

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (на примере Калининградского залива Балтийского моря)

В. А. Чечко, В. Ю. Топчая

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: che-chko@mail.ru*

На основании данных о содержании тяжелых металлов (Pb, Cu, Ni и Co) выполнена оценка уровня загрязнения донных отложений Калининградского залива. Для этой цели использованы общепринятые показатели – факторы загрязнения (C_p) и степень загрязнения (C_d), модифицированный суммарный показатель загрязнения (Z_y), индекс геоаккумуляции (I_{geo}) и индекс антропогенной нагрузки (PLI). Результаты расчетов различных показателей оказались вполне сопоставимы, а уровень загрязненности донных отложений залива можно, в целом, охарактеризовать как низкий. В то же время, если рассматривать уровни загрязненности донных осадков отдельных седиментационных районов залива, выделенных по морфологическим, гидродинамическим и литологическим признакам, то между ними наблюдаются некоторые различия. По всем показателям наименьшим уровнем загрязнения характеризуются донные отложения центрального района, что объясняется особенностями литодинамики и гранулометрического состава осадков. Донные отложения эстуарного и юго-западного районов также оцениваются как слабозагрязненные, однако в некоторых точках они соответствуют умеренному уровню загрязнения. Результаты исследования свидетельствуют об отсутствии в донных осадках залива антропогенной составляющей тяжелых металлов, что обусловлено, в частности, действием естественного механизма самоочищения.

Ключевые слова: донные осадки, осадконакопление, тяжелые металлы, уровень загрязнения, Калининградский залив

Введение

Актуальность изучения донных отложений (далее ДО) обусловлена рядом причин. Они являются важнейшей из компонент водной экосистемы, конечным звеном аккумуляции элементов и загрязняющих веществ в результате сорбции и седиментации (Закруткин и др., 2020). ДО интенсивно накапливают и переносят тяжелые металлы, радионуклиды, продукты распада нефти и нефтепродуктов (Liu Xin-wei et al., 1996). При определенных условиях они могут служить источником вторичного загрязнения, так как выявлена возможность перехода загрязняющих веществ из ДО в водную среду (Решетняк, Закруткин, 2016).

Особенно значимы сведения о состоянии ДО водоемов, активно вовлеченных в хозяйственную деятельность, они могут, в частности, использоваться в качестве

естественных индикаторов состояния водных экосистем и масштаба техногенного влияния на них (Даувальтер, 2012; Forstner, 1979). При этом важно учитывать, что интенсивность аккумуляции донными осадками загрязняющих веществ зависит от их вещественно-генетического типа, а наибольшей сорбционной способностью обладают мелкодисперсные илистые и глинистые частицы (Windom et al., 1989; Liu Xin-wei et al., 1996).

В последние десятилетия обычными загрязнителями водных экосистем, включая ДО, стали тяжелые металлы, занимающие особое место среди приоритетных загрязняющих веществ (Комов, Томилина, 1999; Емельянов и др., 2004). Они не подвергаются распаду, поэтому могут переходить в организмы животных и человека, накапливаясь в костях и тканях (Куракина, Шлыгина, 2017). Несмотря на это, в России не выработаны параметры предельно-допустимых концентраций тяжелых металлов для ДО, что усложняет выполнение оценки степени загрязнения ДО тяжелыми металлами напрямую, используя только результаты определенных их концентраций. Поэтому для интерпретации геохимических данных и для оценки качества ДО, наряду с региональными нормативами оценки загрязненности донных отложений в водных объектах (Нормы..., 1996), обычно применяется ряд других критериев.

Целью настоящей работы является эколого-геохимическая оценка донных отложений Калининградского залива, выполненная на основании наиболее применяемых методических подходов.

Объект исследования

Калининградский залив занимает северо-восточную половину крупнейшего для Балтийского моря Вислинского залива (рисунок 1). От моря залив отделяется узкой песчаной косой-пересыпью, а водообмен с ним осуществляется через пролив возле г. Балтийска. Это специфический природный водный объект, испытывающий на себе влияние пресных речных и соленых морских вод, в нем происходит их смешение, а также трансформация взвешенного осадочного материала. Экосистема залива подвергается серьезному воздействию антропогенных факторов (активное судоходство, функционирование портовых комплексов, рыбный промысел, добыча полезных ископаемых). Примыкающие к заливу территории характеризуются высокой плотностью населения и развитой городской и промышленной инфраструктурой, в последние годы возрастает его значение как объекта рекреации (Регион..., 2014).

Количество поступающего в залив осадочного материала определяется величиной речного стока и интенсивностью береговой абразии (Kennish, 2015), динамика верхнего слоя осадков – процессами ветро-волнового взмучивания (Shechko, Chubarenko, 2017). Залив является частью бесприливного моря, однако периодически возникающие в нем стонно-нагонные явления в чем-то заменяют приливы и

отливы (Blazchishin, 1998). В заливе накапливаются преимущественно терригенные отложения – пески, пески илистые, илы песчанистые, илы и глинистые илы (Чечко, Топчая, Бабаков, 2023). По распределению взвешенного осадочного материала, особенностям литологических типов ДО, морфологическим и гидродинамическим показателям в заливе выделяется несколько седиментационных районов (Chechko, 2021) (рисунок 1).

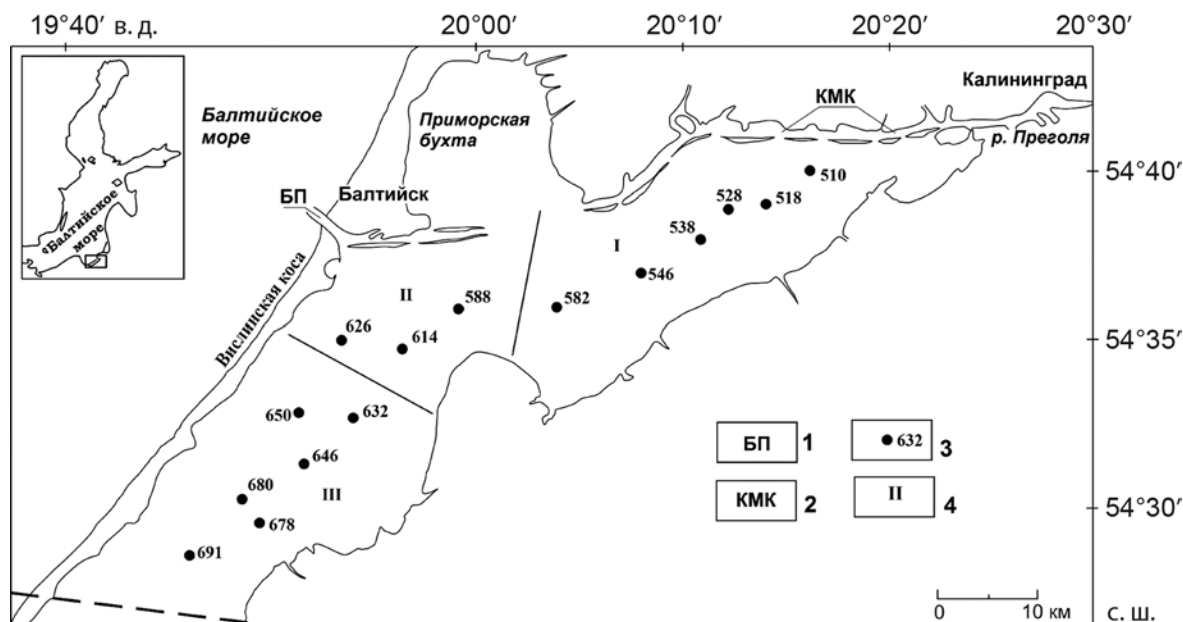


Рис. 1 – Схема расположения Калининградского залива и станций отбора образцов донных осадков: 1 – Балтийский пролив; 2 – Калининградский морской канал; 3 – станция и ее индекс; 4 – обозначение районов седиментации: I – эстуарий реки Преголя, II – центральный, III – юго-западный

Изучению ДО залива с целью определения в их составе содержания химических элементов, включая тяжелые металлы, до недавнего времени не уделялось должного внимания. Имеются результаты эпизодических измерений на станциях, не охватывающих всю акваторию залива (Емельянов и др., 1998), но они не позволяют получить достоверной картины распределения загрязняющих веществ. Наиболее полным исследованием тяжелых металлов в поверхностном слое ДО Калининградского залива является работа (Чечко, Топчая, 2022). В ней представлены особенности пространственного распределения тяжелых металлов (Pb, Cu, Ni и Co), основанные на изучении 29 образцов ДО, отобранных в различных седиментационных районах залива. Однако исследования, выполненные с учетом различных критериев оценки качества ДО Калининградского залива, ранее не проводились (это относится и к его юго-западной, польской части).

Методика исследования

Образцы ДО были получены во время литологической съемки Калининградского залива в летний сезон 2021 г. на 29 станциях (Чечко, Топчая, 2022). Они отбирались из верхнего (0–7 см) слоя осадков с помощью пробоотборника Петерсена (площадь захвата 0.025 м²). Определение содержаний тяжелых металлов выполнялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) с использованием спектрометра OPTIMA 2100DV. Гранулометрический состав ДО определялся по массовому содержанию частиц различной крупности в процентах от массы исследуемого образца. Он выполнялся ситовым методом (Петелин, 1967). Учитывая, что именно илистая составляющая является основным носителем загрязняющих веществ, для исследования использовались только образцы ДО, в которых содержание илистых частиц превышало 50 %. Этому критерию соответствовали образцы ДО, полученные на 15 станциях (рисунок 1, таблица 1).

Табл. 1 – Гранулометрический состав донных осадков

Станция, №	Содержание фракций (мм), %								
	> 4.0	4–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	0.25–0.125	0.125–0.063	0.063–0.04	< 0.04
510	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.0	20.0	57.0	17.0
518	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	17.0	64.0	13.0
528	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	22.0	59.0	12.0
538	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	11.5	32.0	41.0	14.5
546	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	12.5	19.0	40.5	15.0
582	0.0	0.0	0.0	0.5	7.0	14.5	25.0	39.5	13.5
588	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	8.5	30.2	40.4	12.5
614	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	12.4	27.4	45.6	10.0
626	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	12.5	33.0	43.5	8.0
632	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	16.0	27.0	40.5	13.5
646	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	10.5	33.0	39.5	14.0
650	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	11.5	32.0	42.5	12.0
678	0.0	0.0	0.0	1.6	5.0	7.4	15.4	20.6	50.0
680	0.0	0.0	0.0	5.5	10.0	10.5	20.5	45.5	8.5
691	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	4.5	13.0	28.3	52.0

Так как сами по себе выявленные в ДО концентрации тяжелых металлов не могут свидетельствовать об эколого-геохимическом состоянии, то для его оценки разработано несколько показателей. Нами использовались наиболее применяемые из них: коэффициент концентрации (K_c), степень загрязнения (C_d), модифицированный суммарный показатель загрязнения (Z_y), индекс геоаккумуляции (I_{geo}) и индекс антропогенной нагрузки (PLI).

Для расчета показателей загрязнения в качестве фоновых значений использовались результаты анализов ДО из литологической колонки ZW6, расположенной в юго-западной (польской) части Вислинского залива (Uscinowicz, Zachowicz, 1996).

Значения фоновых концентраций тяжелых металлов для илистых отложений были взяты из горизонта 550 см, в котором антропогенный след отсутствует, а содержания тяжелых металлов можно заведомо считать «доиндустриальными».

Коэффициент концентрации (K_c) представляет собой отношение концентрации загрязняющего вещества в исследуемых донных отложениях к его фоновым (доиндустриальным) значениям или кларкам (земной коры, литосферы, горных пород). Он рассчитывается по формуле: $K_c = C_x/C_b$, где C_x – содержание элемента в пробе донных осадков, а C_b – фоновая концентрация или кларк элемента (Nakanson, 1980).

Для интерпретации значений коэффициента концентрации предложена (Nakanson, 1980) следующая шкала: $K_c < 1$ – загрязнение считается низким, $1 \leq K_c < 3$ – умеренным, $3 \leq K_c < 6$ – значительным, а если значение $K_c \geq 6$, то загрязнение ДО рассматриваемым веществом считается очень высоким.

Значения коэффициентов концентрации необходимы для расчета степени загрязненности ДО (C_d), которая определяется по формуле: $C_d = K_{c1} + K_{c2} \dots + K_{cn}$, где n – количество анализируемых элементов (Nakanson, 1980). Для оценки уровня ДО по степени загрязненности разработана шкала (Nakanson, 1980). При наличии данных по 4 элементам критерии оценки выглядят следующим образом: $C_d < 4$ – уровень загрязнения слабый, $4 < C_d < 8$ – умеренный, $8 < C_d < 16$ – значительный и при $C_d > 16$ – очень высокий.

Наиболее используемым критерием при оценке эколого-геохимического состояния ДО является суммарный показатель загрязнения Z_c (Саеи и др., 1990), который рассчитывается для каждой точки отбора проб. Во избежание отрицательных значений Z_c , при его расчете рекомендуется не учитывать значения коэффициента концентрации < 1 . В связи с этим в (Куракина, Шлыгина, 2017) предложено использовать модифицированный суммарный показатель загрязнения Z_y , который рассчитывается по формуле: $Z_y = (K_{c1} + K_{c2} + \dots + K_{cn}) - \log_2 n$, где K_c – коэффициент концентрации, а n – количество анализируемых элементов.

В предлагаемой формуле учитываются загрязняющие вещества, даже не превышающие фон, т. е. в ней нет ограничения для значений коэффициента концентрации меньше, чем единица. Оценка эколого-геохимического состояния донных отложений в этом случае производится по следующей градации: $Z_y < 5$ – ДО чистые, $5 < Z_y < 10$ – уровень загрязнения слабый, $10 < Z_y < 30$ – средний, $30 < Z_y < 100$ – сильный, если Z_y более 100, то уровень загрязнения очень сильный.

Еще один широко известный количественный метод оценки загрязнения ДО основывается на применении индекса геоаккумуляции I_{geo} (Müller, 1979). При расчете I_{geo} используется формула: $I_{geo} = \log_2(C_x/1.5C_\phi)$, где C_x – концентрация химического элемента в ДО, C_ϕ – геохимическое фоновое значение концентрации химического элемента, 1.5 – коэффициент, учитывающий колебания фоновых содержаний химического элемента.

В зависимости от величины I_{geo} характер уровня загрязнения ДО оценивается по следующей шкале: $I_{geo} \leq 0$ – незагрязненный; $0 < I_{geo} < 1$ – от незагрязненного до умеренного; $1 < I_{geo} < 2$ – умеренный; $2 < I_{geo} < 3$ – от умеренного до

сильного; $3 < I_{geo} < 4$ – высокий; $4 < I_{geo} < 5$ – от высокого до экстремально высокого; $I_{geo} > 5$ – экстремальный.

Для оценки качества ДО нами использован также индекс антропогенной нагрузки *PLI* (Pollution Load Index), предложенный в (Tomlinson et al., 1980). Применяя данную методику, можно определить уровень загрязнения ДО для конкретной станции, седиментационной зоны и для всего изучаемого объекта. Расчет производился по следующим формулам:

$$PLI \text{ для станции } PLI_{st} = (C_{f1} \times C_{f2} \times \dots \times C_{fn})^{1/n},$$
$$PLI \text{ для седиментационного района } PLI_{\text{район}} = (PLI_{st1} \times PLI_{st2} \times \dots \times PLI_{stn})^{1/n},$$
$$PLI \text{ для всего бассейна } PLI_{\text{бассейн}} = (PLI_{\text{район 1}} \times PLI_{\text{район 2}} \times \dots \times PLI_{\text{район n}})^{1/n},$$

где C_f – коэффициент концентрации, n – число металлов, взятых для расчета коэффициентов концентрации, st – станция отбора проб ДО, P – седиментационный район. В зависимости от величины индекса *PLI* уровень загрязнения может быть оценен как низкий ($PLI \leq 1$), умеренный ($1 < PLI \leq 2$), высокий ($2 < PLI \leq 3$) и экстремально высокий ($PLI > 3$).

Результаты и обсуждение

Как говорилось ранее, в Калининградском заливе по морфологическим, гидродинамическим и литологическим особенностям выделяется несколько седиментационных районов (рисунок 1). Эстуарий р. Преголя и юго-западный районы преимущественно аккумулятивные, характеризующиеся наличием довольно значительных площадей современных отложений с мощностью 15–20 см и широким развитием тонкого илистого материала в их составе. В центральном районе илистые отложения не имеют широкого распространения, так как существующие гидродинамические условия не способствуют осаждению и аккумуляции мелких осадочных частиц.

В пространственном распределении тяжелых металлов в поверхностном слое ДО выделяются два ареала повышенного их содержания (Чечко, Топчая, 2022). Один из них находится в углубленном, срединном участке эстуария, где в илистых отложениях выявлены наибольшие для залива содержания Co (15.3 мг/кг) и Ni (25.7 мг/кг), а также повышенные значения Cu (16.4 мг/кг) и Pb (12.4 мг/кг). Другой расположен в юго-западном седиментационном районе, в местах развития самых тонких из ДО – глинистых илов. Здесь были выявлены максимальные для залива содержания Cu (28.4 мг/кг) и Pb (16.4 мг/кг). В образцах ДО, отобранных на этих станциях, определены также высокие концентрации и других элементов.

Используя данные о содержаниях Co , Ni , Cu и Pb , а также учитывая состав ДО, мы провели их эколого-геохимическую оценку, применяя различные методологические подходы. Остановимся подробнее на результатах расчетов.

Коэффициенты концентрации и степени загрязнения

Результаты расчета коэффициентов концентрации по каждому элементу приведены в таблице 2. Из нее видно, что, в целом для залива значения коэффициентов концентрации донных отложений тяжелыми металлами находятся на границе низкого и умеренного. Значения K_c , превышающие 1, характерны для Со и Рb (в юго-западном седиментационном районе также и для Си). Наибольшие из них выявлены в эстуарном (Со – 2.2) и юго-западном седиментационных районах (Си – 1.61, Рb – 1.83), в центральном районе значения коэффициентов концентрации не превышают 1.

Табл. 2 – Значения коэффициентов концентрации (K_c) и степеней загрязнения (C_d) донных осадков Калининградского залива

Седиментационный район	Номер станции	K_c				C_d
		Со	Си	Ni	Рb	
Эстуарий р. Преголи	510	1.96	0.86	0.66	1.6	5.08
	518	0.34	0.13	0.46	0.22	1.15
	528	2.2	0.91	0.7	1.4	5.21
	538	0.27	0.12	0.5	0.56	1.45
	546	0.28	0.23	0.46	0.64	1.61
	582	0.71	0.33	0.23	0.44	1.71
Центральный	588	0.27	0.22	0.26	0.78	1.53
	614	1.06	0.72	0.34	1.47	3.59
	626	0.41	0.23	0.19	0.78	1.68
Юго-западный	632	0.39	0.33	0.19	0.67	1.58
	646	0.2	0.23	0.19	0.07	0.69
	650	0.33	0.23	0.11	1.1	1.77
	678	1.83	1.61	0.63	1.67	5.74
	680	0.36	1.5	0.32	1.1	3.28
	691	1.76	1.6	0.69	1.83	5.88

Об уровне загрязнения ДО можно судить по показателям степени загрязнения (которая определялась как сумма всех коэффициентов концентрации для данной станции). В эстуарном и юго-западном седиментационных районах он оценивается от слабого до умеренного (C_d меняется в пределах 0.69–5.88), в центральном районе уровень загрязнения ДО слабый (C_d не превышает 4). В эстуарном районе наибольший вклад в эти показатели вносят коэффициенты концентрации, рассчитанные для Со и Рb, а в юго-западном так же и для Си. Для Ni во всех районах седиментации определены низкие значения K_c .

Таким образом, рассчитанные значения коэффициентов концентрации и степеней загрязнения указывают на незначительное загрязнение ДО залива тяжелыми металлами, особенно это касается центрального района седиментации.

Модифицированный суммарный показатель загрязнения

Согласно (Куракина, Шлыгина, 2017), модифицированный суммарный показатель загрязнения (Z_y) дает возможность оценить нагрузку на ДО с учетом сразу всех изученных загрязнителей. Результаты расчетов, выполненных по этому критерию, показали, что наименьшее загрязнение ДО наблюдается в центральном районе, а самые высокие значения суммарного показателя (3.88 и 3.74) характерны для юго-западного района. Однако, не смотря на выявленные колебания, значения Z_y не превышают 5 ни на одной из станций. Поэтому, в соответствии со шкалой оценки состояния ДО по модифицированному суммарному показателю загрязнения, в акватории Калининградского залива они могут быть определены как чистые.

Индекс геоаккумуляции

Результаты расчета данного индекса (таблица 3) показали, что ДО можно в целом охарактеризовать как незагрязненные. Это относится и к эстуарию р. Преголи, максимально подверженному техногенной нагрузке. По индексу геоаккумуляции абсолютное большинство изученных в эстуарии проб ДО по всем изученным тяжелым металлам относятся к классу незагрязненных. Исключением является единственная станция (528), на которой уровень загрязненности ДО по Со можно отнести к умеренному.

Табл. 3 – Значения индексов геоаккумуляции (I_{geo}) металлов в донных осадках Калининградского залива

Седиментационный район	Номер станции	I_{geo}			
		Со	Сu	Ni	Pb
Эстуарий р. Преголи	510	0.35	-0.81	-1.18	-0.1
	518	-2.13	-3.56	-1.71	-2.91
	528	0.54	-0.72	-1.11	-0.12
	538	-2.47	-3.84	-1.63	-1.65
	546	-2.39	-2.55	-1.71	-1.19
	582	-1.07	-2.2	2.71	-1.87
Центральный	588	-2.47	-2.10	-2.56	-0.97
	614	-0.50	-1.11	-2.07	-0.52
	626	-1.86	-2.47	-3.07	-1.12
Юго-западный	632	-1.96	-2.35	-2.98	-1.38
	646	-2.63	-2.54	-3.02	1.24
	650	-2.19	-2.56	-2.61	-0.54
	678	0.29	0.07	-1.26	0.06
	680	-2.07	-0.01	-2.21	-0.42
	691	0.22	0.02	-1.14	0.28

В юго-западном районе по величине индекса геоаккумуляции большая часть проб по всем тяжелым металлам также относится к классу незагрязненных. Умеренным уровнем загрязненности по трем элементам (Co, Cu и Pb) характеризуются ДО на ст. 678 и 691. В центральном седиментационном районе по I_{geo} все изученные пробы относятся к классу незагрязненных.

Индекс антропогенной нагрузки

Значения индексов антропогенной нагрузки (таблица 4) показывают, что на большинстве станций эстуарного и юго-западного районов уровень загрязнения ДО низкий. Только на двух станциях в эстуарии (ст. 510 и 528) и юго-западном районе (ст. 678 и 691) осадки по индексу *PLI* соответствуют умеренному уровню загрязнения. В центральном районе не выявлено повышения уровня загрязнения, на всех станциях он оценен как «низкий».

Табл. 4 – Значения индекса антропогенной нагрузки (*PLI*) для донных осадков Калининградского залива

Седиментационный район	Номер станции	Величина <i>PLI</i>		
		Для станции	Для района	Для всего залива
Эстуарий р. Преголи	510	1.16	0.49	0.49
	518	0.25		
	528	1.18		
	538	0.31		
	546	0.37		
	582	0.39		
Центральный	588	0.33	0.44	
	614	0.79		
	626	0.33		
Юго-западный	632	0.20	0.52	
	646	0.27		
	650	0.31		
	678	1.32		
	680	0.66		
	691	1.37		

Согласно методике, описанной выше, использование индекса антропогенной нагрузки позволяет определить уровень загрязнения ДО не только для конкретной станции, но и для всего изучаемого объекта. Мы попытались применить данный подход для интегральной оценки уровня загрязнения залива. Результаты проведенных расчетов (таблица 3) свидетельствуют о низком загрязнении ДО выделенных седиментационных районов (*PLI* не превышает 0.52), а также и всего залива в целом (*PLI* составляет 0.49).

Сопоставление различных подходов для оценки уровней загрязненности ДО Калининградского залива тяжелыми металлами показало вполне сравнимые результаты. В целом для залива уровень загрязненности ДО характеризуется как «низкий». Однако, если сравнить уровни загрязненности отдельных седиментационных районов, то между ними выявляются некоторые различия.

По всем приведенным в исследовании показателям наименьшим уровнем загрязнения характеризуются ДО центрального района. На наш взгляд, это объясняется спецификой осадконакопления, определяемого в этом районе залива интенсивностью водообмена с морем. По своим гидродинамическим условиям он является преимущественно транзитным для мелкодисперсного осадочного материала, в связи с чем илистые частицы не являются доминирующими в составе ДО. В то же время известно (Liu-Xin wei et al., 1996), что интенсивность аккумуляции в ДО загрязняющих веществ зависит от их вещественно-генетического типа, при этом максимальное накопление свойственно как раз илистым отложениям.

По значениям C_d , I_{geo} , PLI , Z_y ДО эстуарного района оцениваются как слабозагрязненные, за исключением станций 510 и 528, на которых они соответствует умеренному уровню загрязнения. Это обусловлено тем, что данные станции расположены в углублении старого фарватера – устойчивом аккумулятивном участке с высокими скоростями осадконакопления, выполняющего роль естественной ловушки для загрязняющих веществ, поступающих от различных источников (Чечко, Топчая, 2022; Blazchishin, 1998).

Юго-западный седиментационный район преимущественно аккумулятивный, с широким развитием илистых отложений, а также отсутствующих в других частях залива глинистых илов. ДО этого района так же, как и эстуарного, по всем показателям характеризуются как слабозагрязненные, только на станциях 678 и 691 уровень загрязненности возрастает до умеренного. Такое увеличение можно связать с большим количеством илистых и глинистых частиц в составе ДО, а также с гидродинамическими особенностями, способствующими образованию здесь динамически застойных условий с высокими уровнями концентраций загрязняющих веществ (Богданов, Воронцов, Морозова, 2004).

Полученные результаты однозначно свидетельствуют, что, не смотря на антропогенную нагрузку, в ДО залива не наблюдается антропогенной составляющей тяжелых металлов. Значения концентраций Co , Cu , Pb и Ni в ДО Калининградского залива не превышают геохимического фона, а также кларка в земной коре (Чечко, Топчая, 2022). Одной из причин скудного обогащения осадков загрязняющими веществами может быть действие естественного механизма самоочищения. Особенностью современной седиментации залива являются активные процессы ветро-волнового взмучивания ДО. При этом некоторые сорбированные подвижные формы тяжелых металлов и иных поллютантов переходят от взмученных осадочных частиц в воду, а некоторые вместе с илистым и глинистым осадочным материалом выносятся в море при сгонных явлениях (Чечко, Топчая, 2023).

Заключение

Результаты использования различных показателей (C_d , I_{geo} , PLI , Z_y) для эколого-геохимической оценки донных отложений оказались вполне сопоставимыми. В целом донные отложения Калининградского залива можно отнести к слабозагрязненным. Отдельные локальные пятна с умеренным уровнем загрязненности встречаются в юго-западном седиментационном районе и в эстуарии р. Преголи, в местах развития тонкодисперсных илистых отложений, способных интенсивно накапливать загрязняющие вещества. К наиболее чистым (с точки зрения содержания в них тяжелых металлов) относятся донные отложения центрального района, что объясняется спецификой осадконакопления, не способствующей аккумуляции на дне илистых осадочных частиц. В заливе действует естественный механизм самоочищения, являющийся одним из важнейших факторов, положительно влияющим на эколого-геохимическое состояние донных отложений (Blazchishin, 1998), так как при взмучивании донных отложений придонными течениями сорбированные подвижные формы тяжелых металлов и иные поллютанты вновь переходят в воду.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИО РАН № FMWE–2024–0025.

Список литературы

1. Богданов Н. А., Воронцов А. А., Морозова Л. Н. Тенденции химического загрязнения и динамика Калининградского залива // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 5. С. 576–590. <https://doi.org/10.1023/B:WARE.0000041921.10115.c9>.
2. Даувальтер В. А. Геоэкология донных озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
3. Емельянов В. А., Митропольский А. Ю., Наседкин Е. И. Геоэкология Черноморского шельфа Украины. Киев: Академперіодика, 2004. 324 с.
4. Емельянов Е. М., Блажчишин А. И., Кобленц-Мишке О. И., Кравцов В. А., Стрюк В. Л., Харин Г. С. Экологическая и геохимическая обстановки в восточной Балтике. В кн.: Сборник статей по материалам конференции «Проблемы изучения и охраны природы Куршской косы». Калининград: ГП «КГТ», 1998. С. 148–185.
5. Закруткин В. Е., Гибков Е. В., Решетняк О. С., Решетняк В. Н. Донные отложения как индикатор первичного и вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 259–271. <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>.
6. Комов В. Т., Томилина И. И. Токсичность донных отложений озер северо-запада России: влияние закисления и тяжелых металлов // Биология внутренних вод. 1999. № 1–3. С. 141–147.
7. Куракина Н. И., Шлыгина Н. С. Оценка состояния донных отложений по результатам контрольных измерений концентраций загрязняющих веществ в восточной части Финского залива // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 82–78.
8. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив, разработанный в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1. СПб., 1996. 20 с.

9. *Петелин В. Н.* Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 129 с.
10. Регион Калининградского / Вислинского залива: современное состояние и сценарии развития / под ред. В. Кушевски, Г. М. Федорова, Б. В. Чубаренко, В. А. Гриценко. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. 216 с.
11. *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.
12. *Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасов А. И., Саркисян С. Ш.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
13. *Чечко В. А., Топчая В. Ю.* Многолетняя динамика состава верхнего слоя донных отложений в неглубоком водоеме лагунного типа (на примере Калининградского залива Балтийского моря) // Известия КГТУ. 2023. № 71. С. 147–158. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2023-71-147-158>.
14. *Чечко В. А., Топчая В. Ю.* Пространственное распределение тяжелых металлов в донных осадках Калининградского залива // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 86–91. <https://doi.org/10.17513/37893>.
15. *Чечко В. А., Топчая В. Ю., Бабаков А. Н.* Новая карта донных осадков Калининградского залива Балтийского моря // Известия КГТУ. 2023. № 69. С. 44–56. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2023-69-44-56>.
16. *Blazchishin A. I.* Zur Geoekologie des Kurischen und des Frischen Haffs // Schriftenr. f. Geowiss. Berlin. 1998. Vol. 7. P. 39–57.
17. *Chechko V. A.* Evolution of sedimentation in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea due to anthropogenic impact // Revista de la Universidad del Zulia. 2021. No. 33. P. 131–148. <https://doi.org/10.46925/rdluz.33.10>.
18. *Chechko V., Chubarenko B.* Influence of hydraulic modification of the Vistula Lagoon in XIX century on sedimentation. Abstract volume of 11th Baltic Sea Science Congress ‘Living along gradients: past, present, future’. Rostock. 2017. P. 323.
19. *Forstner U.* Metal Pollution in the Aquatic Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 210 p.
20. *Hakanson L.* An ecological risk index for aquatic pollution control – A sedimentological approach // Water Research. 1980. Vol. 14. P. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
21. *Kennish M. J.* Coastal lagoon. In: Kennish M. J. (Ed), Encyclopedia of Estuaries, Springer. 2015. P. 140–143. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_47.
22. *Liu Xin-wei, Wu Jing-yang, Cai Yue-gin* Background study on non-residual phase of elements in Changjiang and Huanghe estuarine sediments // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 1996. Vol. 14. No. 3. P. 282–290. <https://doi.org/10.1007/BF02850392>.
23. *Müller G.* Schwemetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971 // Umschau. 1979. Vol. 79. P. 778–783.
24. *Tomlinson D. L., Wilson J. G., Harris C. R., Jeffney D. W.* Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1980. Vol. 33. P. 566–572. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>.
25. *Uscinowicz S., Zachowicz J.* Geochemical Atlas of the Vistula Lagoon. Warszawa, 1996. 84 p.
26. *Windom H. L., Schropp S. J., Calder F. D.* Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States // Environmental Sciences and Technology. 1989. Vol. 23. P. 314–320.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024, одобрена к печати 17.02.2025.

Для цитирования: Чечко В. А., Топчая В. Ю. Эколого-геохимическая оценка донных отложений в условиях антропогенной нагрузки (на примере Калининградского залива Балтийского моря) // *Океанологические исследования*. 2025. № 53 (1). С. 172–186. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).8).

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF BOTTOM SEDIMENTS UNDER ANTHROPOGENIC LOAD (the example of the Kaliningrad Bay of the Baltic Sea)

V. A. Chechko, V. Yu. Topchaya

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: che-chko@mail.ru*

Based on data on the content of heavy metals (Pb, Cu, Ni and Co) the level of pollution of bottom sediments of the Kaliningrad Bay were assessed. For this purpose, indicators were used: pollution factors (C_p) and pollution degree (C_d), modified total pollution index (Z_y), geoaccumulation index (I_{geo}) and anthropogenic load index (PLI). The results of calculations of various indicators turned out to be quite comparable, and the level of pollution of the bottom sediments of the bay can, in general, be characterized as low. At the same time, if we consider the pollution levels of bottom sediments in individual sedimentation areas of the bay, identified by morphological, hydrodynamic and lithological characteristics, then some differences are observed between them. According to all indicators, the lowest level of pollution is found in the bottom sediments of the central area, which is explained by the peculiarities of lithodynamics and the granulometric composition of sediments. Bottom sediments of the estuarine and southwestern areas are also assessed as slightly polluted, but in some places they correspond to a moderate level of pollution. The results of the study indicate the absence of anthropogenic components of heavy metals in the bottom sediments of the bay, which is due, in particular, to the action of the natural self-purification mechanism.

Keywords: bottom sediments, sedimentation, heavy metals, pollution level, Kaliningrad Bay

Acknowledgment: the work was supported by the state assignment of the Institute of Oceanology RAS No. FMWE–2024–0025.

References

1. Blazchishin, A. I., 1998: Zur Geoekologie des Kurischen und des Frischen Haffs. *Schriftenr. f. Geowiss.*, Berlin, 7, 39–57.
2. Bogdanov, N. A., A. A. Vorontsov, and L. N. Morozova, 2004: Tendencii himicheskogo zagryazneniya i dinamika Kaliningradskogo zaliva (Trends in Chemical Pollution and Dynamics of the Kaliningrad Bay). *Water resources*, 31 (5), 576–590, <https://doi.org/10.1023/B:WARE.0000041921.10115.c9>.

3. Chechko, V. A., 2021: Evolution of sedimentation in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea due to anthropogenic impact. *Revista de la Universidad del Zulia*, **33**, 131–148, <https://doi.org/10.46925/rdluz.33.10>.
4. Chechko, V. and B. Chubarenko, 2017: Influence of hydraulic modification of the Vistula Lagoon in XIX century on sedimentation. *Abstract volume of 11th Baltic Sea Science Congress 'Living along gradients: past, present, future'*, Rostock, 323 p.
5. Chechko, V. A. and V. Yu. Topchaya, 2023: Mnogoletnyaya dinamika sostava verhnego sloya donnyh otlozhenij v neglubokom vodoeme lagunnogo tipa (na primere Kaliningradskogo zaliva Baltijskogo morya) (Long-term dynamics of the composition of the upper layer of bottom sediments in a shallow lagoon-type basin (the example of Kaliningrad Bay in the Baltic Sea). *Izvestija KGTU*, **71**, 141–158, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2023-71-147-158>.
6. Chechko, V. A. and V. Yu. Topchaya, 2022: Prostranstvennoe raspredelenie tyazhelyh metallov v donnyh osadkah Kaliningradskogo zaliva (Spatial distribution of heavy metals in bottom sediments of the Kaliningrad bay). *Advances in current natural sciences*, **3**, 86–91, <https://doi.org/10.17513/37893>.
7. Chechko, V. A., V. Yu. Topchaya, and A. N. Babakov, 2023: Novaya karta donnyh osadkov Kaliningradskogo zaliva Baltijskogo morya (New map of bottom sediments in the Kaliningrad Bay of the Baltic Sea). *Izvestija KGTU*, **69**, 44–56, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2023-69-44-56>.
8. Dauvalter, V. A., 2012: *Geoekologiya donnyh ozer (Geoecology of bottom sediments of lakes)*. Murmansk, MSTI, 242 p.
9. Emelyanov, V. A., A. Yu. Mitropolsky, and E. I. Nasedkin, 2004: *Geoekologiya Chernomorskogo shel'fa Ukrainy (Geoecology of the Black Sea shelf of Ukraine)*. Kyiv, Academperiodica, 324 p.
10. Emelyanov, E. M., A. I. Blazhchishin, O. I. Koblenz-Mishke, V. A. Kravtsov, V. L. Stryuk, and G. S. Kharin, 1998: Ekologicheskaya i geohimicheskaya obstanovki v vostochnoj Baltike (Ecological and geochemical conditions in the eastern Baltic). *Collection of articles based on the materials of the conference "Problems of studying and protecting the nature of the Curonian Spit"*. Kaliningrad, 148–185.
11. Forstner, U., 1979: *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin, Springer-Verlag, 210 p.
12. Hakanson, L., 1980: An ecological risk index for aquatic pollution control – A sedimentological approach. *Water Research*, **14**, 975–1001, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
13. Kennish, M. J., 2015: Coastal lagoon. *Encyclopedia of Estuaries*, Springer, 140–143, https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_47.
14. Komov, V. T. and I. I. Tomilina, 1999: Toksichnost' donnyh otlozhenij ozer severo-zapada Rossii: vliyanie zakisleniya i tyazhelyh metallov (Toxicity of bottom sediments of lakes in northwestern Russia: the influence of acidification and heavy metals). *Biology of inland waters*, **1–3**, 141–147.
15. Kurakina, N. I. and N. S. Shlygina, 2017: Ocenka sostoyaniya donnyh otlozhenij po rezul'tatam kontrol'nyh izmerenij koncentracij zagryaznyayushchih veshchestv v vostochnoj chasti Finskogo zaliva (Assessment of the state of bottom sediments based on the results of control measurements of pollutant concentrations in the eastern part of the Gulf of Finland). *Saint Petersburg Electrotechnical University News*, **4**, 82–78.
16. Liu, Xin-wei, Wu Jing-yang, and Cai Yue-gin, 1996: Background study on non-residual phase of elements in Changjiang and Huanghe estuarine sediments. *Chinese Journal Oceanology and Limnology*, **14** (3), 282–290, <https://doi.org/10.1007/BF02850392>.
17. Müller, G., 1979: Schwemetalle in den Sedimenten des Rheins–Veränderungen seit 1971. *Umschau*, **79**, 778–783.

18. *Normy i kriterii ocenki zagryaznennosti donnykh otlozhenij v vodnykh ob'ektakh Sankt-Peterburga*. Regional'nyj normativ, razrabotannyj v ramkah rossijsko-gollandskogo sotrudnichestva po programme PSO 95/RF/3/1 (Standards and criteria for assessing pollution of bottom sediments in water bodies of St. Petersburg. Regional standard developed within the framework of Russian-Dutch cooperation under the PSO 95/RF/3/1 program). Saint Petersburg, 1996. 20 p.
19. Petelin, V. N., 1967: *Granulometricheskij analiz morskikh donnykh osadkov (Grain-size analysis of marine bottom sediments)*. Moscow, Nauka, 129 p.
20. *Region Kaliningradskogo – Vislinskogo zaliva: sovremennoe sostoyanie i scenarii razvitiya (The Kaliningrad – Vistula Lagoon Region: Current Status and Development Scenarios)*. Ed. V. Kushevski, G. M. Fedorov, B. V. Chubarenko and V. A. Gritsenko. Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University, 2014, 216 p.
21. Reshetnyak, O. S. and V. E. Zakrutkin, 2016: Donnye otlozheniya kak istochnik vtorichnogo zagryazneniya rechnyh vod metallami (Bottom sediments as a source of secondary water pollution by metals). *News of Universities, North Caucasus Region. Natural Sciences*, **4**, 102–109.
22. Saet, Yu. E., B. A. Revich, E. P. Yanin, R. S. Smirnova, I. L. Basharkevich, T. L. Onishchenko, L. N. Pavlova, N. Ya. Trefilova, A. I. Achkasov, and S. Sh. Sargsyan, 1990: *Geohimiya okruzhayushchej sredy (Environmental geochemistry)*. Moscow, Nedra, 335 p.
23. Tomlinson, D. L., J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffney, 1980: Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, **33**, 566–572, <https://doi.org/10.1007/BF02414780>.
24. Uscinowicz, S. and J. Zachowicz, 1996: *Geochemical Atlas of the Vistula Lagoon*, Warszawa, 84 p.
25. Windom, H. L., S. J. Schropp, and F. D. Calder, 1989: Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States. *Environmental Sciences and Technology*, **23**, 314–320.
26. Zakrutkin, V. E., E. V. Gibkov, O. S. Reshetnyak, and V. N. Reshetnyak, 2020: Donnye otlozheniya kak indikator pervichnogo i istochnik vtorichnogo zagryazneniya rechnyh vod uglepromyshlennykh territorij Vostochnogo Donbassa (River Sediments as River Waters' Primary Pollution Indicator and Secondary Pollution Source in East Donbass Coal-Mining Areas). *News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, **84** (2), 259–271, <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>.

Submitted 02.10.2024, accepted 17.02.2025.

For citation: Chechko, V. A. and V. Yu. Topchaya, 2025: Ecological and geochemical assessment of bottom sediments under anthropogenic load (the example of the Kaliningrad Bay of the Baltic Sea). *Journal of Oceanological Research*, **53** (1), 172–186, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).8](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).8).