

УДК 543.316:546.3:556.55

П. Н. Линник, В. А. Жежеря, И. И. Игнатенко

**РОЛЬ ФРАКЦИЙ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С  
РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ ЧАСТИЦ В НАКОПЛЕНИИ  
И МИГРАЦИИ МЕТАЛЛОВ В ОЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ<sup>1</sup>**

В статье рассмотрены результаты исследований роли взвешенных веществ и их отдельных фракций с различным размером частиц в накоплении и миграции металлов (Al, Fe, Mn, Cr, Cu и Mo) в озерных экосистемах (на примере озер Нижний Тельбин и Вербное, г. Киев). Показано, что в обоих озерах Al, Fe, Mn и Cr мигрируют преимущественно во взвешенном состоянии. Массовая доля взвешенной формы каждого из перечисленных выше металлов находилась в пределах: в воде оз. Нижний Тельбин — 77,7—86,6, 82,4—96,6, 45,6—56,9, 29,9—74,0%, в воде оз. Вербного — 43,8—68,4, 46,4—92,2, 30,5—70,4 и 0,7—93,4% общего их содержания в воде. В то же время Cu и Mo были обнаружены преимущественно в растворенном состоянии: 66,6—74,9% Cu<sub>общ</sub> и 63,9—77,8% Mo<sub>общ</sub> в воде оз. Нижний Тельбин и 81,9—84,4% Cu<sub>общ</sub> и 56,6—66,7% Mo<sub>общ</sub> в воде оз. Вербного. Представлены данные о содержании исследованных металлов в составе фракций взвешенных веществ с различным размером частиц (>0,85 мкм, >0,40—0,85 мкм и >0,23—0,40 мкм). С уменьшением размера частиц концентрация металлов в них из расчета мг/г сухой массы взвеси существенно увеличивается. При снижении pH воды до 4,0 доля десорбированной формы металлов уменьшалась в ряду Cr > Mn > Al > Fe, Cu независимо от природы взвешенных веществ.

*Ключевые слова:* взвешенные вещества, мембранная фильтрация, размер частиц, металлы, десорбция, озера.

В природных водных экосистемах металлы находятся и мигрируют в растворенном состоянии, а также в составе коллоидно-дисперсных частиц размером от 1 нм до 1 мкм и взвешенных веществ, размер которых > 1 мкм [6, 32].

В настоящее время общеизвестно, что от форм нахождения металла в природной водной среде зависит его биодоступность и токсичность для гидробионтов [6, 12, 13, 28, 34, 36]. Считается, что в растворенном состоянии миграционная способность металлов и их биодоступность увеличиваются. В то же время трансформация растворенной формы во взвешенную приводит к тому, что металл становится недоступным или малодоступным для водных организмов. При этом снижается концентрация его свободных (гидратированных) ионов как наиболее токсичной формы. Седиментация взвешенных веществ в условиях замедления течения приводит к захоронению металлов

© П. Н. Линник, В. А. Жежеря, И. И. Игнатенко, 2019

в составе донных отложений и выведению их из круговорота на определенный период времени. В то же время нарушение установившегося равновесного состояния в системе «вода — взвешенные вещества — донные отложения» приводит к тому, что взвешенные вещества и донные отложения становятся источником вторичного загрязнения водной среды соединениями металлов [20, 21, 29]. Такое нарушение может быть обусловлено снижением рН воды, формированием анаэробных условий, повышением минерализации воды и содержания в ней органических веществ или воздействием других факторов. В этих условиях возможен переход металлов в растворенное состояние.

К основным источникам поступления взвешенных веществ в поверхностные воды относятся, прежде всего, ветровое перемешивание и взмучивание донных отложений водоемов, эрозия берегов и прилегающих почв, эоловый перенос, отмирание фито- и зоопланктона, разложение органических веществ, а также продукты жизнедеятельности организмов [25, 11, 18, 35]. Соответственно, компонентный состав взвешенных веществ в поверхностных водах весьма разнообразен — это частицы неорганического и органического детрита, оксиды и гидроксиды железа, марганца и алюминия, глинистые минералы, карбонаты, фитопланктон, зоопланктон и другие частицы, которые остаются на мембранном фильтре с диаметром пор 0,45 мкм при пропускании через него пробы природной воды. Сюда же входят металлы, различные органические соединения как природного, так и антропогенного происхождения, включая гуминовые и фульвокислоты, а также загрязняющие органические вещества [15, 37]. Они ассоциируются со взвешенными частицами за счет физико-химической адсорбции или биологической ассимиляции водорослями и бактериями [17, 25].

Содержание металлов в составе взвешенных веществ зависит не только от их компонентного состава, но и от размера частиц. Наибольшей адсорбционной способностью обладает тонкодисперсная фракция взвесей, которая часто представлена оксидами и гидроксидами железа и марганца. Последние, в свою очередь, содержат на поверхности природные органические соединения, например гумусовые вещества, что существенно повышает их адсорбционную способность к ионам металлов. В этом случае прочность связывания последних возрастает. Некоторая часть металлов может находиться в составе органической взвеси, представленной водорослями и бактериями, отмирание и деструкция которых способствует переходу металлов в раствор. Исходя из этого, задача исследования не только растворенных, но и взвешенных форм металлов в реках и водоемах продолжает оставаться актуальной, особенно при воздействии на них разнообразных факторов окружающей среды, способствующих взаимопревращению этих форм.

Целью настоящей работы было установить роль различных по размеру фракций взвешенных веществ в накоплении и миграции металлов в озерных системах, испытывающих антропогенное воздействие.

**Материал и методика исследований.** Пробы воды отбирали с помощью модифицированного батометра-склянки [9]. Для выделения взвешенных ча-

стиц, отличающихся по размеру, использовали нитроцеллюлозные мембранные фильтры Suprog с диаметром пор 0,85 мкм, 0,40 и 0,23 мкм. С этой целью пробу воды в максимально короткий промежуток времени последовательно пропускали через мембранные фильтры, начиная от большего к меньшему диаметру пор. В результате получали три фракции взвешенных частиц: > 0,85 мкм, > 0,40—0,85 и > 0,23—0,40 мкм. Массу взвешенных частиц определенного размера устанавливали путем разности между массой фильтра до и после фильтрации, высушенного при 105°C, с учетом объема профильтрованной пробы. Для определения массы фильтра использовали аналитические весы AXIS ANG 200 С (Польша).

Концентрацию растворенной формы каждого из исследованных металлов определяли после фотохимической деструкции растворенных органических веществ (POB) в фильтрате воды, полученном при пропускании через мембранный фильтр с диаметром пор 0,40 мкм. Фотохимическая деструкция POB предусматривает добавление к 50 мл фильтрата воды концентрированной серной кислоты  $H_2SO_4$  градации «х. ч.» до значений pH 1,0—1,5, а также 5—7 капель 35%-ного раствора  $H_2O_2$ . Облучение проводили в кварцевых стаканах с помощью ртутно-кварцевой лампы ДРТ-1000 в течение 2,0—2,5 ч.

Содержание металлов в составе взвешенных веществ определяли после «мокрого» сжигания мембранного фильтра со взвесью в смеси концентрированных азотной ( $HNO_3$ ) и серной ( $H_2SO_4$ ) кислот [3]. В таких условиях в раствор поступает та часть металлов, которая адсорбирована на поверхности взвешенных веществ или входит в состав их органической составляющей [38]. Практически полное высвобождение металлов из состава взвешенных веществ может быть достигнуто лишь в условиях более жесткой их обработки, о чем отмечалось нами ранее [38]. Однако для оценки роли фракций взвешенных веществ с различным размером частиц в накоплении и миграции металлов вполне достаточно стадии «мокрого» сжигания взвесей, которая использована в наших исследованиях.

Для изучения десорбции металлов с поверхности взвешенных веществ при изменении pH нефильтрованной пробы воды ее подкисляли до pH~4,0 раствором азотной кислоты  $HNO_3$  (1:2) и измеряли концентрацию исследуемых металлов через определенные промежутки времени до достижения равновесия.

Концентрацию алюминия и железа определяли фотометрическим методом с использованием соответственно реагентов хромазуrolа S и *o*-фенантролина [2, 10]. Содержание меди, марганца и хрома измеряли хемилюминесцентным методом с использованием люминола [5, 7, 22]. Концентрацию молибдена определяли каталитическим фотометрическим методом [8].

### *Результаты исследований и их обсуждение*

Исследования, касающиеся роли взвешенных веществ в миграции металлов, были проведены на примере озер Нижний Тельбин и Вербное

(г. Киев). Первое из них подвергается значительному антропогенному воздействию, второе — в меньшей степени, хотя и относится к эвтрофным водоемам. В оз. Нижний Тельбин впадает р. Дарница, в которую поступают сливные воды прилегающей промышленной зоны левого берега города, а также периодически — воды из золоотвала (оз. Горячка) Дарницкой ТЭЦ, работающей на угле, с высоким содержанием взвешенных веществ. Озеро Вербное, расположенное на правом берегу Днепра в жилом массиве Оболонь, используется преимущественно в рекреационных целях. Кроме этого, в оз. Нижний Тельбин доминирует взвесь минерального происхождения, тогда как в оз. Вербном превалирует взвесь органического происхождения, представленная фитопланктоном и детритом.

*Сезонные особенности распределения металлов между взвешенной и растворенной формами в озерных системах.* Водоемы с замедленным водообменом, к которым относятся водохранилища, озера и пруды, характеризуются определенными сезонными изменениями содержания взвешенных веществ. Как правило, максимальные значения этого показателя наблюдаются весной и летом, когда происходит интенсивное развитие фитопланктона. Поэтому взвешенные вещества в этих водных объектах представлены главным образом частицами органического происхождения (фитопланктон, детрит и т. д.), тогда как в реках они, наоборот, минерального происхождения. Известно, что от природы взвешенных веществ зависит содержание металлов во взвешенном состоянии. Если металл относится к эссенциальным химическим элементам, то, вполне естественно, он накапливается во взвеси органического происхождения. Это происходит за счет его ассимиляции планктонными живыми организмами для их нормального функционирования. Среди исследуемых нами металлов к биологически необходимым относятся железо, марганец, молибден, медь и хром. В то время как алюминий, занимающий третье место по распространению в земной коре, не относится к эссенциальным элементам и проявляет токсическое действие на гидробионтов. Перечисленные выше металлы также могут проявлять токсическое действие в зависимости от их концентрации в водной среде и степени окисления. Предельно допустимая концентрация для Fe (II), Mn (II), Cr (VI) и Cu(II) в водоемах рыбохозяйственного назначения составляет соответственно 5, 10, 1 и 1 мкг/дм<sup>3</sup> [2]. Если взвешенные вещества минеральной природы превалируют, то металлы способны накапливаться в их составе за счет адсорбции на их поверхности. При уменьшении размера минеральных частиц взвешенных веществ их адсорбционная способность возрастает вследствие увеличения площади поверхности [19, 26, 30, 33].

Поскольку природа взвешенных веществ в исследованных нами озерах существенно отличается, интересно было сравнить их роль в миграции металлов. По результатам натурных исследований было установлено, что общая концентрация Al, Fe, Mn, Cr, Cu и Mo в оз. Нижний Тельбин в течение исследуемого периода находилась в пределах соответственно 490—2104, 650—5851, 36,1—117,5, 14,3—58,2, 24,9—72,6 и 8,9—66,8 мкг/дм<sup>3</sup> и наблюдалась тенденция к снижению их содержания от верхнего к нижнему участку озера (табл. 1). Это связано с уменьшением концентрации металлов во взвешенном состоянии вследствие осаждения взвешенных веществ, поступающих с водными массами р. Дарницы. Например, в апреле 2018 г. содержание

взвешенных веществ в верхней и нижней частях озера составляло соответственно 73,0 и 23,5 мг/дм<sup>3</sup>, в июне — 29,4 и 14,6, а в июле — 358 и 35 мг/дм<sup>3</sup>. В средней части озера содержание взвешенных веществ характеризовалось промежуточными значениями. Из приведенных данных следует, что оз. Нижний Тельбин испытывает существенное антропогенное влияние и в то же время является отстойником взвешенных веществ р. Дарницы перед тем, как вода этой реки попадет в Каневское водохранилище. Высокие концентрации молибдена обусловлены его поступлением с золоотвала Дарницкой ТЭЦ. Аналогично высокое содержание этого металла обнаружено также в поверхностных водах вблизи Трипольской ТЭЦ, что говорит об одном и том же источнике его поступления [4]. Содержание взвешенных веществ в оз. Нижний Тельбин зависит в основном от их поступления из оз. Горячка, которое выполняет роль золоотвала Дарницкой ТЭЦ, то есть зависит от режима работы этой электростанции.

В оз. Нижний Тельбин Al, Fe, Mn и Cr мигрируют преимущественно во взвешенном состоянии. Массовая доля этой формы металлов снижается от верхнего к нижнему участку озера, что связано, как уже отмечалось, с седиментацией взвешенных веществ. Приведенные концентрации металлов в составе взвешенных веществ относятся только к адсорбированной форме, поскольку для разрушения взвешенных веществ использовали метод «мокрого» сжигания, который не позволяет разрушить их полностью. Массовая доля Al, Fe, Mn, Cr, Cu и Mo во взвешенном состоянии колебалась в пределах соответственно 77,7—86,6, 82,4—96,6, 45,6—56,9, 29,9—74,0, 25,1—33,4 и 22,2—36,1%. В р. Дарнице относительное содержание взвешенной формы Al, Fe и Mn было еще выше (см. табл. 1, рис. 1). Существенное повышение содержания взвешенной формы в воде этой реки отмечено также для Cu (51,0% Cu<sub>общ</sub>). Исследования р. Дарницы проводились в июле, когда содержание взвешенных веществ было максимальным.

Сезонных изменений содержания взвешенной формы исследуемых металлов не было установлено, поскольку они были связаны, прежде всего, с поступлением водных масс с высоким содержанием взвешенных веществ из оз. Горячка (см. рис. 1).

В отличие от алюминия, железа, марганца и хрома, медь и молибден в воде оз. Нижний Тельбин находились большей частью в растворенном виде — соответственно 66,6—74,9% Cu<sub>общ</sub> и 63,9—77,8% Mo<sub>общ</sub>, что является характерной особенностью миграции этих металлов в природных поверхностных водах [23, 24].

В оз. Вербном общая концентрация Al, Fe, Mn, Cr, Cu и Mo была намного ниже, чем в оз. Нижний Тельбин, и составляла соответственно 116,1—142,3, 151,7—221,7, 22,4—85,1, 5,5—20,3, 25,2—33,7 и 4,0—6,5 мкг/дм<sup>3</sup> (табл. 2). При этом доля взвешенной формы Al, Fe, Mn, Cr и Cu также была ниже. Особенно это касается алюминия и железа, содержание которых в составе взвешенных веществ минерального происхождения выше, чем в составе взвешенных веществ органической природы. Массовая доля Al, Fe, Mn и Cr во взвешенном состоянии находилась в пределах соответственно 43,8—68,4, 46,4—92,2, 30,5—70,4 и 0,7—93,4% общего содержания каждого из перечис-

**1. Концентрация растворенной и взвешенной форм исследованных металлов в воде оз. Нижний Тельбин, 2018 г.**

Номера станций отбора проб воды	M <sub>раств</sub>		M <sub>взв</sub>		M <sub>общ</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>
	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	
Алюминий					
1	217	9,4	2094	90,6	2311
2	<u>90,5 – 230</u> 157	13,4	<u>447 – 1873</u> 1012	86,6	<u>537 – 2104</u> 1169
3	<u>103 – 267</u> 177	19,0	<u>400 – 1215</u> 752	81,0	<u>503 – 1484</u> 929
4	<u>107 – 197</u> 150	22,3	<u>383 – 671</u> 523	77,7	<u>490 – 868</u> 673
Железо					
1	110	1,9	5830	98,1	5940
2	<u>51,7 – 129</u> 97	3,4	<u>811,6 – 5741</u> 2763	96,6	<u>940,6 – 5851</u> 2860
3	<u>34,5 – 181</u> 129	10,4	<u>717 – 1689</u> 1115	89,6	<u>898 – 1860</u> 1244
4	<u>69 – 233,5</u> 146	17,6	<u>515 – 791</u> 684	82,4	<u>650 – 1025</u> 830
Марганец					
1	15,4	16,4	78,4	83,6	93,8
2	<u>20,2 – 47,6</u> 30,8	43,1	<u>31 – 47,2</u> 40,7	56,9	<u>55,7 – 91,4</u> 71,5
3	<u>19,6 – 59,0</u> 35,4	51,2	<u>16,5 – 50,5</u> 33,8	48,8	<u>36,1 – 109,5</u> 69,2
4	<u>16,4 – 87,6</u> 46,0	54,4	<u>29,9 – 55,6</u> 38,6	45,6	<u>63,9 – 117,5</u> 84,6
Хром					
1	34,2	39,3	52,8	60,7	87,0
2	<u>2,5 – 27,3</u> 10,9	26,0	<u>17,2 – 55,7</u> 31,1	74,0	<u>20,1 – 58,2</u> 42,0
3	<u>0,3 – 34,8</u> 14,8	58,7	<u>3,3 – 14,3</u> 10,4	41,3	<u>14,3 – 49,0</u> 25,2
4	<u>9,1 – 28,0</u> 15,5	70,1	<u>3,1 – 10,8</u> 6,6	29,9	<u>19,9 – 31,1</u> 22,1
Медь					
1	29,4	49,0	30,6	51,0	60,0

Продолжение табл. 1

Номера станций отбора проб воды	M <sub>раств</sub>		M <sub>взв</sub>		M <sub>общ</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>
	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	
2	21,8 – 33,6	74,9	3,8 – 13,0	25,1	34,8 – 45,1
	29,3		9,8		39,1
3	25,2 – 43,0	70,0	2,2 – 29,6	30,0	27,4 – 72,6
	35,5		15,2		50,7
4	22,6 – 35,6	66,6	1,7 – 25,4	33,4	24,9 – 61,0
	27,1		13,6		40,7
Молибден					
1	71,6	85,3	12,3	14,7	83,9
2	5,7 – 54,5	77,8	2,5 – 15,0	22,2	9,9 – 66,8
	25,2		7,2		32,4
3	5,8 – 44,5	70,1	2,4 – 19,9	29,9	11,4 – 64,4
	21,8		9,3		31,1
4	5,5 – 18,9	63,9	3,4 – 13,8	36,1	8,9 – 26,5
	12,4		7,0		19,4

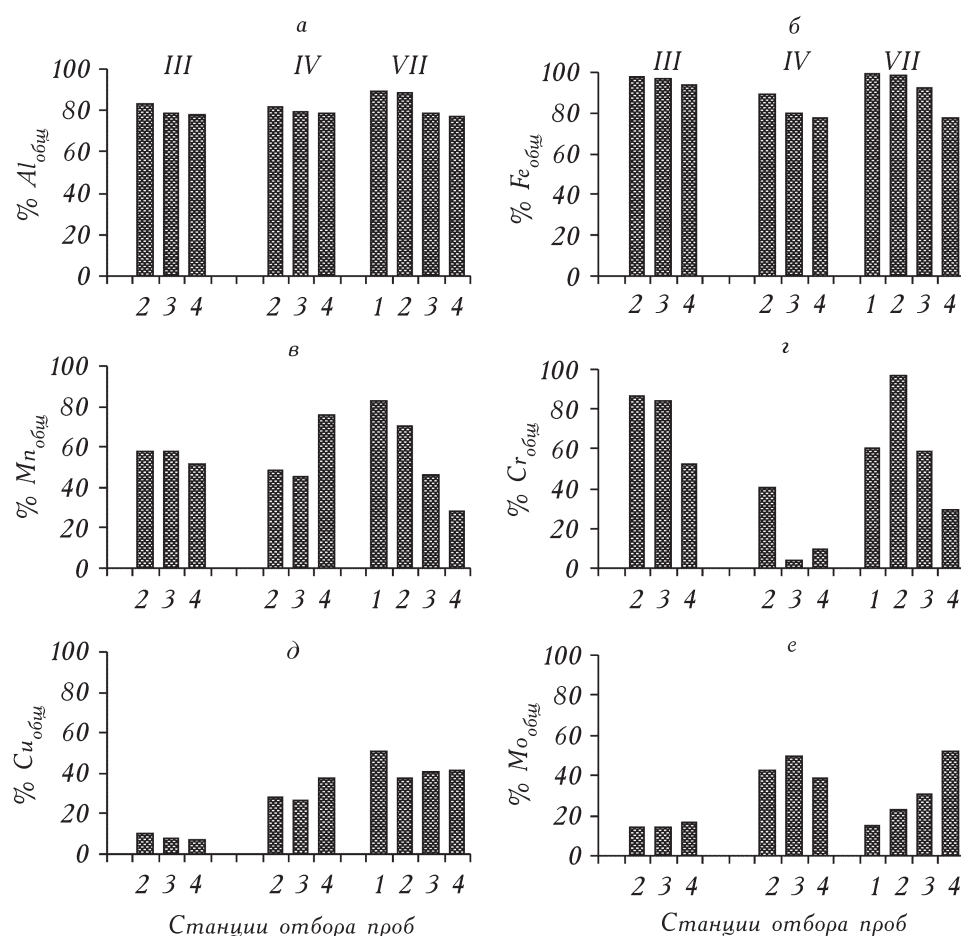
П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 2: M<sub>раств</sub> и M<sub>взв</sub> — соответственно содержание металла в составе растворенной и взвешенной форм; M<sub>общ</sub> — общее содержание металла в воде; станции отбора проб: 1 — р. Дарница, ≈ 800 м выше впадения в оз. Нижний Тельбин, 2, 3 и 4 — соответственно верхний, средний и нижний участки оз. Нижний Тельбин. Здесь и в табл. 2 и 3: над чертой — предельные величины, под чертой — средние значения.

ленных металлов (см. табл. 2, рис. 2). Медь и молибден преобладали в растворенном виде — 81,9—84,4% Cu<sub>общ</sub> и 56,6—66,7% Mo<sub>общ</sub>. Обращает на себя внимание повышение относительного содержания молибдена в составе взвешенной формы в оз. Вербном по сравнению с оз. Нижний Тельбин, что связано, по всей видимости, с развитием фитопланктона.

В сезонном аспекте наблюдалось снижение доли взвешенной формы исследуемых металлов летом по сравнению с весной. Это связано как со снижением массы взвешенных веществ, так и с сезонными особенностями развития фитопланктона. Весной масса взвеси составляла 8,7—10,8 мг/дм<sup>3</sup>, а летом — 5,1—8,4 мг/дм<sup>3</sup>. В апреле, как правило, наблюдаются благоприятные условия для развития диатомовых водорослей, тогда как летом доминируют синезеленые и зеленые водоросли. Увеличение относительного и абсолютного содержания взвешенного алюминия во время интенсивного развития диатомовых водорослей было выявлено нами ранее на других водных объектах.

Таким образом, взвешенные вещества как минерального, так и органического происхождения влияют на соотношение растворенной и взвешенной форм металлов вследствие трансформации растворенной формы во взве-





1. Пространственно-временные изменения массовой доли взвешенной формы алюминия (а), железа (б), марганца (в), хрома (г), меди (д) и молибдена (е) в воде оз. Нижний Тельбин в 2018 г. Станции отбора проб: 1 — р. Дарница,  $\approx 800$  м выше впадения в оз. Нижний Тельбин, 2, 3 и 4 — соответственно верхний, средний и нижний участки оз. Нижний Тельбин. Римскими цифрами обозначены месяцы.

шенную. Разница заключается в том, что эта трансформация в воде со взвесью минеральной природы происходит за счет адсорбции, а в воде с доминированием взвешенных веществ органического происхождения — вследствие ассимиляции металлов планктонными организмами и, возможно, адсорбции на их поверхности.

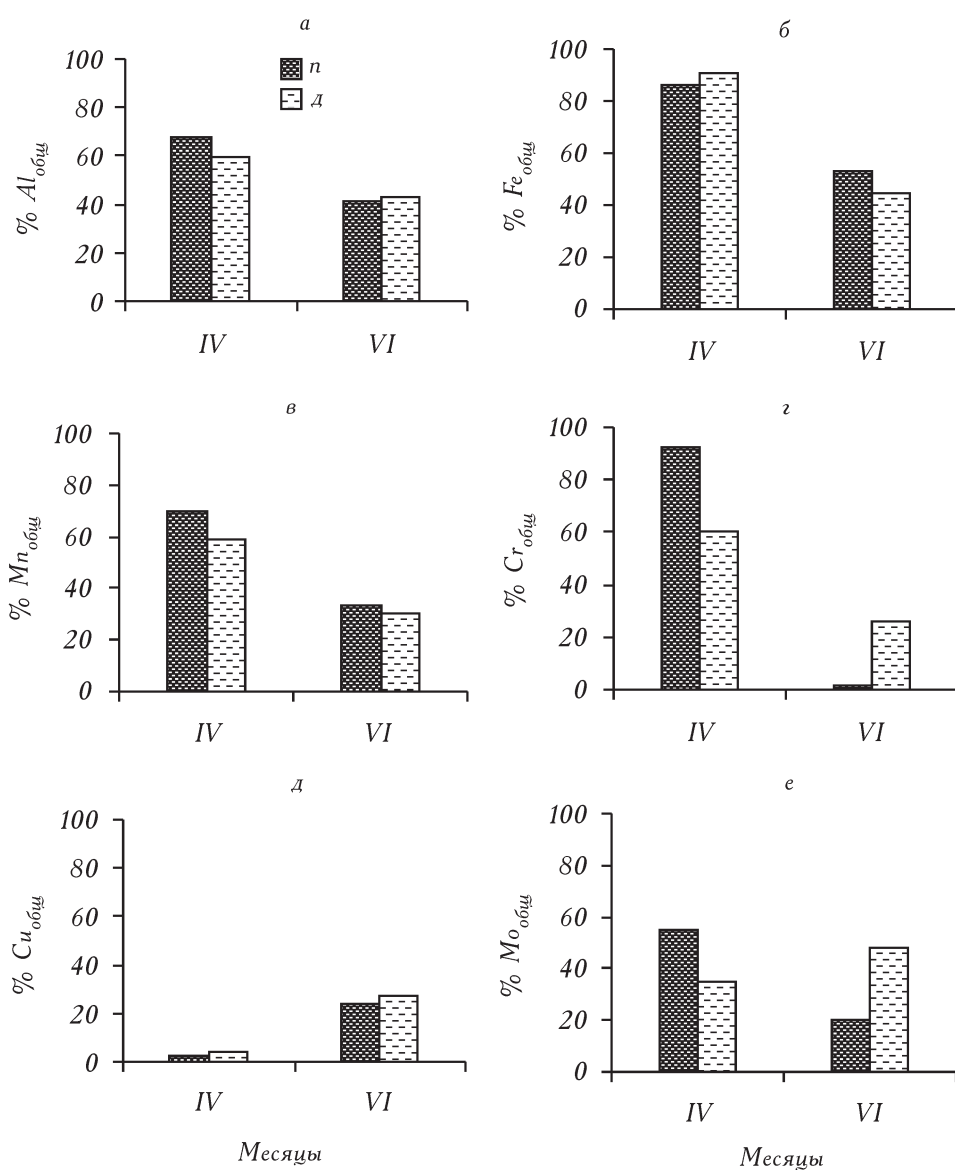
Роль отдельных фракций взвешенных веществ в накоплении и миграции металлов и роль наиболее важных факторов среды в их распределении среди взвешенных веществ. В состав взвешенных веществ входят частицы различных размеров. Считается, что частицы размером более 0,45 мкм следует относить к взвешенным веществам. В то же время, фильтрат воды, который получают после пропускания пробы через мембранный фильтр с диаметром пор 0,4 мкм, может содержать не только растворенную форму металлов, но и коллоидную. В отступление от общепринятых рекомендаций, нами была



**2. Концентрация растворенной и взвешенной форм исследованных металлов в воде оз. Вербного, 2018 г.**

Горизонты водной толщи	M <sub>раств</sub>		M <sub>взв</sub>		M <sub>общ</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>
	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	мкг/дм <sup>3</sup>	% M <sub>общ</sub>	
Алюминий					
Поверхностный	$\frac{43,4 - 71,4}{57,4}$	43,4	$\frac{55,7 - 93,8}{74,8}$	56,6	$\frac{127,1 - 137,2}{132,2}$
Придонный	$\frac{46,7 - 76,6}{61,7}$	47,7	$\frac{65,7 - 69,4}{67,6}$	52,3	$\frac{116,1 - 142,3}{129,3}$
Железо					
Поверхностный	$\frac{17,2 - 72,4}{44,8}$	28,5	$\frac{90,3 - 134,5}{112,4}$	71,5	$\frac{151,7 - 162,7}{157,2}$
Придонный	$\frac{17,2 - 82,8}{50,0}$	26,6	$\frac{71,6 - 204,5}{138,0}$	73,4	$\frac{154,4 - 221,7}{188,0}$
Марганец					
Поверхностный	$\frac{13,6 - 15,0}{14,3}$	41,8	$\frac{7,4 - 32,4}{19,9}$	58,2	$\frac{22,4 - 46,0}{34,2}$
Придонный	$\frac{36,2 - 43,0}{39,6}$	53,9	$\frac{18,9 - 48,9}{33,9}$	46,1	$\frac{61,9 - 85,1}{73,5}$
Хром					
Поверхностный	$\frac{0,4 - 18,3}{9,4}$	77,0	$\frac{0,5 - 5,1}{2,8}$	23,0	$\frac{5,5 - 18,8}{12,2}$
Придонный	$\frac{4,0 - 8,0}{3,8}$	35,5	$\frac{1,5 - 12,3}{6,9}$	64,5	$\frac{5,5 - 20,3}{10,7}$
Медь					
Поверхностный	$\frac{19,9 - 24,5}{23,2}$	84,4	$\frac{0,7 - 7,5}{4,3}$	15,6	$\frac{25,2 - 31,4}{27,5}$
Придонный	$\frac{23,7 - 29,1}{25,4}$	81,9	$\frac{1,3 - 8,9}{5,6}$	18,1	$\frac{28,3 - 33,7}{31,0}$
Молибден					
Поверхностный	$\frac{1,8 - 5,2}{3,6}$	66,7	$\frac{1,3 - 2,2}{1,8}$	33,3	$\frac{4,0 - 6,5}{5,4}$
Придонный	$\frac{2,8 - 3,2}{3,0}$	56,6	$\frac{1,5 - 3,0}{2,3}$	43,4	$\frac{4,3 - 6,2}{5,3}$

предпринята попытка определить относительное содержание частиц определенного размера в составе взвешенных веществ, а также рассчитать кон-



2. Пространственно-временные изменения массовой доли алюминия (а), железа (б), марганца (в), хрома (г), меди (д) и молибдена (е) в составе взвешенных веществ в воде оз. Вербного в 2018 г.; *n* и *д* — соответственно поверхностный и придонный горизонты воды.

центрацию исследуемого металла, содержащегося в 1 г частиц определенного размера.

В течение исследуемого периода массовая доля взвешенных веществ с размером частиц  $> 0,85$  мкм в воде оз. Нижний Тельбин составляла 74,0—99,5%, а в воде оз. Вербного — 71,7—79,8% от их общего содержания в воде. Относительное содержание взвешенных веществ с размером частиц

$> 0,4$ — $0,85$  мкм в этих водных объектах составило соответственно  $0,3$ — $24,3$  и  $9,6$ — $24,5\%$ . Массовая доля взвешенных веществ с размером частиц  $> 0,23$ — $0,4$  мкм колебалась в пределах соответственно  $0,2$ — $8,0$  и  $3,8$ — $10,6\%$ . Разница между этими водными объектами заключалась в более высоком относительном содержании взвешенных веществ с размером частиц  $> 0,85$  мкм в оз. Нижний Тельбин. Установлено, что в составе взвешенных веществ озер Нижний Тельбин и Вербного с размером частиц  $> 0,85$  мкм мигрирует соответственно  $77,4$ — $96,9$  и  $28,7$ — $60,6\%$  взвешенного Al,  $46,1$ — $96,9$  и  $13,0$ — $60,0\%$  взвешенного Fe,  $36,4$ — $96,9$  и  $49,4$ — $82,4\%$  взвешенного Mn,  $39,6$ — $90,8$  и  $12,1$ — $27,7\%$  взвешенного Cr. Следовательно, решающую роль в миграции исследуемых металлов во взвешенном состоянии в оз. Нижний Тельбин играют взвешенные частицы с размером  $> 0,85$  мкм. В оз. Вербном примерно треть взвешенной формы металлов мигрирует в составе двух других фракций с размером частиц соответственно  $> 0,4$ — $0,85$  и  $> 0,23$ — $0,4$  мкм.

По расчетам содержания исследуемого металла в 1 г каждой размерной фракции взвешенных частиц установлено, что с уменьшением размера последних концентрация Al, Fe, Mn, Cr, Cu и Mo возрастает соответственно с  $4,4$  до  $188$  мг/г,  $4,2$  до  $286,5$ ,  $0,1$  до  $14,0$ ,  $0,1$  до  $9,7$ ,  $0,004$  до  $9,6$  и  $0,02$  до  $9,7$  мг/г (табл. 3). Превышение кларковых значений наблюдается по содержанию практически всех исследованных металлов, за исключением алюминия, что свидетельствует об их накоплении в составе взвешенных веществ, а также о том, что последние потенциально могут быть источником вторичного загрязнения водной среды растворенными металлами при определенных условиях, например при подкислении.

Для сравнительной оценки роли фракций взвешенных веществ с различным размером частиц в накоплении металлов и для большей наглядности на рисунках 3 и 4 приведены соответствующие данные об их содержании в каждой из них.

Можно убедиться, что концентрация каждого из исследованных металлов заметно увеличивается с уменьшением размера частиц. Больше всего их содержится во фракции с наименьшим размером частиц ( $> 0,23$ — $0,40$  мкм). Подобная картина распределения органического углерода и ряда металлов (Mg, Ca, Na, K, Cu и Zn) описана ранее другими исследователями [14, 27]. О снижении концентрации металлов в составе взвешенных веществ в период паводка, когда в их составе увеличивается массовая доля грубодисперсной фракции, отмечено в работе [16]. Однако массовая доля тонкодисперсной фракции взвесей с размером частиц  $> 0,23$ — $0,40$  мкм, как правило, намного ниже относительного содержания грубодисперсной фракции с размером частиц  $> 0,85$  мкм, что создает иллюзию преимущественного переноса металлов водным потоком именно в составе этой фракции.

*Десорбция металлов из состава взвешенных веществ.* Десорбцию Al, Fe, Mn, Cr и Cu из состава взвешенных веществ было исследовано на примере озер Нижний Тельбин и Вербного. Подкисление проб воды до pH 4,0 на месте их отбора проводилось с целью устранения (минимизации) явления адсорбции металлов на стенках сосудов, пока они не будут доставлены в ста-

### 3. Концентрация металлов в составе взвешенных частиц с определенным размером

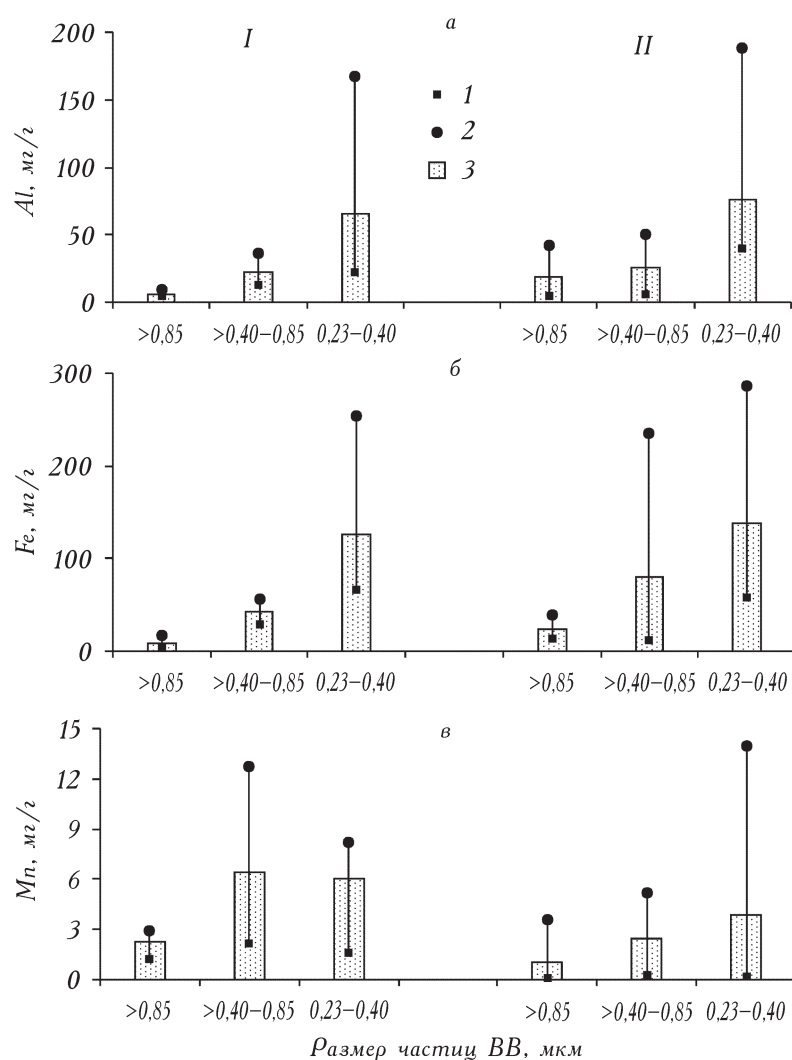
Водные объекты	Кларк в почвах, мг/г [1]	M, мг/г			M <sub>взв</sub> , мг/г (размер частиц > 0,4 мкм)
		размер частиц, мкм			
		> 0,85	> 0,4—0,85	> 0,23—0,4	
Алюминий					
Оз. Нижний Тельбин	38,2	5,2 – 42,2	5,4 – 50,0	39,5 – 188	5,2 – 43,0
		18,3	25,4	76,6	18,1
Оз. Вербное		4,4 – 9,3	12,4 – 36,2	22,4 – 167,5	6,4 – 10,9
		6,4	22,6	65,5	9,0
Железо					
Оз. Нижний Тельбин	22,3	14,3 – 39,1	11,5 – 235,7	58,3 – 286,5	14,6 – 48,1
		24,6	80,0	138,0	26,8
Оз. Вербное		4,2 – 16,8	29,8 – 55,4	65,7 – 254,0	8,5 – 18,9
		9,1	43,1	125,6	15,2
Марганец					
Оз. Нижний Тельбин	0,73	0,1 – 3,6	0,3 – 5,2	0,2 – 14,0	0,1 – 3,9
		1,0	2,5	3,9	1,1
Оз. Вербное		1,2 – 2,9	2,2 – 12,7	1,6 – 8,2	1,5 – 4,5
		2,3	6,4	6,0	3,0
Хром					
Оз. Нижний Тельбин	0,08	0,1 – 0,7	0,2 – 2,3	0,6 – 8,3	0,1 – 0,7
		0,3	1,0	3,4	0,3
Оз. Вербное		0,1 – 0,5	0,1 – 4,3	2,4 – 9,7	0,1 – 1,1
		0,2	1,9	7,0	0,5
Медь					
Оз. Нижний Тельбин	0,039	0,004 – 0,12	0,09 – 6,86	0,9 – 9,6	0,1 – 6,8
		0,06	2,72	5,0	2,3
Оз. Вербное		0,021 – 0,16	0,08 – 5,33	0,4 – 7,2	0,3 – 4,3
		0,08	2,20	2,9	1,8
Молибден					
Оз. Нижний Тельбин	0,0024	0,02 – 0,27	0,4 – 9,7	0,0 – 6,0	0,2 – 9,7
		0,085	1,67	1,8	2,0
Оз. Вербное		0,07 – 0,12	0,15 – 0,5	0,12 – 3,3	0,2 – 0,5
		0,10	0,29	1,2	0,3

Примечание. С кларковым значением металлов в почве необходимо сравнивать содержание металла во взвешенной форме с размером частиц > 0,4 мкм.

## 4. Концентрация и массовая доля десорбированной формы исследуемых металлов при снижении рН до 4,0

τ, ч	Al <sub>десорб</sub>		Fe <sub>десорб</sub>		Mn <sub>десорб</sub>		Cr <sub>десорб</sub>		Cu <sub>десорб</sub>	
	мкг/дм <sup>3</sup>	%	мкг/дм <sup>3</sup>	%	мкг/дм <sup>3</sup>	%	мкг/дм <sup>3</sup>	%	мкг/дм <sup>3</sup>	%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12,5	2,8	0	0	5,0	16,1	3,0	17,4	0	0
24	90	20,1	0	0	22,1	71,3	5,0	29,1	0,2	5,3
144	112	25,1	3,0	0,2	23,0	74,2	12,0	69,8	0,3	7,9
288	151	33,8	3,0	0,2	23,7	76,5	14,9	86,6	0,2	5,3
M <sub>адсорб</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	447		1736		31,0		17,2		3,8	
Оз. Вербное (придонный горизонт воды)										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6,1	8,8	0	0	6,0	12,2	2,0	16,3	0	0
24	8,6	12,4	4,0	2,0	15,8	32,2	5,6	45,5	0	0
144	15,5	22,3	17,3	8,4	17,6	35,9	7,6	61,8	0,12	10,0
288	15,5	22,3	24,1	11,8	17,6	35,9	7,6	61,8	0,10	8,3
M <sub>адсорб</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	69,4		205		49,0		12,3		1,2	

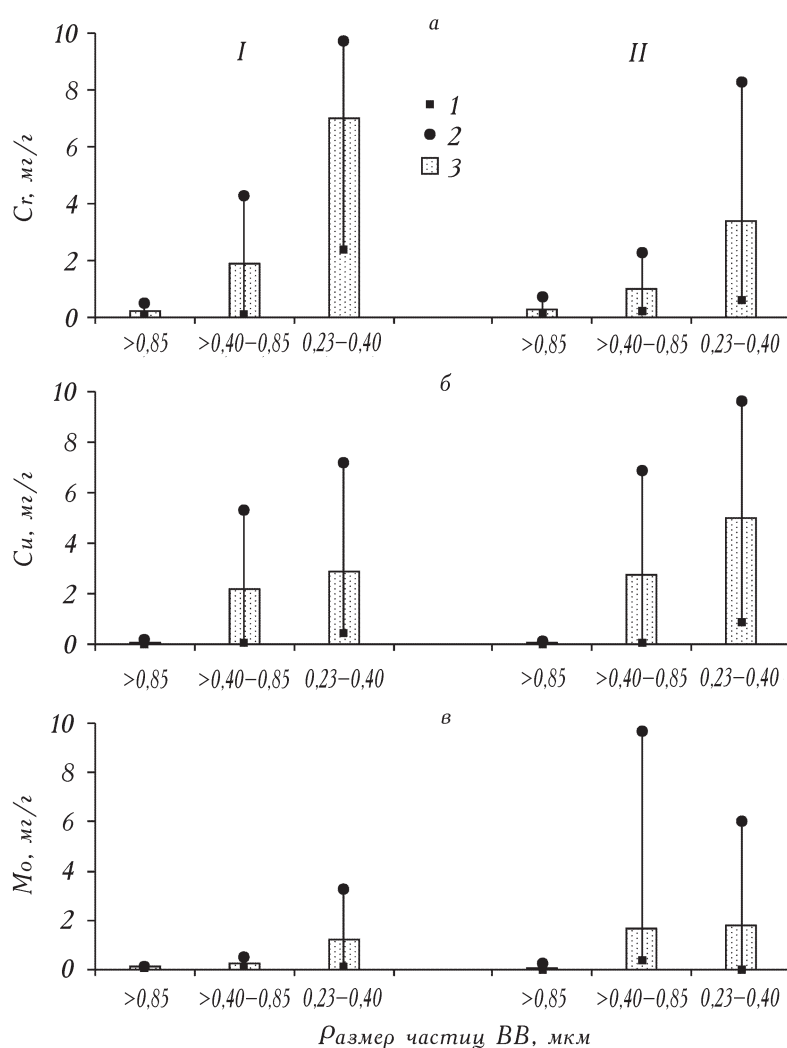
Примечание. M<sub>адсорб</sub> — концентрация адсорбированной формы металла в составе взвешенных веществ, которая определялась после «мокрого» сжигания; массовая доля десорбированной формы металла рассчитывалась относительно содержания его адсорбированной формы.



3. Предельные (1, 2) и средние (3) величины содержания Al (а), Fe (б) и Mn (в) в составе взвешенных веществ с различным размером частиц в воде озер Вербного (I) и Нижний Тельбин (II), 2018 г.

ционную лабораторию. Особый интерес представляла оценка степени десорбции металлов в течение первых суток после отбора.

Оказалось, что в течение 24 ч эксперимента из состава взвешенных веществ в наибольшей степени извлекался марганец (71,3%, табл. 4). Другие металлы либо не десорбировались вовсе (Fe, Cu), или же степень их десорбции не превышала 20—29% (Al, Cr). По истечению 144 ч и 288 ч эксперимента, независимо от природы взвешенных веществ, доля десорбированной формы металла уменьшалась в ряду Cr > Mn > Al > Fe, Cu (см. табл. 4). Как и прежде, наименьшая степень десорбции характерна для Fe и Cu, что обусловлено формами их нахождения в составе взвешенных веществ. По-види-



4. Предельные (1, 2) и средние (3) величины содержания Cr (а), Cu (б) и Mo (в) в составе взвешенных веществ с различным размером частиц в воде озер Вербного (I) и Нижний Тельбин (II), 2018 г.

тому, в составе взвесей доминирует оксидная форма железа, которая слабо-растворима при pH 4,0. Медь, как известно, находится чаще всего в органической и остаточной фракциях взвешенных веществ, поэтому требуются более жесткие условия для ее высвобождения из состава последних [31]. Степень десорбции марганца и хрома оказалась наибольшей, что связано с особенностями их распределения между различными фракциями взвешенных веществ. Хорошо известно, что переход марганца из твердой фазы (взвеси, донные отложения) увеличивается в анаэробных условиях, а снижение pH усиливает этот процесс.



Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при изменении условий среды (снижение pH, дефицит кислорода, формирование восстановительных условий) взвешенные вещества могут служить источником вторичного загрязнения водной среды соединениями некоторых металлов. В то же время, в нейтральной среде и в окислительных условиях при оптимальном содержании в воде кислорода взвешенные вещества адсорбируют на своей поверхности соединения металлов, которые при седиментации поступают в донные отложения и временно выводятся из круговорота. Условия водной среды определяют, какую роль могут выполнять взвешенные вещества, то ли быть источником вторичного загрязнения, или же принимать участие в очищении воды от соединений металлов.

### *Заключение*

В результате проведенных исследований установлена важная роль взвешенных веществ в миграции металлов в озерных системах, находящихся на урбанизированной территории и подвергающихся антропогенному воздействию. На примере озер Нижний Тельбин и Вербное было установлено, что преобладающая часть Al, Fe, Mn и Cr находилась в составе взвешенных веществ, тогда как Cu и Mo были выявлены главным образом в растворенном состоянии, что, в общем, характерно для миграции этих металлов и в других водных объектах, включая реки и водохранилища Днепроовского каскада.

Соотношение фракций взвешенных веществ с различным размером частиц ( $> 0,85$  мкм,  $> 0,40$ — $0,85$  мкм и  $> 0,23$ — $0,40$  мкм), которые были выделены методом мембранной фильтрации, мало отличалось в воде исследованных озер, несмотря на различия в их массе и происхождении. Преобладала грубодисперсная фракция с размером частиц  $> 0,85$  мкм. В ее составе мигрирует основная масса металлов — соответственно 77,4—96,9 и 28,7—60,6% Al<sub>взв</sub>, 46,1—96,9 и 13,0—60,0% Fe<sub>взв</sub>, 36,4—96,9 и 49,4—82,4% Mn<sub>взв</sub>, 39,6—90,8 и 12,1—27,7% Cr<sub>взв</sub>. Однако при оценке роли перечисленных фракций взвесей в накоплении и миграции металлов оказалось, что с уменьшением размера частиц взвесей содержание в них металлов из расчета мг/г сухой массы взвеси существенно возрастает. Это обусловлено тем, что тонкодисперсная фракция взвесей ( $> 0,23$ — $0,40$  мкм) обладает значительно большей адсорбционной способностью по отношению к металлам, чем другие вышеперечисленные фракции. Однако из-за ее наименьшего содержания в составе взвешенных веществ доля содержащихся в ее составе металлов кажется ничтожно низкой.

Исследование влияния pH воды на десорбцию металлов из состава взвешенных веществ показало, что снижение этого показателя до 4,0 способствует их высвобождению из состава последних. В то же время не все металлы десорбируют в одинаковой степени. В частности, десорбция железа и меди оказалась наименьшей, что, вероятно, связано с особенностями их распределения среди фракций взвешенных веществ. Большая часть железа оказалась в составе оксидной и остаточной фракций, а меди — в составе органической и остаточной фракций. Поэтому высвобождение этих металлов из состава указанных фракций было незначительным при pH 4,0. Оно может существенно увеличиваться лишь в более жестких условиях воздействия на взвешенные вещества.

\*\*

У статті розглянуто результати досліджень ролі завислих речовин та їхніх окремих фракцій з різним розміром частинок у накопиченні й міграції металів (Al, Fe, Mn, Cr, Cu і Mo) в озерних екосистемах (на прикладі озер Нижній Тельбін та Вербне, м. Київ). Показано, що в обох озерах Al, Fe, Mn і Cr мігрують переважно у завислому стані. Масова частка завислої форми кожного із зазначених металів знаходилась в межах: у воді оз. Нижній Тельбін — 77,7—86,6%, 82,4—96,6, 45,6—56,9, 29,9—74,0%, у воді оз. Вербного — 43,8—68,4%, 46,4—92,2, 30,5—70,4 і 0,7—93,4% загального їхнього вмісту. Водночас, Cu і Mo були виявлені переважно у розчиненому стані — 66,6—74,9%  $Cu_{зав}$  і 63,9—77,8%  $Mo_{зав}$  у воді оз. Нижній Тельбін і 81,9—84,4%  $Cu_{зав}$  і 56,6—66,7%  $Mo_{зав}$  у воді оз. Вербного. Наведено результати досліджень стосовно вмісту досліджуваних металів у складі фракцій завислих речовин з різним розміром частинок ( $> 0,85$  мкм,  $> 0,40$ — $0,85$  мкм і  $> 0,23$ — $0,40$  мкм). Зі зменшенням розміру частинок концентрація металів у них з розрахунку мг/г сухої маси зависі істотно збільшується. При зниженні рН води до 4,0 частка десорбованої форми металів зменшувалась в ряду  $Cr > Mn > Al > Fe, Cu$  незалежно від природи завислих речовин.

\*\*

*There were considered the results of studies on the role of suspended solids and their individual fractions with different particle sizes in the accumulation and migration of metals (Al, Fe, Mn, Cr, Cu and Mo) in lake ecosystems (for example of Nizhny Telbin and Verbnoye lakes, Kiev). It was shown that in both lakes Al, Fe, Mn and Cr migrate predominantly in a suspended state. The relative content of the suspended form of each of the above metals was within: in the water of Nizhny Telbin Lake — 77,7—86,6%, 82,4—96,6, 45,6—56,9, 29,9—74,0%, in the water of Verbnoye Lake — 43,8—68,4%, 46,4—92,2, 30,5—70,4 and 0,7—93,4% of their total content in water. At the same time, Cu and Mo were found predominantly in the dissolved state — 66,6—74,9%  $Cu_{total}$  and 63,9—77,8%  $Mo_{total}$  in the water of Nizhny Telbin Lake and 81,9—84,4%  $Cu_{total}$  and 56,6—66,7%  $Mo_{total}$  in the water of Verbnoye Lake. The data on the content of the investigated metals in the suspended solids fractions with different particle sizes ( $> 0,85$   $\mu m$ ,  $> 0,40$ — $0,85$   $\mu m$  and  $> 0,23$ — $0,40$   $\mu m$ ) are presented. It was established that with decreasing particle size, the concentration of metals in them based mg/g dry weight of suspended solids increases significantly. It was established that with a decrease in water pH to 4,0 the share of the desorbed metal form decreased in the series  $Cr > Mn > Al > Fe, Cu$ , regardless of the nature of the suspended substances.*

\*\*

1. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. — Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. — 388 с.
2. Аналітична хімія поверхневих вод. — К.: Наук. думка, 2007. — 456 с.
3. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии. Пер. с англ. / Под ред. А. И. Бусева и Н. В. Трофимова. — М.: Химия, 1984. — 432 с.
4. Ігнатенко І.І., Холодько О.П., Линник П.М. Особливості міграції молібдену у водних об'єктах, що зазнають впливу золівідвалів Трипільської теплоелектростанції // Наук. праці УкрНДГМІ. — Вип. 262. — К.: Фенікс, 2012. — С. 81—88.
5. Линник П.Н., Лещинская А.А., Набиванец Б.И. О методических особенностях исследования сосуществующих форм хрома в природных водах // Гидробиол. журн. — 1989. — Т. 25, № 2. — С. 88—93.

6. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 271 с.
7. *Набиванец Б.И., Линник П.Н., Калабина Л.В.* Кинетические методы анализа природных вод. — Киев: Наук. думка, 1981. — 140 с.
8. *Основы аналитической химии: Практ. руководство / Под ред. Ю. А. Золотова.* — М.: Высш. шк., 2001. — 463 с.
9. *Пат. 75995 Україна, МПК<sup>51</sup> (2012.01) G 01 N 1/00* Модифікований батометр-склянка; Жежеря В.А.; винахідник Жежеря В.А., власник Інститут гідробіології НАН України. — № u 2012 05246; заяв. 27.04.2012; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24.
10. *Савранский А.И., Нагжафова О.Ю.* Спектрофотометрическое исследование комплексообразования Cu, Fe и Al с хромазуолом S в присутствии смеси катионного и неионогенного ПАВ // Журн. аналит. химии. — 1992. — Т. 47, № 9. — С. 1613—1617.
11. *Allard T., Ponthieu M., Weber T. et al.* Nature and properties of suspended solids in the Amazon Basin // Bull. Soc. géol. France. — 2002. — Vol. 173, N 1. — P. 67—75.
12. *Benson N.U., Anake W.U., Olanrewaju I.O.* Analytical relevance of trace metal speciation in environmental and biophysicochemical systems // Amer. J. Anal. Chem. — 2013. — Vol. 4. — P. 633—641.
13. *De Paiva Magalhães D., da Costa Marques M.R., Baptista D.F., Buss D.F.* Metal bioavailability and toxicity in freshwaters // Environ. Chem. Lett. — 2015. — Vol. 13, N 1. — P. 69—87.
14. *Douglas G.B., Beckett R., Hart B.T.* Fractionation and concentration of suspended particulate matter in natural waters // Hydrological Processes. — 1993. — Vol. 7. — P. 177—191.
15. *Environmental particles / Ed. by J. Buffle, H. P. Leeuwen (IUPAC environmental analytical and physical chemistry series.* — Boca Raton: Lewis Publishers, 1992. — Vol. 1. — 554 p.
16. *Harrison R.M., Wilson S.J.* The chemical composition of highway drainage waters. II. Chemical associations of metals in the suspended sediment // Sci. Total Environ. — 1985. — Vol. 43. — P. 79—87.
17. *Hart B.T.* Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates: a review // Hydrobiologia. — 1982. — Vol. 91. — P. 299—313.
18. *Jones J.R., Knowlton M.F.* Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes // Water Res. — 2005. — Vol. 39. — P. 3629—3635.
19. *Karlsson S., Allard B., Håkansson K.* Characterization of suspended solids in a stream receiving acid mine effluents, Bersbo, Sweden // Applied Geochem. — 1988. — Vol. 3. — P. 345—356.
20. *Linnik P.M., Zubenko I.B.* Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds // Lakes and Reservoirs: Research and Management. — 2000. — Vol. 5, N 1. — P. 11—21.
21. *Linnik P.N.* Bottom sediments of reservoirs as a potential source of secondary pollution of the aquatic environment by heavy metal compounds // Hydrobiol. J. — 2001. — Vol. 37, N 1. — P. 73—86.
22. *Linnik P.N.* Complexation as the most important factor in the fate and transport of heavy metals in the Dnieper water bodies // Anal. Bioanal. Chem. — 2003. — Vol. 376, N 3. — P. 405—412.

23. Linnik P.N. Copper in surface waters of Ukraine: content, forms of occurrence, and regularities of migration // *Hydrobiol. J.* — 2014. — Vol. 50, N 1. — P. 81—99.
24. Linnik P.N., Ignatenko I.I. Molybdenum in natural surface waters: content and forms of occurrence (a review) // *Ibid.* — 2015. — Vol. 51, N 4. — P. 80—103.
25. Ödman F., Ruth T., Pontér C. Validation of a field filtration technique for characterization of suspended particulate matter from freshwater. Part I. Major elements // *Applied Geochem.* — 1999. — Vol. 14. — P. 301—317.
26. Pintilie S., Brânză L., Bețianu C. et al. Modelling and simulation of heavy metals transport in water and sediments // *Environ. Engineering and Management J.* — 2007. — Vol. 6, N 2, 153—161.
27. Ran Y., Fu J.M., Sheng G.Y. et al. Fractionation and composition of colloidal and suspended particulate materials in rivers // *Chemosphere.* — 2000. — Vol. 41. — P. 33—43.
28. Reeder R.J., Schoonen M.A.A., Lanzirrotti A. Metal speciation and its role in bioaccessibility and bioavailability // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* — 2006. — Vol. 64. — P. 59—113.
29. Rohatgi N., Chen K.Y. Transport of trace metals by suspended particulates on mixing with seawater // *Wat. Pollut. Control Federation.* — 1975. — Vol. 47, N 9. — P. 2298—2316.
30. Shi B., Allen H.E., Grassi M.T., Ma H. Modelling copper partitioning in surface waters // *Wat. Res.* — 1998. — Vol. 32, N. 12. — P. 3756—3764.
31. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* — 1979. — Vol. 51. — P. 844—851.
32. Town R.M., Filella M. Size fractionation of trace metal species in freshwaters: implications for understanding their behaviour and fate // *Reviews in Environmental Science & Biotechnology.* — 2002. — Vol. 1. — P. 277—297.
33. Turner A., Millward G.E. Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* — 2002. — Vol. 55. — P. 857—883.
34. Väänänen K., Leppänen M.T., Chen X.-P., Akkanen J. Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: from science to environmental management // *Ecotoxicol. Environ. Safety.* — 2018. — Vol. 147. — P. 430—446.
35. Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // *Sci. Total Environ.* — 2009. — Vol. 407. — P. 853—868.
36. Warren L.A., Haack E.A. Biogeochemical controls on metal behaviour in freshwater environments // *Earth-Sci. Reviews.* — 2001. — Vol. 54. — P. 261—320.
37. Yong R., Jia-mo F.U., Guo-ying S. et al. Suspended particulate and colloidal matter in natural waters // *J. Environ. Sci.* — 2000. — Vol. 12, N 2. — P. 129—137.
38. Zhezherya V.A., Linnik P.N., Zhezherya T.P., Skobley M.P. Methodical peculiarities of the preparation of samples of suspended matter and bottom sediments // *Hydrobiol. J.* — 2016. — Vol. 52, N 2. — P. 83—100.