

## ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ: ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ

Научная статья

УДК 556.166:543.31(282.257.5)

### ВЛИЯНИЕ ПАВОДКОВ НА ПРОЦЕССЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И МИГРАЦИЮ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В РЕКЕ АМУР

А.Н. Махинов, А.Ф. Махинова

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,  
ул. Дикопольцева 56, г. Хабаровск, 680000,  
e-mail: amakhinov@mail.ru, mahinova@iver.as.khb.ru

*Концентрация химических элементов в русле реки Амур рассматривается как функция состояния их растворимых и взвешенных форм. Выявлено, что малоподвижные химические элементы (Fe, Al, Cd, Zn, Cu, Pb) мигрируют в составе как крупных органических коллоидов (0,45–1,0 мкм), так и растворимых комплексных солей. Исследована роль органического вещества в перераспределении элементов между их взвешенными и растворимыми формами. Описаны механизмы миграции химических соединений.*

**Ключевые слова:** река Амур, тяжелые металлы, органическое вещество.

**Образец цитирования:** Махинов А.Н., Махинова А.Ф. Влияние паводков на процессы концентрирования и миграцию химических соединений в реке Амур // Региональные проблемы. 2022. Т. 25, № 3. С. 37–41. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-37-41

#### Введение

На водотоках с неустойчивым водным режимом, к которым относится река Амур, частые наводнения играют особенно важную роль в переносе терригенного материала и химических загрязнений. Неравномерность поступления различных веществ в реки обуславливается муссонностью климата в восточной части амурского бассейна. В этих природных условиях наводнения формируются в относительно короткое время вследствие выпадения большого количества атмосферных осадков. В результате происходит интенсивный смыв в реки накопившихся за длительное время загрязняющих веществ.

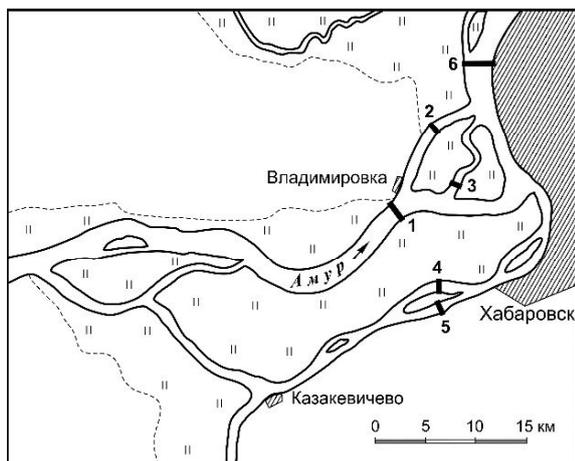
В последнее десятилетие р. Амур вступила в режим высокой водности, для которого характерно формирование крупных наводнений, что при антропогенном воздействии существенно повышает риски потенциальных экологических угроз. К основным антропогенным факторам относится деятельность производств химической промышленности, предприятий машиностроения

и сельского хозяйства [1]. Сброс городских и производственных сточных вод способствует поступлению в реки широкого спектра загрязнений, среди которых особого внимания требуют тяжелые металлы [2].

Цель работы заключалась в оценке условий массопереноса загрязняющих веществ с урбанизированных территорий под действием антропогенных и природных факторов и роли органических веществ в процессах концентрирования и перераспределении загрязняющих веществ в русле р. Амур во время наводнений.

#### Объект и методы

Исследования проводились в нижнем течении Амура на участках однорукавного русла (рис. 1). Отбор проб воды производился во время высоких паводков 2019–2021 гг. в нескольких створах реки – в 10 км выше г. Хабаровска при ширине русла 2425 м и в 7 км ниже г. Хабаровска – при ширине русла 1920 м. В поперечном сечении реки отбиралось 5–9 проб из приповерхностного слоя (рис. 2).



**Рис. 1. Участки отбора проб воды в русле р. Амур в районе Хабаровска**

**Fig. 1. Water sampling sites in the Amur riverbed near Khabarovsk**



**Рис. 2. Точки отбора проб в поперечном сечении русла ниже Хабаровска**

**Fig. 2. Sampling points in the cross section of the riverbed below Khabarovsk**

Пробы воды были проанализированы в аккредитованном аналитическом центре коллективного пользования ТИГ ДВО РАН. Для отделения взвешенной фазы пробы воды фильтровали (под вакуумом) с использованием ядерных фильтров с размером пор 0,45 мкм. Фильтраты переливали в контейнеры объемом 50 мл и подкисляли  $\text{HNO}_3$  до pH 2. В фильтраатах определяли растворенные формы металлов. Метод анализа включал в себя масс-спектрофотометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) (прибор Elan DRC II PerkinElmer, США) по ПНД Ф 14.1.2:4.143-98 (изд. 2019). Пробоподготовку выполняла С.И. Левшина (ИВЭП ДВО РАН).

#### **Результаты и обсуждение**

Река Амур ежегодно выносит в море около 370 км<sup>3</sup> воды, 24 млн т взвешенных наносов, 20,2 млн т растворенных веществ и 5,3 млн т органических веществ. Неравномерность стока в многолетнем плане и по сезонам года оказывает большое влияние на динамичность многих показателей качества воды.

Быстрый подъем воды в Амуре при высоких паводках сопровождается деформацией русла, подтоплением городских и промышленных территорий, сельскохозяйственных земель, что является причиной загрязнения воды, донных отложений и пойменных почв р. Амур тяжелыми металлами [3]. В период паводков существенно активизируются русловые процессы, что способствует поступлению терригенного материала в реку за счет

размыва отложений поймы. Высокий подъем воды обуславливает затопление обширной территории, что способствует переносу и аккумуляции тонких фракций в водном потоке Амура. Поверхностный смыв с урбанизированных территорий является одной из важнейших составляющих промышленного загрязнения воды в р. Амур и его наиболее крупных притоках.

Масса взвешенного вещества, поступающего в русло реки, определяется интенсивностью размыва берегов. Перенос массы твердого вещества  $G$  (т) через поперечное сечение потока рассчитывался с использованием уравнения:

$$G = kQV_1L[C/hg - 10^3(1-f)I]/dt,$$

где  $k$  – коэффициент пересчета массы твердого вещества в пробе воды к его истинной массе;  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $V_1$  – средняя скорость потока в поверхностном слое, м/с;  $L$  – расстояние между расчетными створами, м;  $C$  – интенсивность седиментации в водном потоке, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $h$  – средняя глубина потока, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $f$  – коэффициент трения в придонном слое;  $I$  – уклон дна;  $10^3$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время.

Расчеты проводились при определенных допущениях – при  $f > 1$  (для р. Амур при  $h \geq 8$  м,  $V_1/V_2 \geq 10$ , где  $V_2$  – скорость придонного течения). Установлено, что в составе твердого стока органические и минеральные коллоиды составляют 85–90%. Расчеты показали, что масса терригенного материала (фракции 0,001–0,05 мм) в русле

около г. Хабаровска в паводки увеличивалась в 1,5–1,7 раза относительно средних показателей в летнюю межень, а доля органического материала возрастала в 2,0–4,4 раза.

Главной особенностью изменчивости концентраций железа во времени является прямая зависимость его от содержания органических коллоидов в воде. Увеличение содержания органического вещества в паводки приводит к повышению в воде концентраций и многих других малоподвижных элементов (Al, Cd, Zn, Cu, Pb), которые чаще всего входят в состав крупных органических коллоидов (0,45–1,0 мкм), на что указывают и другие авторы [4]. При высокой мутности органические коллоиды способны осаждаться на минеральных частицах взвеси, образуя органоминеральные комплексы. Исключением могут быть фульвокислоты, способные к химическому взаимодействию с металлами и их соединениями.

На участках основного русла и наиболее крупных второстепенных рукавов отмечается значительная неравномерность концентраций органической и минеральной взвесей в поперечном сечении потока. Обнаружено, что в составе крупных органических и минеральных коллоидов (0,45–1,0 мкм) мигрирует большая часть умеренно- и малоподвижных элементов (Fe, Mn, Al, Cu, Zn и Ni) [5]. Установлено, что высокие концентрации тяжелых металлов в районе Хабаровска наблюдаются вдоль левобережья в связи с влиянием стока с заболоченных территорий и вдоль правобережья в результате трансграничного поступления из бассейна р. Сунгари при минимальных значениях в средней части русла (табл.). Слабое перемешива-

ние химических компонентов в поперечном сечении русла реки обусловлено особенностями его строения – значительной шириной водного потока при небольших глубинах, а также многорукавностью русла.

Концентрирование химических элементов, связанное с сорбционной активностью аллохтонных коллоидов, их миграция и изменчивость во времени имеют прямую зависимость также от интенсивности размыва берегов и степени турбулентности потока.

Доля умеренно- и малоподвижных элементов (Fe, Mn, Al, Cu, Zn и Ni) достигает 85% от общего химического стока. Растворимые формы их соединений составляют 10–15%. Эти металлы мигрируют в основном в составе комплексных солей, образующихся путем химического взаимодействия ионов металлов Fe<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> с растворимыми фракциями агрессивных фульвокислот [6]. Процессы химического перераспределения элементов между их коллоидными и растворимыми формами в воде определяются содержанием органического вещества. Максимальные концентрации органических веществ (коллоидных и истинно-растворенных форм составляют 4,7 и 12,1 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) наблюдаются вдоль берега с широким распространением болотных ландшафтов. Причиной этому является присутствие в воде больших концентраций слабо-растворимых железисто-органоминеральных коллоидов [7].

Полученные результаты исследований дают представление о механизмах концентрирования, динамике поведения и закономерностях миграции

Таблица

Концентрация тяжелых металлов в воде Амура ниже Хабаровска в паводок 2021 г.

Table

Heavy metals concentration in the Amur water, below Khabarovsk, in the flood of 2021

Расстояние от левого берега, м	pH	Сорг.	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
			Растворенная форма, мкг/дм <sup>3</sup>						
75	7,04	12,6	375,08	49,10	10,6	9,89	20,98	0,04	1,45
220	7,02	12,3	305,03	15,15	4,53	4,67	12,48	0,02	0,25
480	7,00	12,2	313,89	8,62	3,38	3,96	6,96	0,01	0,39
830	7,01	12,3	205,42	4,49	2,68	5,99	13,55	0,02	0,29
1230	7,00	12,8	203,08	2,75	2,37	3,50	3,32	0,01	0,71
1500	7,01	11,5	193,36	7,33	1,97	3,29	18,48	0,02	0,24
1800	6,99	11,4	181,11	3,99	4,44	6,26	19,26	0,02	0,20

химических соединений в русле р. Амур во время паводков. Выявлено, что:

1. Миграционная активность химических соединений в русле Амура обусловлена содержанием органических и минеральных коллоидов (70–100 нм). В паводки их содержание во взвеси может составлять до 85%.

2. Концентрирование электрически нейтральных атомов и их соединений происходит в результате сорбции (как электростатическое притяжение) на поверхности минеральных частиц с большой удельной поверхностью и высоким отрицательным зарядом.

3. Большое значение в химическом стоке тяжелых металлов имеет органическое вещество. Органические коллоиды с молекулярной массой  $>5,0$  кДа обладают большой сорбирующей способностью по отношению к ионам металлов. В составе органоминеральных соединений комплексообразующие ионы ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ) прочно удерживают внешнюю сферу за счёт неподеленных электронных пар лигандов. Степень устойчивости этих соединений определяет состав комплексообразующих ионов.

4. Растворимые фульвокислоты (с молекулярной массой  $<2,0$  кДа) связывают соединения металлов путем химического взаимодействия в органоминеральные комплексы и/или гетерополярные соли. В совокупности степень связывания ионов металлов составляет 65–100% от содержания их растворенных форм.

#### **Выводы**

Анализ распределения содержаний тяжелых металлов по ширине русла свидетельствует, что соотношение между максимальными и минимальными значениями изменяются в пределах 1,3–3,0. Неоднородность их в русловом потоке обусловлена неодинаковой заболоченностью прибрежных

территорий в долине реки и большой активностью русловых процессов во время наводнений. Наводнения способствуют также растворению загрязняющих веществ и частичному выравниванию их концентраций по ширине водного потока и сорбции тяжелых металлов на привнесенное органическое вещество.

В результате работ было установлено, что повышенное содержание тяжелых металлов в поперечном створе р. Амур ниже Хабаровска тяготеет к правому берегу, что может быть связано с поступлением городских и промышленных стоков с урбанизированной территории.

Несмотря на то, что наводнения негативно влияют на качество воды в р. Амур, проведенные исследования показали, что при отсутствии экологических катастроф, таких как аварии на химических предприятиях или масштабные пожары, высокие паводки способствуют выносу значительного количества загрязняющих веществ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-55 80022/20.*

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Makhinov A.N. Amur terrigenous and chemical discharge formation // Report on Amur-Okhotsk project. Kioto: Research Institute for Humanity and Nature, 2005. P. 61–65.
2. Tipping E. Cation binding by humic substances. Cambridge: Cambridge Univer. Dress.б, 2004. 434 p.

#### **REFERENCES:**

1. Makhinov A.N. Amur terrigenous and chemical discharge formation, in *Report on Amur-Okhotsk project*. Kioto: Research Institute for Humanity and Nature, 2005, pp. 61–65.
2. Tipping E. *Cation binding by humic substances*. Cambridge: Cambridge Univer. Dress., 2004. 434 p.

# INFLUENCE OF FLOODS ON THE PROCESSES OF CONCENTRATION AND MIGRATION OF CHEMICAL COMPOUNDS IN THE AMUR RIVER

A.N. Makhinov, A.F. Makhinova

*The concentration of chemical elements in the Amur riverbed is considered as a function of the state of their soluble and suspended forms. It was revealed that slow-moving chemical elements (Fe, Al, Cd, Zn, Cu, Pb) migrate both in large organic colloids (0.45–1.0  $\mu\text{m}$ ) and in soluble complex salts. The role of organic matter in the redistribution of elements between their suspended and soluble forms has been studied. The authors describe the mechanisms of migration of chemical compounds.*

**Keywords:** Amur River, heavy metals, organic matter.

**Reference:** Makhinov A.N., Makhinova A.F. Influence of floods on the processes of concentration and migration of chemical compounds in the Amur River. *Regional'nye problemy*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-37-41

*Поступила в редакцию 16.05.2022*

*Принята к публикации 15.09.2022*