ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ (ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.21672/2077-6322-2021-82-3-049-055

АССИМИЛЯЦИОННАЯ ЁМКОСТЬ МАРГИНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ЭКОСИСТЕМЫ УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ ВОЛГИ

***Светашева Диана Рафаилевна*,** младший научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Российская Федерация, 414024, г. Астрахань, ул. Ширяева, 14, svetashevadr@yandex.ru

***Татарников Виталий Олегович*,** старший научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Российская Федерация, 414024, г. Астрахань, ул. Ширяева, 14, tatarnikov@caspianmonitoring.ru

***Очеретный Максим Александрович*,** научный сотрудник, Каспийский морской научно-исследовательский центр, Российская Федерация, 414024, г. Астрахань, ул. Ширяева, 14, netstormmaktatis@gmail.ru

Приоритетным направлением совершенствования государственного управления и охраны водных объектов является разработка нормативов допустимого воздействия на водные объекты, учитывающих региональные особенности и индивидуальные характеристики водных объектов. Основой разработки таких нормативов может стать концепция ассимиляционной ёмкости. Целью работы явилось определение ассимиляционной ёмкости устьевого взморья р. Волги. За основу метода расчета было взято уравнение предложенное академиками Ю. А. Израэль и А. В. Цыбань. По материалам многолетних геоэкологических исследований проведена оценка степени воздействия металлов на экосистему мелководной части устьевого взморья р. Волги. В статье также использовались представления о маргинальном фильтре. Экологические расчеты ассимиляционной ёмкости для значительного по размерным характеристикам маргинального фильтра, как устьевая область р. Волги, проводились по нескольким пунктам, расположенным в пределах устьевого взморья. В данной работе использовались вековые разрезы государственной наблюдательной сети. Исследованные материалы подтверждают, что значения ассимиляционной емкости подвержены значительным внутри- и межгодовым колебаниям, однако, основным параметром, определяющим объемы ассимиляционной емкости меди и цинка, является сток р. Волги. Результаты исследований подтверждают, что объемы меди и цинка поступающие в Каспийское море с речным стоком полностью ассимилируется в мелководной части взморья.

Ключевые слова: ассимиляция, экосистема, фильтр, взморье, устье реки, медь, цинк, самоочищение, загрязняющие вещества, пороговый эффект воздействия, оценка загрязнения морской среды, токсический эффект, пороговая концентрация

ASSIMILATION CAPACITY OF THE MARGINAL FILTER OF THE ECOSYSTEM OF THE ESTUARINE COAST OF THE VOLGA

***Svetasheva Diana R.*,** Gunior researcher, Caspian Marine Scientific Research Center, 14 Shiryaeva St., Astrakhan, 414024, Russian Federation, svetashevadr@yandex.ru

***Tatarnikov Vitaly O.*,** Senior researcher, Caspian Marine Scientific Research Center, 14 Shiryaeva St., Astrakhan, 414024, Russian Federation, tatarnikov@caspianmonitoring.ru

***Ocheretny Maxim A.*,** Research fellow, Caspian Marine Scientific Research Center, 14 Shiryaeva St., Astrakhan, 414024, Russian Federation, netstormmaktatis@gmail.ru

According to the data of long-term observations, the assessment of the degree of impact of copper and zinc on the ecosystem of the shallow part of the estuarine coast of the Volga River was carried out. There are the ideas of the marginal filter and the assimilation capacity were used in the article. The calculation of the assimilation capacity for a marginal filter significantly based on the dimensional characteristics, such as the estuarine region of the Volga River, was carried out at several points located within the estuarine seashore. In this work the century-old sections of the state observation network were used. It can be seen from the calculated data that the value of the assimilation capacity is subject to significant intra-and inter-annual fluctuations. The main parameter determining the volume

of the assimilation capacity of copper and zinc is fairly called the flow of the Volga River. According to the results of the study, it can be argued that the observed level of copper and zinc runoff into the Caspian Sea is completely assimilated in the shallow part of the seashore.

Keywords: assimilation capacity, estuary area of the Volga River, copper, zinc, self-purification of the ecosystem, pollutants, threshold effect of exposure, assessment of marine pollution, toxic effect, threshold concentration

Разработка процедуры нормирования нагрузки на окружающую среду является одной из первоочередных задач экологии. Таким показателем может быть предельно-допустимая емкость (ПДЕ), под которой подразумевается такое значение общего потока вредного вещества, проходящего через данную территорию (акваторию), при котором обеспечивается соблюдение нормативов качества среды и сохранение целостности экосистем [8].

В токсикологии широко применяется понятие порогового эффекта воздействия загрязняющих веществ (ЗВ) на экосистему. Данная концепция легла в основу теории о способности экосистемы переработать внесение определенного количества ЗВ без развития губительных для обитающих в ней организмов последствий. Численное выражение способности экосистемы к самоочищению носит термин «ассимиляционная ёмкость» [3].

Ассимиляционную ёмкость, разработанную на основе анализа экологических последствий загрязнения Мирового океана, можно считать теоретической основой экологической оценки загрязнения морской среды. Эту концепцию предложено использовать для экологического нормирования сброса загрязняющих веществ в морские водоёмы [8]. Таким образом, представляется важным определить пороговое значение массы каждого ЗВ, которое за единицу времени может быть накоплено, разрушено, трансформировано и выведено за счет процессов седиментации, диффузии, биоразложения или любого другого переноса за пределы экосистемы без нарушения ее нормального функционирования [3].

Методология проведения работы

При разработке системы нормирования, основанной на концепции ассимиляционной ёмкости, необходимо учитывать не только токсикологические свойства ЗВ, но физико-химические условия среды. Так, например, в жесткой воде, характерной для Северного Каспия, часть меди связывается, токсический эффект от меди возрастает в комбинации с цинком и кадмием [7].

Определенную трудность составляет определение ассимиляционной ёмкости эссенциальных микроэлементов, к которым относятся медь и цинк. Эти тяжёлые металлы являются неотъемлемой частью окружающей среды и, несмотря на то, что основным источником поступления их в Каспийское море является речной сток (табл. 1) и сосредоточенные в водосборном бассейне р. Волги объекты хозяйственной деятельности, большое количество меди и цинка вымывается из горных пород, а также поступает в воду при разложении биологического материала [2; 13].

Таблица 1

Сток меди и цинка (г/п Верхнелебяжье) в 2018–2020 гг.

Показатели	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднемноголетнее значение (1982–2017 гг.)
Цинк, тыс. т	3,38	4,56	12,64	6,84
Медь, тыс. т	0,41	0,95	0,45	1,63

Фактором, определяющим динамику этих металлов в воде р. Волги, является многолетняя и сезонная изменчивость речного стока [4], при этом повышение содержания меди и цинка выявляется в основном в период половодья [14]. В статистических исследованиях при уровне значимости $\alpha = 0,1$, высока вероятность

того, что динамика загрязненности цинком речных вод зависит в большей степени от природных факторов, а медью – от антропогенных [13].

Устьевая область р. Волги является геохимическим барьером между материковым стоком и морем, в этой зоне особенно интенсивно происходят процессы самоочищения воды (коагуляция, седиментация) [6].

Большой практический интерес представляет то количество тяжелых металлов, которое может быть депонировано в данной области.

Для расчёта ассимиляционной емкости (A_i) было предложено следующее уравнение, показывающее суммарное удаление загрязняющего вещества из морской экосистемы:

$$A_i = k_i \frac{V}{\tau_i} \overline{C_1}, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент запаса, отражающий экологические условия протекания процесса загрязнения в различных зонах морской экосистемы, τ_i – время пребывания i-го загрязняющего вещества в морской экосистеме; – объем рассматриваемой морской экосистемы; $\overline{C_1}$ – средняя концентрация загрязняющего вещества.

Коэффициент запаса k_i – это экспериментально установленное для вида – «мишени» отношение пороговой концентрации загрязняющего вещества (CL_0) к полулетальной концентрации (CL_{50}). В исследовательской литературе [9–10; 12] чаще всего приводятся значения концентраций CL_{50}. В то же время для установления ПДК используют значение пороговой концентрации загрязняющего вещества, деленное на коэффициент запаса. Таким образом, ПДК оказывается связанным с CL_0, и в условиях отсутствия данных по показателю предполагается использовать значение ПДК (табл. 2) [11].

Таблица 2

Значения ПДК, пороговой концентрации и полулетальной концентрации загрязняющего вещества (CL_0/CL_{50})

Загрязняющие вещества	ПДК, мг/дм^3	Фитопланктон	Зоопланктон	Бентос
Zn	0,05	эссенциальный 25/- мкг/л*	-/0,2 мг/л* -/0,08 мг/л*	-/0,2 мг/л*
Cu	0,005	1/20 мкг/л*	-/0,5 мг/л* -/0,28 мг/л*	-/0,5 мг/л*

Примечание: **Exuviaella cordata, Aphanizomenon flosaquae, Thalassiosira caspica, Rhizosolenia calcaravis*; Морские беспозвоночные [9–10]

Время пребывания загрязняющего вещества в экосистеме в исследованиях [15] рассчитывалось с использованием меток из радиоактивных изотопов. В нашем случае, когда экосистема ограничена объёмом маргинального фильтра, представляющем из себя устьевую область с весомым влиянием речного стока, время пребывания загрязняющего вещества можно оценить через гидрологические расчеты времени «добегания» частицы смешения от речной воды до морской [3]:

$$\tau_i = \frac{\Delta x}{v_0} e^{\frac{k\Delta x}{2h(x)}}, \quad (2)$$

где τ_i – отрезок времени, за который частица воды пробегает путь, равный Δx, V_0 – средняя скорость потока на выходном участке рукава, h – глубина в точке, k – удельное сопротивление, которое принято на уровне 0,004.

Средняя скорость потока на конечном участке рукава, расположенном на речном баре, полностью определяется расходом воды в реке. Зная расход воды по г/п Верхнеелебяжье и площадь исследуемого участка акватории, можно расчётными методами получить среднюю скорость потока. Глубина расположения речного бара

равна 1 м, получение площади смоченного периметра обусловлено только протяженностью речного бара или приблизительно 1-метровой изобатой. Ориентировочно за протяженность речного бара можно принять длину морского края дельты р. Волги, которая в среднем составляет 175 км [15]. При этом средний расход будет равен 6000 м^3/с. Таким образом, скорость потока V_0 на речном баре составит 29,2 см/сек.

Южная граница маргинального фильтра располагается в 200 км от морского края дельты (см. выше), а средняя глубина района границы составляет 10 м при уровне моря – 28 м [15]. Подставив все значения в формулу 2, мы сможем рассчитать время пребывания частички смешения в маргинальном фильтре, которое составляет порядка 374 суток.

Для такого большого по размерным характеристикам маргинального фильтра, как устьевая область р. Волги, расчёт ассимиляционной ёмкости можно вести по нескольким точкам, расположенным в пределах устьевого взморья. В данной работе использовались вековые разрезы государственной наблюдательной сети. Расчет A_i в рамках данной работы проводился в 2018–2020 гг. два раза в год в апреле, в период начала половодья и в июле, после окончания половодья (табл. 3). Сток р. Волги по месяцам представлен в таблице 3.

Таблица 3

Объем стока р. Волги по месяцам

Год	Сток, м^3	
	апрель	июль
2018	45,0	22,4
2019	21,2	13,04
2020	46,8	-

Результаты и их обсуждение

Подставив в формулу 1 все рассчитанные данные, выведены оценочные значения ассимиляционной емкости для цинка и меди на акватории устьевой области р. Волги (табл. 4, 5).

Таблица 4

Время пребывания частички смешения в заданной точке, объем участка и ассимиляционная емкость экосистемы по цинку за 2018–2020 гг.

№	Долгота	Широта	τ_i, сут.	V, км^3	A_i, т/сут.				
					2018		2019		2020
					апрель	июль	апрель	июль	апрель
Разрез III ГНС									
18	48°56'00"	45°29'00'	0,4	4,1	-	-	35311,2	5750,0	-
20	48°56'00"	45°13'00'	1,7	2,3	14672,6	7799,7	-	-	3427,0
22	48°56'00"	44°53'00'	11,1	6,4	5526,4	833,1	1490,4	324,0	1432,7
24	48°56'00"	44°33'00'	28,7	6,4	2444,0	158,3	642,2	124,0	670,1
25	48°56'00"	44°18'00'	1	2,9	27071,5	1885,0	6815	1158,6	8149,0

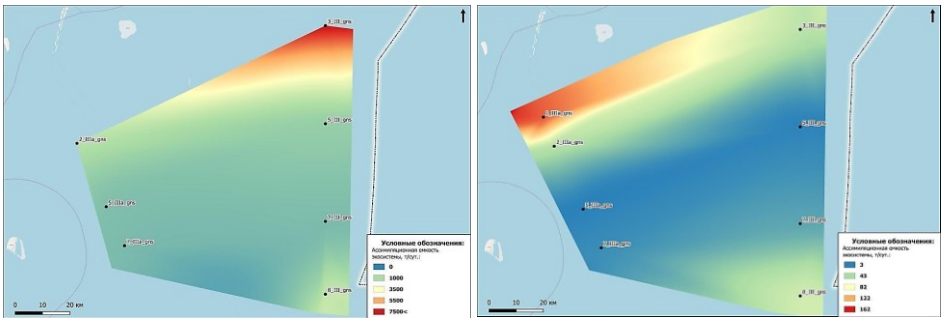
Разрез IIIа ГНС									
1	47°45'00"	44°55'00'	0,7	2,3	12502,1	-	-	-	-
2	47°48'00"	44°49'00'	1,2	1,4	5973,3	1680,0	6142,5	834,8	3301,6
5	47°56'00"	44°36'00'	3,6	1,4	316,9	278,0	1746,1	389,2	950,8
7	48°01'00"	44°28'00'	9	2,9	240,0	120,8	1628,8	373,3	1185,7

Таблица 5

Время пребывания частички смешения в заданной точке, объем участка и ассимиляционная емкость экосистемы по меди за 2018–2020 гг.

№	Долгота	Широта	τ_i, сут.	V, км^3	A_i, т/сут.				
					2018		2019		2020
					апрель	июль	апрель	июль	апрель
Разрез III ГНС									
20	48°56'00'	45°13'00'	1,7	2,3	50,7	29,7	153,7	2,7	11,1
22	48°56'00'	44°53'00'	11,1	6,4	4,0	15,5	10,0	1,2	6,3
24	48°56'00'	44°33'00'	28,7	6,4	18,9	3,0	7,6	4,1	3,7
25	48°56'00'	44°18'00'	1	2,9	59,4	69,6	89,9	37,7	69,6
Разрез IIIа ГНС									
1	47°45'00'	44°55'00'	0,7	2,3	142,9	-	-	-	-
2	47°48'00'	44°49'00'	1,2	1,4	48,4	28,5	20,4	1,8	24,5
5	47°56'00'	44°36'00'	3,6	1,4	3,3	8,9	11,6	1,2	6,2
7	48°01'00'	44°28'00'	9	2,9	8,0	2,2	7,2	0,6	6,7

Из рассчитанных данных видно, что значение A_i подвержено значительным внутри и межгодовым колебаниям. Сезонная изменчивость A_i по цинку и меди в 2018–2020 гг. синхронно с объемами стока увеличивается в период половодья и снижается в период межени. Основным параметром, определяющим объем A_i меди и цинка, справедливо назвать сток р. Волги, так как снижение скорости потока приводит к увеличению времени пребывания загрязняющего вещества в экосистеме. Схемы распределения объемов ассимиляционной емкости в северо-западной части устьевой области р. Волги представлены на рисунках 1 и 2.



а б

Рис. 1. Ассимиляционная емкость маргинального фильтра экосистемы р. Волги по цинку (а) и меди (б), тонн/сутки

Выводы

1. Основной пространственной характеристикой ассимиляционной емкости маргинального фильтра является её снижение в направлении от реки к морю.

2. Даже низкое значение A_i устьевой области р. Волги рассчитанное относительно меди и цинка по данной модели в пересчете на год оказывается достаточным для полной переработки объемов этих тяжелых металлов, поступающих со стоком р. Волги.

Список литературы

1. Алимов, А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем / А. Ф. Алимов. – СПб. : Наука, 2000. – 147 с.

2. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна / отв. ред. В. Ф. Бреховских, Е. В. Островская. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2017. – 406 с.

3. Израэль, Ю. А. Антропогенная экология океана : монография / Ю. А. Израэль, А. В. Цыбань. – М. : Наука, 2009. – 532 с.

4. Катунин, Д. Н. Содержание загрязняющих веществ в водоемах Волго-Каспийского бассейна / Д. Н. Катунин // Рыбохозяйственные исследования на Каспии : результаты НИР за 2001 г. – 2002. – С. 37–41.

5. Краснощеков, Г. П. Естественно-исторические аспекты формирования территории Волжского бассейна / Г. П. Краснощеков, Г. С. Розенберг // Известия Самарского НЦ РАН. – 1999. – № 1. – С. 108–117.

6. Лисицын, А. П. Маргинальный фильтр океанов / А. П. Лисицын // Океанология. – 1994. – № 5. – С. 735–747.

7. Водная токсикология / В. В. Метелев [и д.р.]. – М. : Наука, 1971. – 248 с.

8. Монахов, С. К. Метод и технологи идентификации загрязнения Северного Каспия / С. К. Монахов, В. О. Татарников, Е. Н. Макарова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 5. – С. 10–12.

9. Мур Дж. Тяжелые металлы в природных водах : контроль и оценка влияния / Дж. Мур, С. Рамамурти. – М. : Мир, 1987. – 288 с.

10. Общая токсикология / отв. ред. Б. А.Курляндский, В. А. Филова. – М. : Медицина, 2002. – 608 с.

11. Приказ Минсельхоза России от 12 октября 2018 г. № 454. Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552.

12. Патин, С. А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана / С. А. Патин. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 304 с.

13. Светашёва, Д. Р. Динамика многолетней изменчивости стока меди и цинка в Каспийское море (2009–2019 гг.) / Д. Р. Светашева [и др.] // Труды ГОИН. – 2020. – № 221. – С. 154–160.

14. Татарников, В. О. Многолетняя динамика и прогноз стока тяжелых металлов на Нижней Волге в связи с реализацией государственной программы «Оздоровление Волги» / В. О. Татарников, Е. В. Гаврилова // Вестник ВГУ. – 2019. – № 1. – С. 85–91.

15. Татарников, В. О. Ассимиляционная емкость маргинального фильтра р. Волги в отношении хлорорганических пестицидов / В. О. Татарников, Д. С. Даирова, М. А. Очеретный // Астраханский вестник экологического образования. – 2020. – № 6 (60). – С. 43–51.

References

1. Alimov, A. F. *Elementy teorii funkcionirovaniya vodnyh ekosistem* [Elements of the theory of functioning of aquatic ecosystems]. St. Petersburg, Nauka, 2000, 147 p.

2. Brekhovskikh, V. F., Ostrovskaya, E. V. *Zagryaznyayushchie veshchestva v vodah Volzhsko-Kaspijskogo bassejna* [Pollutants in the waters of the Volga-Caspian basin]. Astrakhan, Publisher Sorokin Roman Vasilyevich, 2017, 406 p.

3. Israel, Yu. A., Tsyban, A. V. *Antropogennaya ekologiya okeana: monografiya* [Anthropogenic ecology of the ocean: a monograph]. M., Nauka, 2009, 532 p.

4. Katunin, D. N. *Soderzhanie zagryaznyayushchih veshchestv v vodoemah Volgo-Kaspijskogo bassejna* [The content of pollutants in the reservoirs of the Volga-Caspian basin]. *Ry`boxozyajstvenny`e issledovaniya v Kaspijskom more: Rezul`taty` issledovanij dlya 2001–2002* [Fisheries research in the Caspian Sea: Research results for 2001–2002]. Pp. 37–41.

5. Krasnoshchekov, G. P., Rosenberg, G. S. *Estestvenno-istoricheskie aspekty formirovaniya territorii Volzhskogo bassejna* [Natural-historical aspects of the formation of the territory of the Volga basin]. *Izvestiya Samarskogo NC RAS* [News of Samara NC RAS]. 1999, no. 1, pp. 108–117.

6. Lisitsyn, A. P. *Marginal'nyj fil'tr okeanov* [Marginal filter of the oceans]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1994, no. 5, pp. 735–747.

7. Metelev, V. V. *Vodnaya toksikologiya* [Water toxicology]. Moscow, Nauka, 1971, 248 p.

8. Monakhov, S. K., Tatarnikov, V. O, Makarova, E. N. *Metod i tekhnologi identifikacii zagryazneniya Severnogo Kaspiya* [Method and technologies of identification of pollution of the Northern Caspian Sea]. *Oxrana okruzhayushhej sredy` v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas complex]. 2008, no. 5, pp. 10–12.

9. Moore, J., Ramamurti, S. *Tyazhelye metally v prirodnyh vodah: Kontrol' i ocenka vliyaniya* [Heavy metals in natural waters: Control and assessment of the impact]. M., Mir, 1987, 288 p.

10. Kurlyandsky, B. A., Filova, V. A. *Obshchaya toksikologiya* [General toxicology]. M., Medicine, 2002, 608 p.

11. Prikaz Minsel'hoza Rossii ot 12 oktyabrya 2018 g. № 454. *Prilozhenie k prikazu Ministerstva sel'skogo hozyajstva RF ot 13 dekabrya 2016 g. no. 55* [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 454 of October 12, 2018. Appendix to the order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016, no. 552].

12. Patin, S. A. *Vliyanie zagryazneniya na biologicheskie resursy i produktivnost' Miro-vogo okeana* [The impact of pollution on biological resources and productivity of the World Ocean]. M., Food Industry, 1979, 304 p.

13. Svetashev, D. R. *Dinamika mnogoletnej izmenchivosti stoka medi i cinka v Kaspij-skoe more (2009–2019 gg.)* [Dynamics of long-term variability of runoff of copper and zinc in the Caspian sea (2009–2019 gg.)]. *Materialy` SOI* [Proceedings of the SOI]. 2020. No. 221, pp. 154–160.

14. Tatarnikov, V. O., Gavrilova, E. V. *Mnogoletnyaya dinamika i prognoz stoka tyazhelyh metallov na Nizh-nej Volge v svyazi s realizaciej gosudarstvennoj programmy «Ozdorovlenie Volgi»* [long-term dynamics and forecast runoff of heavy metals in the Lower Volga in connection with the implementation of the state program "Improvement of the Volga"]. *Vestnik VGU* [Bulletin of the VSU]. 2019, no .1, pp. 85–91.

15. Tatarnikov, V. O. Dairova, D. S., Ocheretny, M. A. *Assimilyacionnaya emkost' marginal'nogo fil'tra r. Volgi v otno-shenii hlororganicheskih pesticidov* [Assimilation capacity of the marginal filter of the Volga River in relation to organochlorine pesticides]. *Astraxanskij vestnik e`kologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin of Ecological Education]. 2020, no. 6 (60), pp. 43–51.