результате оценки качества донных отложений с использованием ИПЗ установлено, что на большей части участков рек в пределах Восточного Донбасса их можно классифицировать как умеренно загрязнённые. Однако на некоторых створах сохраняется высокая степень загрязнения донных осадков. Важно подчеркнуть, что ИПЗ, как правило, хорошо коррелирует с уровнем загрязнённости воды, и, следовательно, обладает надёжными индикаторными свойствами. Его можно рекомендовать для использования и на других техногенно преобразованных территориях.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/> в Южном федеральном университете.*

### References

1. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. Surface and underground waters within the technogenically disturbed geosystems of the Eastern Donbass: formation of the chemical composition and quality assessment: monograph. Rostov-na-Donu: Izdatelstvo Yuzhnogo federalnogo universiteta, 2016. 172 p. (in Russian).
2. Sayet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. Geochemistry of the environment. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).
3. Yanin E.P. Technogenic geochemical associations in bottom sediments of small rivers (composition, features, assessment methods). Moskva: IMGRE, 2002. 52 p. (in Russian).
4. Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach // Water Res. 1980. V. 14. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
5. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1980. V. 33 P. 566–575.
6. Mohammed F.K., Sieuraj J., Seepersaud M. A preliminary assessment of heavy metals in sediments from the Ciperio and South Oropouche Rivers in Trinidad, West Indies // Environ Monit Assess. 2017. V. 189. Article No. 396. doi: 10.1007/s10661-017-6077-1
7. 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. V. 136. P. 227–238. doi: 10.1007/s10661-007-9678-2
8. Carrillo K.C., Drouet J.C., Rodriguez-Romero A., Tovar-Sanchez A., Ruiz-Gutierrez G., Viguri Fuente J.R. Spatial distribution and level of contamination of potentially toxic elements in sediments and soils of a biological reserve wetland, northern Amazon Region of Ecuador // Journal of Environmental Management. 2021. V. 289. Article No. 112495. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112495
9. Nasrabadi T., Bidhendi G.N., Karbassi A., Mehrdadi N. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea basin // Environ Monit Assess. 2010. V. 171. No. 1–4. P. 395–410. doi: 10.1007/s10661-009-1286-x
10. Oyewumi O., Feldman J., Gourley J.R. Evaluating stream sediment chemistry within an agricultural catchment of Lebanon, Northeastern USA // Environ Monit Assess. 2017. V. 189. Article No. 141. doi: 10.1007/s10661-017-5856-z

11. Ashikhmina T.Ya., Dabakh E.V., Kantor G.Ya., Lemeshko A.P., Skugoreva S.G., Adamovich T.A. Study of the state of the natural complex in the zone of influence of the Kirovo-Chepetsk chemical plant // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 3. P. 18–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-018-026
12. Yanin E.P. Technogenic geochemical associations in bottom sediments of small rivers in agrolandscapes (formation, composition, ecological assessment) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 1. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-1-066-071
13. Hakanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: statistical aspects // *Water Resources Research*. 1984. V. 20. No. 1. P. 41–46. doi: 10.1029/WR020i001p00041
14. Smith T.B., Owens P.N. Individual and cumulative effects of agriculture, forestry and metal mining activities on the metal and phosphorus content of fluvial fine-grained sediment; Quesnel River Basin, British Columbia, Canada // *Science of the Total Environment*. 2014. V. 496. P. 435–442. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.014
15. Dendievel A.-M., Mourier B., Dabrin A., Delile H., Coynel A., Gosset A., Liber Y., Berger J.-F., Bedell J.-Ph. Metal pollution trajectories and mixture risk assessed by combining dated cores and subsurface sediments along a major European river (Rhône River, France) // *Environment International*. 2020. V. 144. Article No.106032. doi: 10.1016/j.envint.2020.106032
16. Wei L., Cai M., Du Y. Spatial attenuation of mining/smelting-derived metal pollution in sediments from tributaries of the Upper Han River, China // *Mine Water Environ*. 2019. V. 38. P. 410–420. doi: 10.1007/s10230-018-00583-0
17. Oyewumi O., Schreiber M.E., Ciparis S. The impact of poultry litter application on sediment chemistry of the Broadkill River estuary system, Delaware // *Environ Monit Assess*. 2014. V. 186. P. 97–115. doi: 10.1007/s10661-013-3359-0
18. Dauvalter V.A. Assessment of the ecological state of surface waters based on the results of studies of the chemical composition of bottom sediments. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2005. 88 p. (in Russian).
19. Yanin E.P. Technogenic river silts (formation conditions, material composition, geochemical features). Moskva: ARSO, 2018. 415 p. (in Russian).
20. Sereda L.O., Kurolap S.A., Yablonskikh L.A. Ecological and geochemical assessment of technogenic pollution of the soil cover of industrial cities. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2018. 196 p. (in Russian).
21. Lomtadze V.D. Physical and mechanical properties of rocks. Laboratory research methods. Leningrad: Nedra, 1990. 328 p. (in Russian).
22. Gibkov E.V., Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Ecological and geochemical features of bottom sediments of the rivers of the Eastern Donbass // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2020. No. 1 (205). P. 36–46 (in Russian). doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-36-46
23. Papina T.S. Transport and features of the distribution of heavy metals in the series: water – suspended matter – bottom sediments of river ecosystems: Analyte. Review. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, IVEP SO RAN, 2001. 58 p. (in Russian).
24. Grigoriev N.A. Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Ekaterinburg: In-t geologii i geokhimii UrO RAN, 2009. 381 p. (in Russian).
25. Yanin E.P. Technogenic silts as a secondary source of river water pollution // *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov*. 2015. No. 9. P. 17–25 (in Russian).
26. Kim S., Yang D.S., Kim Y.S. Distribution of metal contamination and grain size in the sediments of Nakdong River, Korea // *Environ Monit Assess*. 2020. V. 192. Article No. 502. doi: 10.1007/s10661-020-08475-z
27. Chen Y., Liu M., Zhang X., Bu X., Chen J., Wu X. Metals in Yellow River estuary sediments during the 2018 water-sediment regulation scheme period // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. V. 166. Article No. 112177. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112177
28. Zakrutkin V.E., Reshetnyak V.N., Reshetnyak O.S. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the East Donbass (Rostov Region, Russia) // *Water and Ecology*. 2020. V. 3. No. 83. P. 32–40. doi: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40