

УДК 628.35

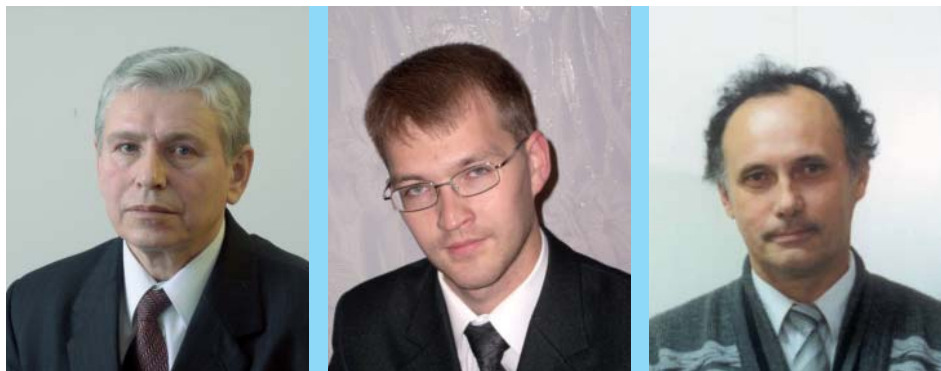
## КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА, ЗАГРЯЗНЕННОГО ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ, ВОДНО-ВОЗДУШНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

© 2012 г. А.М. Асонов<sup>1</sup>, М.В. Кириллов<sup>1</sup>, С.Е. Денисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Челябинск

**Ключевые слова:** активный ил, осадок, высшая водно-воздушная растительность, тростник обыкновенный, кондиционирование, детоксикация, десорбция, токсиканты.



А.М. Асонов

М.В. Кириллов

С.Е. Денисов

Представлено одно из решений проблемы утилизации активного ила с городских станций аэраций, загрязненных ионами тяжелых металлов. Предложена идея кондиционирования осадка, предусматривающая его детоксикацию с помощью высшей водно-воздушной растительности, в частности тростника обыкновенного. Описаны объекты и методики исследования, приведены результаты исследований.

При рассмотрении современных технологий утилизации значительных масс активных илов, образующихся при биохимической очистке городских и промышленных сточных вод, было признано, что наиболее перспективной является технология, позволяющая использование илов в сельском хозяйстве в качестве органоминерального удобрения [1–3]. Остальные рассмотренные пути утилизации активных илов могут быть применены к малотоннажным производствам и не решают проблему рационального использования биологических ресурсов в виде активных илов.

Водное хозяйство России № 3, 2012

# Водное хозяйство России

Следует подчеркнуть, что поиск рациональных путей использования активных илов станций аэраций важен не только с позиции экономической целесообразности, но и экологической. Действительно, депонирование илов на иловых площадках, илонакопителях и шламохранилищах в значительной мере ухудшает окружающую среду человека, приводит к необходимости отвода под эти цели значительных земельных площадей для строительства данных сооружений и организации санитарных зон вокруг них [4].

Все это указывает на отсутствие альтернативы в технологиях утилизации значительных объемов активных илов их широкомасштабному использованию в качестве органоминеральных удобрений на сельскохозяйственных, парковых и лесных угодьях.

Целью данной работы является решение проблемы детоксикации активного ила с последующей возможностью использования его в агросистемах.

При анализе проблем, возникающих при утилизации активных илов станций аэраций крупных промышленных городов, нами было обращено внимание на невозможность использования последних в качестве удобрения из-за значительной загрязненности ионами тяжелых металлов. Сравнивая концентрации тяжелых металлов в активных илах с допустимыми нормами содержания металлов в почвах, следует отметить, что по отдельным показателям они выше в десятки и даже сотни раз [5, 6]. Это обстоятельство сдерживает использование активных илов в качестве удобрений и выдвигает как первоочередную задачу их детоксикации.

Крайне важной задачей, стоящей при кондиционировании активного ила, является снижение его влажности. Необходимость ее решения во многом связана с транспортными затратами по доставке удобрений до конкретного потребителя. Доставка активных илов на значительные расстояния от места производства неэкономична, а используемые для его обезвоживания технологии и сооружения (отстойники, илоуплотнители, центрифуги, пресс-фильтры, иловые площадки) не решают вопросов детоксикации.

Третьим аспектом в кондиционировании активных илов является санитарно-эпидемиологический. Как отмечалось ранее, активные илы, содержащие патогенные бактерии и яйца гельминтов, требуют их предварительного обеззараживания. Исходя из условий и требований к активным илам станций аэрации, их кондиционирование должно заключаться в максимально возможном снижении их влажности, эффективной детоксикации и санации при относительно низких энерго- и финансовых затратах.

Учитывая, что технологии обезвоживания и обеззараживания достаточно хорошо изучены и проверены практикой, настоящие исследования были сосредоточены на наиболее нерешенном аспекте проблемы – детоксикации активных илов, загрязненных ионами тяжелых металлов [3–8].

При этом учитывалось, что в настоящее время имеются огромные запасы активных илов, временно законсервированных на иловых полях, шламо-накопителях и других местах, чаще всего для этого мало приспособленных и не обеспечивающих экологическую безопасность.

Активные илы, пролежавшие 5–10 и более лет, имеют относительно низкую влажность (70–75 %) и могли бы быть использованы в качестве удобрений на сельскохозяйственных угодьях. Однако содержание в них ионов тяжелых металлов не позволяет использовать их для этих целей в связи с высоким фоном этих поллютантов в почвах.

Кондиционирование активных илов этой категории предусматривает их детоксикацию с помощью высшей водно-воздушной растительности, в частности тростника обыкновенного.

Ко второй категории илов, требующих детоксикации, относятся «свежие», т. е. образующиеся в настоящее время на станциях аэрации избыточные илы с влажностью 95–96 %.

#### Объекты и методики исследований

Исследования выполнялись в лаборатории биомониторинга кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Уральского государственного университета путей сообщения.

Основным объектом исследований был избыточный активный ил с Северной станции аэрации г. Екатеринбурга и высшая водная растительность. При выполнении исследований, касающихся изучения десорбции ионов тяжелых металлов из активного ила с помощью высшей водно-воздушной растительности, использовался тростник обыкновенный (*Phragmites australis*). В качестве питательного субстрата исследовался вышеуказанный активный ил.

Исследования выполнялись в экспериментальных иловых картах площадью 1 м<sup>2</sup> каждая. Карты были выполнены в виде полиэтиленовых емкостей с перфорированным днищем, заполненные активным илом, взятым с производственных иловых карт, слоем 0,4 м. Высота карт составляла 0,5 м. Располагалась опытно-производственная установка вблизи производственных иловых карт станции аэрации г. Екатеринбурга.

Для сохранения температурного режима для активного ила и тростника, аналогичного с естественным в почве, экспериментальные карты вкапывались на всю глубину в землю. Влажность твердого субстрата (активный ил) обеспечивалась естественными атмосферными осадками. В экспериментальных иловых картах корневища с почками высаживались на глубину 0,15–0,20 м. Количество почек составляло 30–40 на один м<sup>2</sup>.

По окончании вегетационного сезона срезалась надземная биомасса тростника и анализировалась на содержание в них ионов тяжелых металлов. В конце первого сезона в первых трех картах выкапывались и корневища. Активный ил с экспериментальной установки изымался на анализ по всей глубине. Образцы активного ила отбирались также и с производственных иловых карт очистных сооружений в тех местах, откуда он брался для заполнения экспериментальных карт. Результаты количественного анализа этих проб учитывались в дальнейшем в качестве фона.

Образцы активного ила и биомассы тростника озолялись серной кислотой. Химический анализ полученных проб выполнялся по общепринятым методикам [9].

### Результаты исследований извлечения тяжелых металлов из активного ила водно-воздушной растительностью и их обсуждение

На первом этапе исследований были выполнены работы по изучению качественного состава активного ила с иловых карт и после механического обезвоживания на фильтр-прессе фирмы Вилькенпресс. Предполагалось, что количественные показатели токсикантов в илах могут быть различными с более высокими значениями в илах [10] в связи с тем, что в составе подсушенного ила с производственных иловых карт остаются токсиканты жидкой фазы, в то время как после механического обезвоживания на пресс-фильтре они отсутствуют.

Отбор проб на химический анализ ила осуществлялся с площадки 10×10 м, выделенной на производственной иловой карте для заполнения иловых карт пилотной установки.

Результаты химического анализа тридцати проб, по 15 каждого типа ила, обработанные с использованием прикладных статистических программ для ПЭВМ, представлены в табл. 1. Данные по содержанию металлов в активном иле и растениях рассчитаны на сухую массу (105 °С).

Результаты исследований были использованы в качестве исходных концентраций (фона) при детоксикации илов в экспериментальных картах пилотной установки.

Таблица 1. Качество активных илов станции аэрации

Активные илы	Содержание тяжелых металлов, мг/кг									
	$Al^{3+}$	$Cd^{2+}$	$Co^{2+}$	$Cr^{3+}$	$Cu^{2+}$	$Fe^{3+}$	$Mn^{2+}$	$Ni^{2+}$	$P^{5+}$	$Zn^{2+}$
С иловых карт	52604	<0,05	<0,1	1195	726	56276	2986	429	36353	4705
После механического обезвоживания	—	—	—	337	607	76805	1344	362	32486	2758

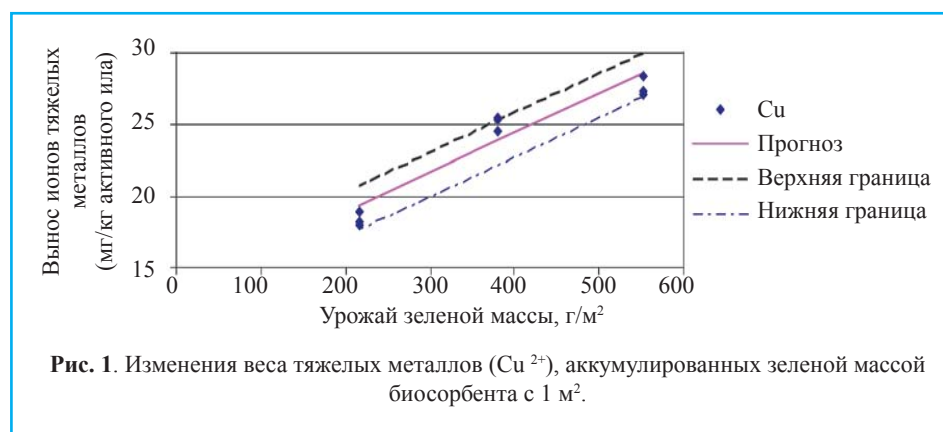
**Таблица 2.** Вынос ионов тяжелых металлов (мг/кг активного ила) из активного ила биосорбентом в зависимости от урожайности

Металл	Урожайность		
	552,7 г/м <sup>2</sup>	381,1 г/м <sup>2</sup>	216,1 г/м <sup>2</sup>
Cu <sup>2+</sup>	27,6	25,1	18,4
Fe <sup>3+</sup>	1013,3	1154,6	416,1
Mn <sup>2+</sup>	305,7	217,9	89,3
Ni <sup>2+</sup>	93,3	63,1	44,55
Zn <sup>2+</sup>	546,1	508,8	302,4

Как было отмечено, рабочая гипотеза о перспективности использования биосорбента в виде тростника для извлечения ионов тяжелых металлов из активного ила потребовала изучения влияния количества биомассы тростника на экспериментальных площадках на эффективность детоксикации активного ила [10].

С этой целью на всех девяти площадках количество высаженных корневищ с почками было различным: на первых трех – 35–40, на вторых трех – 25–30 и на третьих трех – 15–20 почек/м<sup>2</sup>. В результате, как и следовало ожидать, урожай (по сухому веществу) надземной части растений колебался с 552 до 216 г/м<sup>2</sup>, что отразилось на количестве тяжелых металлов, потребленных биосорбентом (табл. 2).

Для каждого токсиканта проведены следующие вычисления: найдены среднее в группе, дисперсия, построены доверительные интервалы для средних значений по данным. Для расчетов использовался встроенный пакет статистического анализа EXCEL, его компонент «Анализ данных: регрессия». На основании полученных данных построен график изменения веса тяжелых металлов аккумулированного зеленой массой биосорбента с 1 м<sup>2</sup> от биомассы. На рис. 1 в качестве примера использован один из исследуемых элементов медь (Cu<sup>2+</sup>).



Характер зависимости веса тяжелых металлов от биомассы описывается уравнением:

$$y = 0,03x + 13,41,$$

где  $x$  – урожай зеленой массы, г/м<sup>2</sup>;

$y$  – вес тяжелых металлов аккумулированного зеленой массой биосорбента с 1 м<sup>2</sup>, мг/кг.

Коэффициент корреляции  $R \approx 0,94$  ( $R^2 = 0,88$ ).

Полученные данные показывают, что урожай зеленой массы биосорбента значительно влияет на извлечение тяжелых металлов из активного ила. При более высокой плотности посадки тростника обыкновенного и увеличении его биомассы извлечение тяжелых металлов из активного ила увеличивается.

Следующим этапом исследования было изучение динамики роста концентрации ионов тяжелых металлов в вегетативных органах водно-воздушных растений (тростник обыкновенный).

Наблюдения выполнялись на трех экспериментальных иловых картах. В качестве твердого субстрата использовался ил, отобранный с территории производственных карт. Иловые карты площадью 1 м<sup>2</sup> заполнялись илом влажностью 65–75 % на высоту 0,4 м. На глубину 15–20 см заделывались корневища тростника с почками. Посадка тростника проводилась 15–20 мая. Корневища тростника выкапывались для посадки на экспериментальные иловые карты с территории, примыкающей к производственным иловым площадкам, а концентрации в вегетативных органах тростника ионов тяжелых металлов принимались за фон.

В конце вегетационного сезона растения выкапывались, замерялась их высота, вес вегетационных органов (листья, стебли, корни), выполнялся химический анализ последних на наличие в них токсикантов.

Анализ экспериментальных данных по содержанию ионов тяжелых металлов, сорбированных и поглощенных вегетативными органами тростника, позволяет отметить, что основная масса токсикантов ( $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ) аккумулируется в зеленой массе на 81, 99, 79 и 99 %, соответственно. Ионы меди ( $Cu^{2+}$ ) распределяются между корневой системой и зеленой (надземной) массой примерно поровну, 52 и 48 %, соответственно.

Распределение ионов алюминия ( $Al^{3+}$ ) и железа ( $Fe^{3+}$ ) имеет другую направленность, в корневой системе их содержание составляет 99 и 70 %, соответственно. Судя по тому, что нормы для почв, используемых для выращивания сельхозпродукции, допускают достаточно высокие концентрации алюминия (50 000 мг/кг) и железа (51 000 мг/кг) [10], их присутствие в корневой системе в количестве 99 % (3395,88 мг/кг) и 70 % (4526,38 мг/кг) от общего содержания металла в растении также не может угнетать развитие растений.

Представляет определенный научный и практический интерес динамика накопления вегетационными органами тростника ионов металлов в вегетационный период.

С этой целью для исследования были задействованы три экспериментальные иловые карты, заполненные активным илом с производственных карт. В конце каждого из трех месяцев (июль, август, сентябрь) одна из трех карт ликвидировалась, а листья, стебли и корни подвергались анализу на содержание в них исследуемых токсикантов ( $Al^{3+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $P^{5+}$  и  $Zn^{2+}$ ). Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3. Концентрация ионов тяжелых металлов за три месяца вегетационного периода

Металл	Концентрация, мг/кг			
	Фон	Июль	Август	Сентябрь
<b>Листья</b>				
$Al^{3+}$	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0
$Cd^{2+}$	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
$Co^{2+}$	10	<0,1	<0,1	<0,1
$Cr^{3+}$	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
$Cu^{2+}$	5	14	16	26
$Fe^{3+}$	374	1210	1336	1519
$Mn^{2+}$	222	383	500	694
$Ni^{2+}$	11	36	67	<0,1
$Zn^{2+}$	61	504	732	813
<b>Стебли</b>				
$Al^{3+}$	20	24	27	27
$Cd^{2+}$	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
$Co^{2+}$	5	<0,1	<0,1	<0,1
$Cr^{3+}$	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
$Cu^{2+}$	5,6	12,6	15,7	<0,1
$Fe^{3+}$	546	666	761	771
$Mn^{2+}$	325	349	360	365
$Ni^{2+}$	125	166	173	176
$Zn^{2+}$	1036	1200	1311	1396
<b>Корни</b>				
$Al^{3+}$	2321	2466	2555	3496
$Cd^{2+}$	<0,05	<0,05	<0,05	14
$Co^{2+}$	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
$Cr^{3+}$	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
$Cu^{2+}$	<0,1	12	26	32
$Fe^{3+}$	3201	3257	3292	4973
$Mn^{2+}$	196	221	242	301
$Ni^{2+}$	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
$Zn^{2+}$	63	200	339	496

Сравнивая концентрации тяжелых металлов в вегетативных органах растений, используемых в качестве фона, с содержанием их в растениях с экспериментальных площадок, отмечаем резкий скачок в последних концентрациях практически всех исследуемых токсикантов. Так, по меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ), железу ( $\text{Fe}^{3+}$ ), никелю ( $\text{Ni}^{2+}$ ) концентрация в листьях возросла в три раза, а по цинку ( $\text{Zn}^{2+}$ ) почти на порядок.

В последующие два месяца концентрация токсикантов в вегетативных органах растений продолжала расти, хотя и более медленными темпами (табл. 3).

На основании полученных данных построены зависимости содержания концентрации цинка в вегетативных органах тростника обыкновенного от времени экспозиции в активном иле (рис. 2).

Характер зависимости описывается уравнениями:

$$\text{Листья} \quad y = 8,28x + 154,50,$$

$$\text{Стебли} \quad y = 3,97x + 1057,10,$$

$$\text{Корни} \quad y = 4,79x + 58,80,$$

где  $x$  – экспозиция, сут;

$y$  – концентрация  $\text{Zn}$  в биомассе тростника, мг/кг.

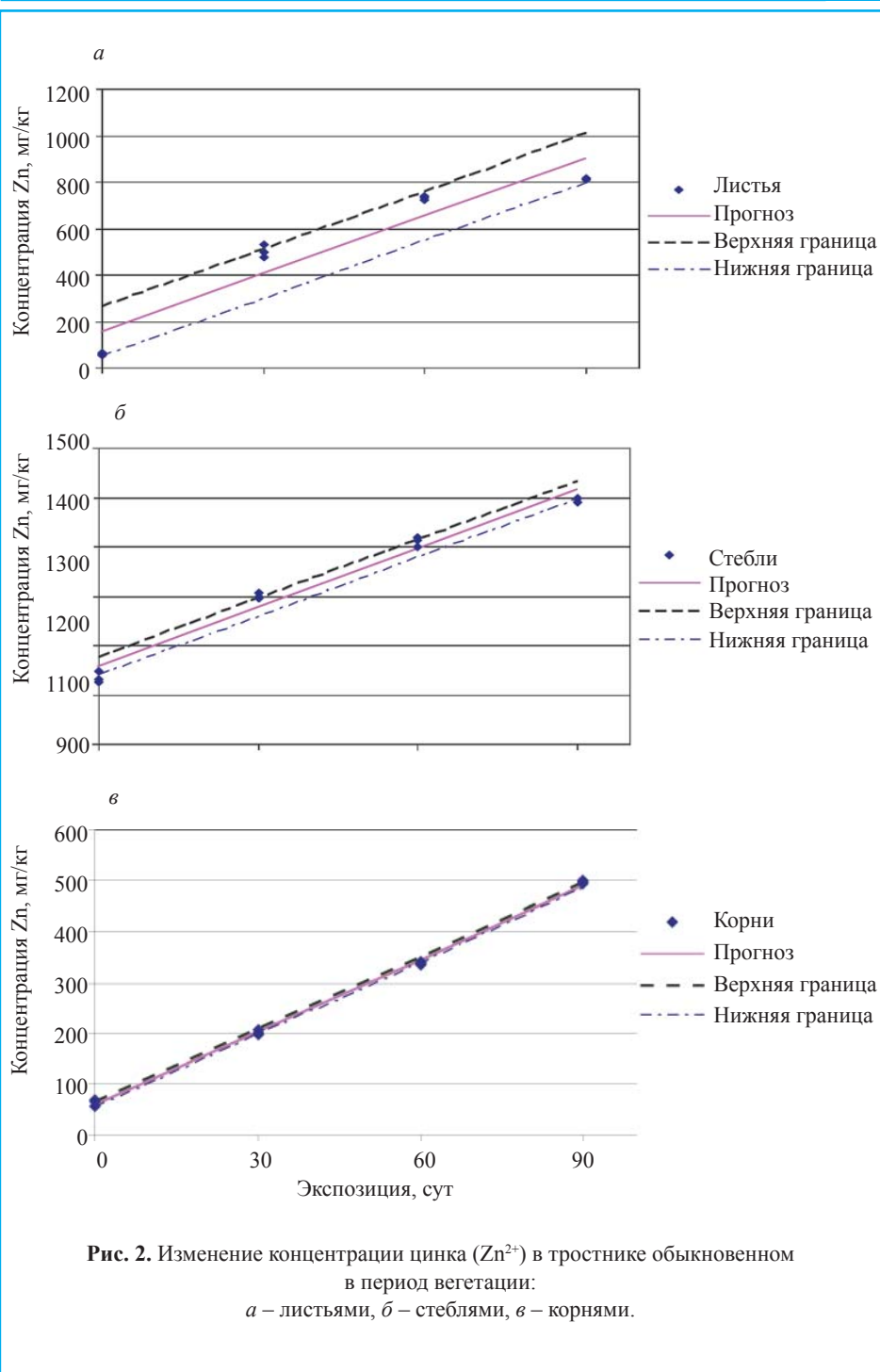
Коэффициент корреляции ( $R_{\text{листья}} = 0,95$ ;  $R_{\text{стебли}} = 0,99$ ;  $R_{\text{корни}} = 0,999$ ) значительно отличается от нуля, поэтому фактор, т. е. время экспозиции биосорбента в активном иле, значимо влияет на извлечение тяжелых металлов.

Выполненные исследования и полученные результаты являются принципиально важными для разработки технологии детоксикации избыточных активных илов станции аэрации. Предлагаемая технология предусматривает ежегодную уборку стеблей и листьев по завершении вегетационного периода, а корневища могут использоваться многократно.

Сосредоточение основной массы наиболее токсичных для растений элементов в надземной, т. е. ежегодно убираемой части растений, позволяет последним выполнять функцию детоксикантов не менее 7–10 вегетационных сезонов. Кроме того концентрирование токсичных элементов в достаточном малом объеме зеленой массы позволяет их захоронение на относительно малых специальных территориях, оборудованных для приема и хранения токсичных материалов.

Одновременно с химическим анализом биомассы растений были выполнены анализы усредненных иловых проб из каждой экспериментальной карты после вегетационного периода. Анализ результатов данных исследований показывает, что всего за один вегетационный сезон биосорбент в виде тростника способствовал очистке активного ила, а





затем вместе с почвенной влагой потребил от 30 до 70 % токсикантов. Так ионы никеля ( $\text{Ni}^{2+}$ ) и хрома ( $\text{Cr}^{3+}$ ) удалены из активного ила на 70 %, ионы меди – 50 %, ионы цинка и марганца – 35 % и только ионы железа на 75 % остались в иле.

Сравнение остаточных концентраций ионов тяжелых металлов с нормативными показателями, указывающими на возможность использования активного ила в качестве органического удобрения [11], позволяет отметить высокую степень детоксикации ила с помощью высшей водно-воздушной растительности в виде тростника и перспективность его использования в технологии кондиционирования активного ила.

### Выводы

1. Выполненные исследования и анализ литературных источников позволяют рекомендовать в качестве основного биологического агента, осуществляющего детоксикацию избыточного активного ила, тростник обыкновенный.

2. Исследование содержания ионов тяжелых металлов в вегетативных органах тростника обыкновенного, посаженного на активном иле, показывает, что основная масса токсикантов аккумулируется в его зеленой массе.

3. Тростник обыкновенный способен извлекать с активного ила и утилизировать в своей биомассе за один вегетационный период от 30 до 70 % токсичных тяжелых металлов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов М.В., Асонов А.М. К вопросу утилизации осадков станции аэрации городской канализации // Безопасность как фактор устойчивого развития региона. Сб. докл. II научно-практической конференции. Ижевск: РГОТУПС, 2007. С. 36.
2. Кириллов М.В., Асонов А.М. Утилизация избыточного активного ила // Система управления экологической безопасностью. Международная заочная научно-практическая конференция «СУЭБ-2007». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 113–116.
3. Кириллов М.В., Асонов А.М. Проблема утилизации активных илов // Сб. материалов IX Междунар. симпозиума «Чистая вода России». Екатеринбург. 2007. С. 388–389.
4. Жуков Н.Н. Состояние и перспективы развития сооружений по обработке водопроводных и канализационных осадков в городах России // Водоснабжение и санитарная техника. 2002. № 12. С. 6.
5. Кириллов М.В., Асонов А.М. Исследование процессов десорбции ионов тяжелых металлов с избыточных активных илов с помощью кальциевых материалов // Сб. материалов V Междунар. конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов». Харьков. Украина. 2008. С. 283–284.
6. Кириллов М.В., Асонов А.М. Обезвреживание избыточных активных илов с помощью высшей водно-воздушной растительности. ДВГУПС. Хабаровск. 2008. С. 123–127.

7. Кириллов М.В. Асонов А.М. Перспективы использования опоки для десорбции ионов тяжелых металлов // Сб. материалов X Междунар. симпозиума «Чистая вода России». Екатеринбург. 2008. С. 513–517.
8. Асонов А.М., Кириллов М.В. Десорбция ионов тяжелых металлов из активного ила с помощью природного материала – опоки // Сб. материалов научно-технической конференции, посвященной 130-летию Свердловской железной дороги. Екатеринбург. 2008. С. 252.
9. Методика проведения технологического контроля очистных сооружений городской канализации / под ред. О.Т. Болотиной. М. : Изд-во литературы по строительству, 1971. 231 с.
10. Кириллов М.В. Совершенствование технологии детоксикации активного ила с целью его безопасной утилизации в агросистемах. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург. 2010. 128 с.
11. СанПиН 2.1.7.573-96 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения.

**Сведения об авторах:**

Асонов Александр Михайлович, д.б.н., профессор, кафедры «Техносферная безопасность», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова 66; e-mail: ason@mail66.ru

Кириллов Максим Владимирович, старший преподаватель, кафедры «Техносферная безопасность», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66; e-mail: kirillovmv.83@mail.ru

Денисов Сергей Егорович, д. т. н., профессор, заведующий отделом, Челябинский отдел, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Челябинск, ул. Калинина, 13