

УДК: 549.28:551.326.83 (282.257.5)

МЕХАНИЗМЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ И УСЛОВИЯ МИГРАЦИИ ЗАГРЯНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РЕКЕ АМУР

А. Ф. Махинова, А. Н. Махинов

*Институт водных и экологических проблем ХФИЦ ДВО РАН,
Хабаровск, Россия, amakhinov@mail.ru; mahinova@ivep.as.khb.ru*

Концентрирование загрязняющих веществ рассматривается как функция содержания растворимых и взвешенных форм химических соединений в Амуре. Миграция Fe, Mn, Zn, Cu, Pb происходит в составе органических коллоидов и растворимых комплексных солей. Их концентрации в русле обусловлены активностью русловых процессов, составом болотных вод и промышленных стоков. Вынос загрязняющих веществ весной в составе льда способствует стабилизации качества воды в Амуре.

Ключевые слова: река Амур; наводнения; русловые процессы, тяжелые металлы; миграция элементов; химическое загрязнение

MECHANISMS OF CONCENTRATION AND CONDITIONS OF MIGRATION OF POLLUTANTS IN THE AMUR RIVER

Aleksandra F. Makhinova, Aleksei N. Makhinov

*Institute of Water and Ecology Problems KHFC FEB RAS, 680000
Khabarovsk, Russia, amakhinov@mail.ru; mahinova@ivep.as.khb.ru*

The concentration of pollutants is considered as a function of the content of soluble and suspended forms of chemical compounds in the Amur. Migration of Fe, Mn, Zn, Cu, Pb occurs in the composition of organic colloids and soluble complex salts. Their concentrations in the riverbed are determined by the activity of riverbed processes, the composition of swamp waters and industrial wastewater. The removal of pollutants in the spring as part of the ice helps stabilize the water quality in the Amur.

Keywords: Amur river; floods; channel processes, heavy metals; migration of elements; chemical pollution.

Река Амур подвержена рискам экологических угроз, которые обусловлены природно-техногенными процессами и ее трансграничным положением. В последнее десятилетие Амур вступил в период высокой водности и испытывает сильное антропогенное давление [1]. Угрозой загрязнению реки являются расположенная в ее бассейне развитая химическая промышленность, сельское хозяйство, машиностроение. Сброс в русло производственных сточных вод приводит к поступлению широкого спек-

тра техногенных поллютантов, среди которых ключевую роль играют тяжелые металлы. Наводнения усугубляют процессы загрязнения реки. Негативные последствия наводнений обусловлены интенсификацией русловых процессов, переносом терригенного материала и химических соединений. Риски загрязнения воды, как питьевого ресурса, опасны для населения трансграничных стран. Исследование изменений природной среды в направлении долгосрочных прогнозов будут способствовать разработке мер по обеспечению качества воды.

Цель работы — анализ пространственных вариаций гидрохимических показателей качества воды в реке Амур в период паводков и выявление механизмов концентрирования и миграции химических элементов в русловом потоке и ледовом покрове.

Исследования проводились во время высоких летне-осенних паводков на реке Амур в 2019-2021 гг. в двух створах — в 10 км и в 7 км ниже г. Хабаровска.

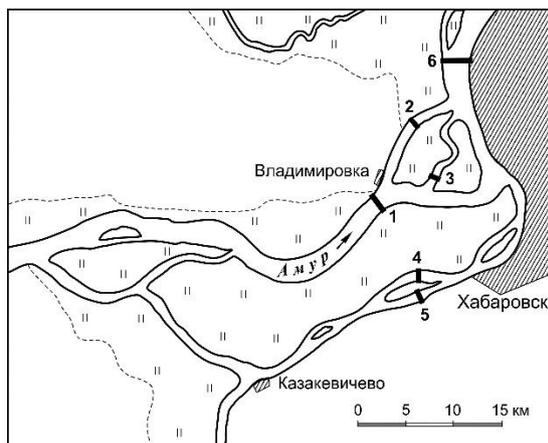


Рис. 1. Река Амур около г. Хабаровска (1-6) – створы наблюдений



Рис. 2. Точки отбора проб ниже г. Хабаровска

Ежегодно Амур выносит в море более 1 млрд. м³ промышленных и коммунальных сточных вод, где более 400 млн. м³ загрязненных и около 15 % — неочищенных [2]. Разнообразные природные условия и изменчивость стока воды определяют ее геохимический фон. В период наводнений активизация русловых процессов увеличивает размыв берегов и сток веществ во взвешенном состоянии. Органические и минеральные коллоиды в составе твердого стока составляют 85-90 %. Распределение высоких концентраций терригенного материала и содержание крупных коллоидов (0,45-1 мкм) органического вещества в составе взвеси при высоких паводках чаще всего сохраняются до начала ледостава [3].

Для определения переноса массы твердого вещества (G) через поперечное сечение турбулентного потока использовали формулу [3]:

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

где k – коэффициент пересчета массы твердого вещества в пробе воды к его истинной массе; Q – расход воды, м³/с; V_1 – скорость потока в поверхностном слое, м/с; L – расстояние между створами, м; C – скорость седиментации в потоке, кг/(м·с²); h – глубина потока, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; f – коэффициент трения в придонном слое; I – уклон дна; 10^3 – плотность воды, кг/м³; t – время, сек.

Расчеты средней массы взвешенных наносов (ВВ, мг/дм³) в потоке при прохождении паводка 2021 г. на реке Амур приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика стока реки Амур в поперечном сечении русла ниже г. Хабаровска (ширина русла 1920 м), наводнение 2021 гг.

№ р р	Поток в русле		Сток в поперечном русле, мг/дм ³			G _{ср} (G _f +G _{fp}) мг/дм ³	G _m / G _{ср}	УЭП, μs/cm
	V(м/с) max/min	L, м	G _m ВВ>1 мкм	G _f (max/min 0,45-1 мкм	G _{fp} <0,45мкм			
1	2,6/2,5	135	166,3	4,7/0,9	12,1	16,8	9,72	78,3
2	3,4/3,0	445	176,2	3,8/0,4	12,0	15,8	11,2	101,2
3	3,6/3,1	880	185,1	2,9/0,5	11,8	14,7	12,6	112,1
4	3,7/3,1	1190	70,2	1,8/0,4	9,8	11,6	6,05	103,9
5	3,9/3,1	1500	159,1	1,9/0,8	7,0	8,9	17,9	103,8

Примечание. G_m – терригенный сток; G_f – сток растворенных коллоидных форм ОБ; G_{fp} – сток растворенного ОБ; G_{ср} – истинно растворенное ОБ; L - расстояние от уреза левого берега, м. Определение ОБ выполнила Левшина С. И. (ИВЭП ДВО РАН)

Главной особенностью изменчивости концентраций железа во времени, является прямая зависимость от содержания органических коллоидов в воде [4]. Показатели концентраций химических элементов в поперечном сечении русла Амура находятся в соотношении Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Cr > Pb. Высокая мутность в паводки контролирует это соотношение. Природные воды бассейна Амура железистые, фоновое содержание растворимых форм Fe в реке более 100 мкг/дм³ [3]. Высокие концентрации соединений железа поддерживают буферность раствора, повышая интенсификацию растворения соединений меди, цинка, свинца с образованием катионов Cu⁺², Zn⁺², Pb⁺². Поэтому в процессах миграции многих химических элементов важную роль играет их сродство к Fe. Увеличение содержания органических веществ (ОБ) в паводки приводит к концентрированию мало подвижных элементов (Al, Cd, Zn, Cu, Pb) в составе органических коллоидов (0,45-1,0 мкм) и загрязнению Амура [5]. При высокой мутности органические коллоиды осаждаются на минеральной взвеси с образованием

органоминеральных комплексов, повышая загрязненность реки [7]. Фульвокислоты способны к химическому взаимодействию с металлами, образуя растворимые органоминеральные соединения [4, 7].

Река Амур с середины ноября до конца апреля покрыта льдом. Концентрирование тяжелых металлов в ледовом покрове связано с содержанием их в подледной воде. Однако в зоне техногенного влияния концентрации химических соединений в ледовой толще слабо согласуются с их содержанием в подледной воде (табл. 2). Послойное исследование кернов льда позволило проанализировать динамику качества воды в период ледостава и степень загрязненности ледового покрова токсичными веществами.

В ледовом покрове выявлены высокие показатели содержания тяжелых металлов [8]. Концентрации Ni, Cu, Zn и Pb во льдах на порядок выше их показателей в подледной воде. Загрязняющие вещества влияют на цветовую гамму керна, которая отражает разновременную избирательность кристаллизации химических соединений [9] (рис. 3; табл. 2).

Таблица 2

Содержание металлов в слоях льда и подледной воде

Слой льда, см	Среднее содержание элементов, мкг/дм ³					
	Ni	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn
0-20	2,52	22,50	27,66	5,49	47,62	18,6
20-40	2,29	21,02	35,60	2,77	102,77	4,15
40-60	7,02	22,74	80,15	7,91	156,81	2,58
60-80	0,79	20,56	23,59	1,45	24,50	1,17
80-100	5,45	35,98	31,85	3,68	12,59	1,57
Вода	1,34	6,22	18,52	0,22	580,14	43,4



Рис.3. Слоистый керн льда

В слое 0-28 см лед с поверхности имеет зеленовато-синий оттенок, что обусловлено повышенным содержанием цинка и меди. В темном слое буровато-грязно-серого цвета выявлены высокие концентрации Fe, Pb, а также терригенные включения с повышенным содержанием Ni [10, 11]. Концентрирование тяжелых металлов (Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb) в нижних слоях льда (80-100 см) резко снижаются.

Ледовая толща реки Амур, мощностью более 80 см, является критической, при которой на границе раздела фаз выравнивание температуры кристаллизации химических соединений с точкой их температурной эвтектики приводит к равновесию концентраций в твердой и жидкой фазах [12]. Скорость намерзания льда снижается почти в 2 раза, а образование криогидратной смеси и ее содержание во льдах зависит только от концентраций в подледной воде. Таким образом, в ледяном покрове реки концентрируется

большая масса загрязняющих веществ, которые во время весеннего ледохода мигрируют в море.

Мониторинг гидрохимических показателей Амура свидетельствует о наименьшей его загрязненности в период после весеннего ледохода. Особенно ярко это проявилось в 2022 г., когда высокие паводки 2019-2021 гг. поддерживали высокие концентрации загрязняющих веществ в реке, а миграция их в составе льда способствовала ее очищению.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-80020/2022.

Библиографические ссылки

1. Махинов А. Н., Махинова А. Ф., Ким В. И. Динамика русловых процессов реки Амур и миграция тяжелых металлов в период наводнений // Экология и промышленность России, 2022. Т. 26, № 2. С. 58-63.

2. Чудаева В. А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука. 2002. 392 с.

3. 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.

4. Linnik P. N., Zhezherya V. A., Linnik R. P., Ivanechko Ya.S. Influence of the component composition of organic substances on the ratio of dissolved forms of metals in surface waters // J. Hydrobiological journal, 2012. V. 48, № 5. P. 97-114.

5. Шулькин В. М. Роль крупных коллоидов в химическом составе речных вод (на примере рек юга Дальнего Востока РФ) // Материалы XII Совещания географов Сибири и Дальнего Востока, 28 сентября - 1 октября 2021. С. 105-108.

6. Tipping E. Cation binding by humic substances. Cambridge Univer, 2004. 434 p.

7. Голдовская Л. Ф. Химия окружающей среды. М.: Мир, 2005. 296 с.

8. Махинов А. Н., Ким В. И., Махинова А. Ф., Матвеев Д. В. Содержание тяжелых металлов во льду нижнего течения реки Амур // Лед и снег, 2022, 62(2). С. 251-260.

9. Fukuta N. A study of the mechanism of contact ice nucleation. J. Atmos. Sci. 32(8), 1975. P. 1597-1603.

10. Махинова А. Ф., Махинов А. Н., Лю Шугуан. Механизмы кристаллизации химических соединений во льдах р. Амур и роль тяжелых металлов в ее загрязнении // Экология и промышленность России, 2023. Т. 27, № 3. С. 54-59.

11. Matoba S., Sasaki H., Shiraiwa T. Iron flux over the subarctic pacific estimated by an ice-core record from Mount Wrangell, Alaska. In Editor T. Shiraiwa. Repot of Amur-Okhotsk Projekt. Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, 2008, (5). P. 189-198.

12. Makhinova A.F., Makhinov A.N. Heavy Metals Concentration Mechanisms in the Ice of Amur River // Springer proceedings in Earth and Environmental Sciences. Book Chapter. 2023. P. 124-132.