

**Янин Е.П. Химический состав и особенности поставки твердых взвешенных веществ в малую реку с канализационным стоком города // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2013, № 6, с. 2–16.**

Важной характеристикой речных вод является содержание в них твердых взвешенных веществ (речной взвеси, взвешенных наносов), т. е. частиц минерального и органического происхождения, находящихся в воде и транспортируемых водным потоком в нерастворенном состоянии. Речная взвесь определяет многие гидрофизические характеристики воды (мутность, прозрачность, цветность, привкус и запах воды). Взвешенные органические частицы используются микроорганизмами для питания и защиты. Речной взвесью хорошо адсорбируются бактерии и вирусы. Оптические свойства воды во многом зависят от количества и состава взвешенных в ней веществ. Как правило, чем выше мутность, тем сильнее поглощаются ультрафиолетовые лучи, что способствует увеличению теплосодержания, но препятствует проникновению солнечного света, а это, в свою очередь, тормозит процессы фотосинтеза и оказывает существенное влияние на гидрохимический режим и биологическую жизнь водотока, вплоть до прямого токсического эффекта на гидробионтов [5, 38]. Определенная, нередко существенная доля взвешенных наносов является частью руслообразующих наносов, которые при прекращении их транспорта активно участвуют в формировании донных отложений [18]. Взвесь играет важную роль в миграции химических элементов в реках, а также, в техногенных ландшафтах, в формировании зон загрязнения и образовании в руслах рек нового типа современных русловых отложений – техногенных илов, в существенной мере определяющих важнейшие эколого-геохимические особенности речных систем в освоенных районах [23, 24].

В природных условиях количество взвешенных в речных водах веществ определяется интенсивностью эрозионно-денудационных процессов [10, 16]. Для малых рек основную часть взвеси составляют минеральные частицы, представляющие собой главным образом продукты эрозии почв, берегов, донных отложений. Основным фактором внутригодовой изменчивости содержаний взвеси является режим стока воды, причем наиболее высокие ее концентрации наблюдаются в половодье и паводки, а низкие – в летнюю и особенно в зимнюю межень, когда мутность рек обусловлена преимущественно размывающей деятельностью потока. Для распределения мутности речных вод и модуля стока наносов наблюдается географическая зональность [16]. Н.И. Алексеевский [1] в транспортируемом рекой осадочном материале выделяет две генетических составляющих, одна из которых связана с внешними, другая – с внутренними источниками формирования стока наносов. Внешние генетические составляющие стока твердых наносов представляют собой часть переносимого рекой осадочного материала, поступающего с водосборной территории (так называемая бассейновая, или транзитная, составляющая наносов). Внутренние составляющие связаны главным образом с размывом ранее накопившихся речных отложений и в существенной степени являются следствием возникновения направленного массообмена в системе поток-русло (русловая составляющая стока наносов). Сток влекомых частиц характеризует в основном перенос собственно русловых отложений. Соотношение русловых и транзитных фракций в составе взвешенных наносов колеблется в достаточно широком диапазоне, определяется интенсивностью взаимодействия потока и русловых отложений (гидравлическими факторами) и масштабами поставки материала внешними источниками осадочного материала. В свою очередь, в структуре стока взвешенных наносов выделяется ряд генетических составляющих, значимость и соотношение которых изменчивы и, судя по всему, зависят от характеристик реки и разнообразных природных факторов. Существующие данные, как подчеркивает Н.И. Алексеевский [1], позволяют лишь в общих чертах охарактеризовать генетические составляющие стока

взвешенных наносов (табл. 1). В природных условиях в системах «водосбор-русло» и «эрозия-транспорт-аккумуляция» обычно существует определенный баланс осадочного материала. С этих позиций, по выражению А.П. Павлова [11], «каждая река представляет механизм, строго урегулированный».

Таблица 1

**Генетические составляющие стока взвешенных наносов  
(обобщение данных, приводимых в [1]) \***

Коэффициент генетической значимости	Значения коэффициента
процессов смыва почв на водосборах	0,06 – 0,70
овражной эрозии на склонах речных долин	0,02 – 0,53
обвальнo-осыпных процессов	0,012 – 0,304
селей	0,07 – 0,80
оползневых процессов	0,0005 – 0,90
крипа	0,004 – 0,10
эрозионных процессов в руслах рек	0,02 – 0,74
размыва берегов	0,01 – 0,64

\* Значения коэффициента генетической значимости могут изменяться от 0 до 1, а с учетом процессов аккумуляции наносов в русле и на пойме от –1 до +1. Последние процессы в природных условиях являются единственными, которые снижают содержание в потоке взвешенных веществ. В техногенных условиях к ним присоединяется ряд явлений, способствующих изъятию взвеси из миграционного потока (например, забор речной воды на различные нужды и т. п.).

В техногенных ландшафтах в седиментогенезе участвуют значительные массы материала, появление которого в осадочном цикле связано с хозяйственной деятельностью человека (с техногенезом) [8, 13, 27, 33], что непосредственно отражается на процессах аллювиального седиментогенеза, нарушая указанный выше «урегулированный механизм». Это в существенной мере обусловлено тем, что за последние 100–150 лет в сложившейся системе природопользования функции многих рек коренным образом изменились: в большинстве случаев они, особенно малые и средние реки, являются коллекторами сточных вод и загрязненного поверхностного стока, содержащих значительные количества техногенного осадочного материала. Модули твердого стока в таких районах возрастают (по сравнению с зональными значениями) на один-два порядка, при этом осадочный материал, поступающий в водотоки, характеризуется специфическим вещественным составом и высокими концентрациями химических элементов и их соединений [21, 22, 32]. Например, зональный модуль стока в пределах бассейна р. Пахры варьируется в пределах 5–30 т/км<sup>2</sup>/год [12], причем минимальные значения характерны для участков, не затронутых явной хозяйственной деятельностью. Расчеты показывают, что аналогичный показатель для территории г. Подольска только с учетом осадочного материала, поступающего в р. Пахру со сточными водами, составляет порядка 40 т/км<sup>2</sup>/год. Для бассейна р. Инсар (Мордовия) зональный модуль стока наносов оценивается в 0,6 г/с/км<sup>2</sup>. В пределах г. Саранска, если учитывать дополнительную поставку твердых наносов только с организованным сбросом промышленно-бытовых сточных вод, он возрастает до 2,4 г/с/км<sup>2</sup> [28]. Значительное количество осадочного материала поступает в указанные реки с поверхностным (дождевым, талым, поливочно-моечным) стоком с территории городов, что еще более увеличивает модуль стока твердых наносов. Общая поставка осадочного материала в реки с поверхностным стоком с территории крупных и особенно крупнейших городов заметно превышает таковую с их канализационным стоком [4, 32, 33]. В малых и средних городах отводимые сточные воды, как правило, являются одним из важнейших источников поставки техногенного осадочного материала в реки. К тому же, во-первых, канализационный сток городов достаточно постоянен в разрезе года, т. е. поставка им осадочного материала, как правило, не зависит от сезона и относительно стабильна в течение года, тогда как для поверхностного стока характерно неоднородное (сезонное) распределение; во-вторых, имен-

но канализационный сток поставляет наиболее широкий спектр загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты. Это, в сущности, и определяет необходимость изучения химического состава и особенностей поступления техногенного осадочного материала с канализационным стоком в городских ландшафтах и его распределения в реках.

В общем случае в зонах влияния городов поведение взвешенных в речных водах веществ во многом определяется существованием в водном потоке пространственной структуры, обусловленной типичным на практике сопряжением: источник загрязнения (городские очистные сооружения, с которых осуществляется сброс сточных вод) – коллектор сточных вод (обычно небольшой водоток) – малая или средняя река, принимающая сточные воды [29]. В указанном сопряжении следует различать зону смешения сточных и речных вод и зону распределения поллютантов природными факторами миграции. В свою очередь, зона смешения состоит из верхнего и нижнего участков. Верхний участок чаще всего представляет собой ручей, принимающий сточные воды. Здесь происходит начальное смешение сточных и поверхностных вод, а качественные и количественные параметры водного потока в существенной мере зависят от режима поступления и состава сточных вод. В пределах нижнего участка осуществляется смешение сточных вод с речными, а характеристики потока зависят от степени разбавления стоков природными водами. В зоне распределения параметры водного потока в большей степени определяются природными факторами, способствующими рассеиванию и дифференциации поллютантов, трансформации их форм нахождения, перераспределению между компонентами речной среды. Именно здесь активно развиты процессы техногенного аллювиального седиментогенеза, основным материальным продуктом которых являются техногенные илы.

Концентрация присутствующего в водной массе взвешенного вещества может рассматриваться в качестве переменной, существующей и непрерывно изменяющейся во времени – в динамическом (временном) ряду наблюдения. Точность оценок, которые можно сделать на основе изучения таких рядов, в общем случае зависит не только от числа наблюдений, но и от внутренней структуры ряда [7]. С этих позиций для изучения поведения взвешенных веществ в речных водах рационально проведение наблюдений, направленных на установление временного распределения взвешенных веществ путем организации исследований, основанных на отборе проб воды в течение определенных и достаточно длительных отрезков времени на створах, расположенных в пределах основных зон указанного выше сопряжения, а также на фоновом створе (водотоке, который не испытывает прямого техногенного воздействия). Рассмотрим результаты таких исследований, выполненных на р. Пахре в зоне влияния г. Подольска (Московская область) [29]. Здесь в летнюю межень осуществлялся ежедневный (с 15 июля по 15 августа, т. е. 32 дня подряд) отбор проб воды на трех створах. Створ I располагался в устье руч. Черного, сток которого практически полностью формируется за счет поступления сточных вод с очистных сооружений г. Подольска. Наблюдения на этом створе позволяют охарактеризовать процесс поставки взвешенных веществ источником загрязнения и выявить особенности их поведения в пределах верхнего участка зоны смешения. Створ II, отвечающий замыкающему створу нижнего участка зоны смешения, находился на р. Пахре в 2 км ниже устья руч. Черного. На этом отрезке реки происходит перемешивание сточных и речных вод, а распределение взвеси обуславливается главным образом гидродинамическими процессами разбавления стоков речными водами. Створ III располагался на р. Пахре в пределах зоны распределения (в 9 км ниже устья руч. Черного); участок речного русла до этого створа характеризуется типичным для равнинных малых рек геоморфологическим строением; здесь активно идут процессы перераспределения взвешенных веществ, происходит осаждение их значительной массы, что обуславливает формирование в речном русле техногенных илов. В качестве фонового был выбран створ IV, расположенный на р. Москвы вне зоны прямого техногенного воздействия (выше Можайского водохранилища). Здесь пробы отбирались в тот же период времени, но с интервалом в три дня. Данные, характеризующие распределение взвешенных веществ в фоновых условиях, необходимы для уста-

новления изменений в их поведении в условиях техногенного загрязнения и оценки его интенсивности. Зональные значения содержания взвешенных наносов в речных водах рассматриваемого региона (бассейн р. Москвы) по многолетним данным составляют: в весенний период 50–100 мг/л, в летне-осенний – 10–25, в зимний – до 10 мг/л [12]. Пробы воды (объемом 5 л) отбирались на стрежне водотока в белые полиэтиленовые канистры. Содержание взвешенных веществ в речной воде определялось весовым способом в полевой лаборатории. В частности, выделение взвешенных веществ осуществлялось путем фильтрования проб воды (объемом 1–2 л) под вакуумом через предварительно прокипяченные в дистиллированной воде и затем высушенные (в эксикаторе) до постоянной массы и взвешенные на аналитических весах мембранные нитроцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. После фильтрования фильтры с осадком высушивали при комнатной температуре и вновь взвешивали. По разности масс фильтра до и после фильтрования рассчитывалось количество взвешенных веществ в исследуемой пробе речной воды.

В табл. 2 приведены характеристики распределения взвеси в водах р. Пахры (створы I–III) и на фоновом створе (р. Москва). В фоновых условиях взвешенные вещества в исследуемый период (летнюю межень) отличаются однородным распределением во времени ( $V = 51\%$ ), причем 90% проб характеризуются концентрациями взвеси, разброс значений которых укладывается в стандартное отклонение выборки. Максимальная концентрация взвешенных веществ (48,8 мг/л) наблюдалась в период кратковременного, но интенсивного дождя, что обуславливало повышенную поставку осадочного материала в речной поток с водосборной территории, сопровождалось увеличением расхода воды в реке и способствовало взмучиванию русловых отложений. В целом для всего ряда динамических наблюдений на фоновом створе фиксируется прямая корреляционная связь между удельным содержанием взвеси в воде и расходом воды в реке ( $r = 0,69$ , при доверительной границе коэффициента корреляции для 5%-ного уровня значимости  $\pm 0,62$ ). Таким образом, в фоновых условиях временное поведение взвешенных веществ контролируется преимущественно гидрометеорологическими факторами, а средняя концентрация взвешенных веществ соотносится с зональными значениями их содержаний в летнюю межень.

Таблица 2

Содержание взвешенных веществ в речных водах на разных створах опробования, мг/л [29]

Створ	Среднее и его ошибка	Интервал	$V^*$	$R^{**}$	$K_c^{***}$	
					средний	максимальный
IV (фон)	24,16 ± 4,11	6,50–48,80	51	175	–	–
I	53,43 ± 8,68	18,70–288,60	92	505	2,2	11,9
II	27,97 ± 3,07	7,20–82,50	62	269	1,2	3,4
III	26,90 ± 2,81	9,60–83,0	59	273	1,1	3,4

\* Коэффициент вариации по стандартному отклонению.

\*\* Коэффициент вариации по вариационному размаху.

\*\*\* Коэффициент концентрации относительно среднего фонового содержания.

В условиях техногенного загрязнения распределение концентраций взвешенных веществ в динамическом ряду наблюдений имеет неоднородный (дискретный) характер (табл. 2, рис. 1). Особенно резко это проявляется в пределах верхнего участка зоны смешения (створ I), что подтверждается высокими значениями коэффициента вариации, рассчитанного по стандартному отклонению ( $V = 92\%$ ) и вариационному размаху ( $R = 505\%$ ). Здесь практически не наблюдалось выраженной корреляционной связи между концентрациями взвеси в сбрасываемых сточных водах и их объемом. Это свидетельствует о том, что временной характер распределения взвешенных веществ зависит, в первую очередь, от специфики функционирования городских очистных сооружений (в сущности, от степени очистки сточных вод). Средняя удельная концентрация взвеси на створе I заметно (в 2,2 раза) превышает фоновое значение. Характерным является появление пиковых кон-

центрации взвешенных веществ, в 3–11,9 раз превышающих среднее фоновое содержание. Таким образом, техногенная поставка взвешенных наносов характеризуется дискретным характером и осуществляется в количествах, превышающих их зональный модуль стока.

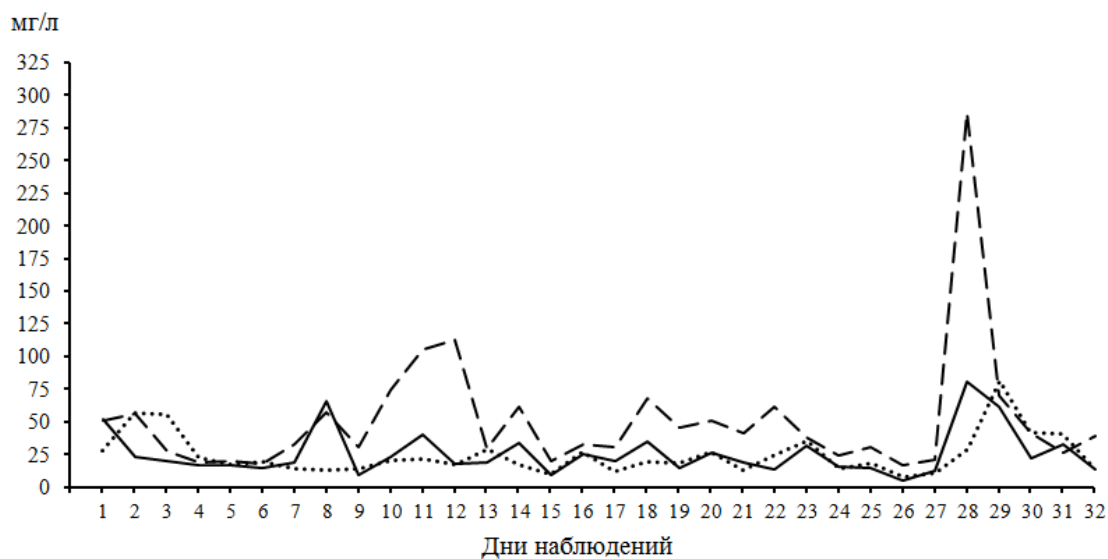


Рис. 1. Распределение взвешенных веществ на створах I (пунктир), II (сплошная линия) и III (точки).

В пределах замыкающего створа нижнего участка зоны смешения (створ II) поведение взвешенных наносов в первую очередь зависит от гидродинамических факторов, которые определяют кратность разбавления поступающих сточных вод, обогащенных взвесью, речными водами, мутность которых на участке русла выше устья руч. Черного составляет 10–15 мг/л [29]. Естественно, что, кроме физического (механического) разбавления, определенное значение имеют процессы ускоренной седиментации грубых взвешенных частиц, обладающих более высокой гидравлической крупностью. В значительной степени это является следствием подпруживания потока сточных вод и, соответственно, уменьшения скорости течения. Это, с одной стороны, приводит к заметному уменьшению средней удельной концентрации взвеси на створе II, с другой, – обуславливает снижение вариации ее содержаний в наблюдаемом временном ряду ( $V = 62\%$ ,  $R = 269\%$ ). Тем не менее, в целом, временное распределение взвешенных веществ и их концентрации на данном створе заметно отличаются от фоновых характеристик. Кроме того, во-первых, корреляционная связь между мутностью и расходом воды на створе II отсутствует ( $r = 0,01$ , при доверительной границе коэффициента корреляции для 5%-ного уровня значимости  $\pm 0,34$ ), во-вторых, характер графика распределения концентраций взвеси на створе II идентичен графику их распределения на створе I. Все это свидетельствует о ведущей роли техногенной поставки твердого материала на режим мутности воды в пределах нижнего участка зоны смешения. На створе III, т. е. в пределах зоны распределения поллютантов природными факторами миграции, характер поведения и уровни содержания взвешенных веществ во многом схожи с таковыми на предыдущем участке реки. Тем не менее здесь уже отмечается слабая корреляционная связь между содержаниями взвеси в воде и расходом воды ( $r = 0,24$ , при доверительной границе коэффициента корреляции для 5%-ного уровня значимости  $\pm 0,34$ ), что может свидетельствовать о вторичном поступлении твердых частиц из донных отложений при процессах взмучивания.

Для распределения взвешенных веществ в динамическом ряду наблюдения на створах I–III фиксируется определенного типа систематический эффект, проявляющийся в некоторой цикличности, когда на графиках пики (соответствующие максимальным концентрациям) и впадины (отвечающие минимальным концентрациям) значений появляются

через определенный интервал времени (в нашем случае обычно равный одному дню). Такие временные ряды называются циклическими рядами [7]. Использование предложенного М. Кендэллом [7] метода подсчета поворотных точек (на графиках распределения содержаний) как критерия проверки гипотезы о случайности колебаний при альтернативной гипотезе о наличии систематических колебаний, показало, что в основе своей наблюдаемые на створах I–III временные ряды распределения концентраций взвеси являются рядами случайных колебаний, что в существенной степени обусловлено влиянием внешних факторов. В рассматриваемом случае, безусловно, главным фактором является режим поступления в р. Пахру наносов со сточными водами по руч. Черному, вернее, дискретность поставки с ними осадочного материала. В частности, наблюдается прямая корреляция временных рядов распределения мутности на створе I и II ( $r = 0,69$ ), на створе I и III ( $r = 0,41$ ), на створе II и III ( $r = 0,42$ ). Определение степени тесноты линейной связи между результативным признаком (в данном случае распределение показателя мутности на створе III) и двумя факторными признаками (мутность воды на створах I и II) показало высокую корреляцию ( $r_{3/1,2} = 0,58$ ). Таким образом, в отличие от фоновых условий, где основными внешними факторами, определяющими поведение взвеси в речных водах, являются гидрометеорологические явления, свойственные данному региону, в зоне загрязнения их роль уже менее значима. Наличие своеобразной цикличности в распределении взвешенных веществ в динамическом ряду наблюдений в существенной степени обуславливается дискретным (циклическим) режимом их поступления со сточными водами, сбрасываемых по руч. Черному.

Поступающий со сточными водами осадочный материал играет важную роль в формировании зон техногенного загрязнения в реке. Согласно [9], речной (водный) поток и его русло в отдельные периоды времени могут считаться динамически равновесной системой. Поступление значительных количеств твердых веществ в реку в зоне влияния города периодически приводит к существенному возрастанию мутности потока, к его перегрузке взвесью, что в конечном счете нарушает динамику равновесного обмена осадочным материалом между потоком и руслом. Вследствие этого на определенных участках реки, особенно в ближайшей зоне воздействия города, начинают преобладать процессы его осаждения, что приводит к формированию техногенных илов, обладающих специфическим химическим составом (табл. 3).

Таблица 3

**Петрохимический состав взвеси, техногенных илов и фонового аллювия, % [15, 30]**

Компонент	Взвесь		Техногенный ил, р. Пахра, 9 км ниже г. Подольска	Фоновый аллювий, р. Пахра	Средний состав взвеси рек умеренной и холодной зоны [39]	Средний состав взвеси рек мира [6]
	Створ I	Створ III				
SiO <sub>2</sub>	28,3	67,74	61,70	78,50	62,87	54,80
TiO <sub>2</sub>	0,40	0,67	0,38	0,48	0,82	0,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,50	9,47	8,63	4,52	13,58	15,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	7,36	4,33	4,90	2,62	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	6,40	7,28
MgO	2,32	1,84	0,66	1,26	2	2,07
CaO	8,14	3,90	6,08	3,17	6	3,52
Na <sub>2</sub> O	0,88	0,80	0,68	0,72	1,16	1,35
K <sub>2</sub> O	1,15	2,13	1,62	1,60	2,73	1,81
ППП *	41,00	8,00	10,88	2,16	–	–

\* Потери при прокаливании.

В устье руч. Черного формирование русловых отложений в существенной мере обусловлено гидравлическим осаждением поступающего техногенного осадочного материала, что связано с изменением скоростных характеристик потока сточных вод вследствие

подпора его речными водами [30]. Установлено, что в гранулометрическом спектре осадков сточных вод (ОСВ) г. Подольска доминирует фракция крупного алеврита (0,10–0,01 мм), поэтому, судя по всему, в составе техногенной взвеси ее содержание также велико, что находит отражение в гранулометрическом составе русловых отложений устьевой зоны руч. Черного, отличающихся высокими содержаниями данной фракции [35–37]. На участке р. Пахры ниже устья руч. Черного прослеживается зона активного накопления техногенных илов, отличающихся снижением доли крупного песка (до 6,7% против 17,6–28,5% на предыдущих участках) и заметным увеличением количества алевритовых и глинистых частиц. Согласно [3], в составе взвеси сточных вод промышленного города, сбрасываемых в водотоки, преобладают (до 87%) частицы размером больше 0,03 мм, а по данным [17], в ОСВ, образующихся на городских очистных сооружениях, доминируют (65–90%) частицы размером менее 0,15 мм. ОСВ г. Подольска также отличаются высоким содержанием глинистых (< 0,005 мм) и особенно мелкоалевритовых (0,10–0,01 мм) частиц. Все это, безусловно, и определяет повышенное содержание алевритовой и глинистой фракций в формирующихся на этом участке речного русла илах. Необходимо также отметить, что техногенный осадочный материал, поступающих в реки с канализационным стоком, активно участвует в формировании эпифитовзвеси – специфического компонента водной среды, играющего особую роль в формировании зон загрязнения, перераспределении поллютантов и трансформации их форм нахождения [25, 31, 34].

Согласно [4], главная особенность процесса осаждения транспортируемого речным потоком взвешенного материала связана с тем, что размер частиц основной массы взвеси меньше толщины так называемого вязкого подслоя, т. е. особой зоны потока, примыкающей к граничной поверхности трения (в данном случае к дну реки), которую еще называют «ламинарной пленкой», поскольку осредненное течение здесь считается вязким и сохраняет некоторые характерные признаки ламинарного течения. Соизмеримость размера частиц с толщиной вязкого подслоя определяет вязкое обтекание их потоком при осаждении на дно. Считается, что течение в вязком подслое носит выраженный перемежающийся характер, при котором периоды вязкого течения сменяются периодами его отчетливой завихренности с явными признаками стохастичности. Именно поэтому на заключительную фазу процесса осаждения осадочного материала определяющее влияние оказывают характеристики течения в пределах данного подслоя. В частности, в условиях вязкого течения турбулентная диффузия перестает играть роль фактора, поддерживающего равновесную концентрацию взвеси, и становится механизмом, поставляющим взвешенные вещества к верхней границе вязкого подслоя и таким образом способствующим их осаждению. Поверхностные когезионные силы сцепления, возникающие при сближении тонких оседающих частиц с донными отложениями, затрудняют их повторное взвешивание.

Техногенная взвесь, поступающая со сточными водами, характеризуется концентрациями тяжелых металлов, существенно превышающими их уровни в фоновой взвеси (табл. 4) и известные глобальные и региональные параметры распределения (табл. 5). Известно, что загрязнение речных вод тяжелыми металлами, связанное с взвешенными веществами, формируется двумя способами [29]. Во-первых, при увеличении мутности речных вод в результате поступления литогенных частиц, характеризующихся фоновыми уровнями содержания поллютантов. В этом случае происходит увеличение массы тяжелых металлов в единице объема воды (результаты анализов выражаются, например, в мг/л), что при исследовании и фиксируется как загрязнение, хотя весовые (удельные) концентрации поллютантов во взвеси часто не выходят за пределы фона. Во-вторых, при поступлении в воды техногенных частиц с высокими удельными концентрациями (результаты выражаются в мг/кг) в них металлов. В данном случае увеличение массы поллютантов в единице объема воды происходит преимущественно за счет их высоких концентраций непосредственно во взвеси (в осадочном материале), а не за счет увеличения мутности воды. Обычно наиболее резко техногенные аномалии тяжелых металлов и других химиче-

ских элементов проявляются при поступлении в реки значительных количеств взвеси, обогащенной ими.

Таблица 4

Тяжелые металлы в твердом взвешенном веществе [29]				
Металл	Среднее и его ошибка, мг/кг	V	R	K <sub>c</sub>
Створ I				
Хром	687,79 ± 123,89	52	320	2,2
Никель	556,59 ± 90,34	47	240	4,8
Медь	1587,60 ± 346,90	63	352	8,8
Цинк	1637,00 ± 317,80	56	338	2,6
Кадмий	74,13 ± 16,18	63	313	9,9
Ртуть	11,56 ± 2,71	68	214	170,0
Свинец	887,13 ± 177,90	58	337	3,4
Створ II				
Хром	497,50 ± 134,90	78	342	1,6
Никель	302,20 ± 83,50	80	284	2,6
Медь	773,03 ± 272,62	102	465	4,3
Цинк	1173,50 ± 247,40	61	569	1,9
Кадмий	34,31 ± 11,82	99	539	4,6
Ртуть	3,36 ± 1,32	114	470	49,4
Свинец	630,70 ± 26,55	122	672	2,4
Створ III				
Хром	451,70 ± 101,80	65	272	1,5
Никель	225,30 ± 36,80	47	239	1,9
Медь	501,70 ± 88,68	51	196	2,8
Цинк	922,60 ± 174,30	55	220	1,5
Кадмий	25,47 ± 7,00	79	393	3,4
Ртуть	1,74 ± 0,89	148	800	25,6
Свинец	378,60 ± 74,62	57	226	1,5

Таблица 5

Тяжелые металлы в техногенной взвеси и твердом взвешенном веществе различных рек								
Металл, мг/кг	Техногенная взвесь, створ 1	Реки мира				Реки Европы [41]	Сев. Двина [20]	Бассейн р. Уссури [19]
		[40]	[41]	[14]	[6]			
Хром	687,79	100	130	85	130	164	88,5	136,5
Никель	556,59	90	74,5	50	84	66	50,6	26,3
Медь	1587,60	100	75,9	45	80	172	27,4	16,7
Цинк	1637,00	250	208	130	31	346	150	128,6
Кадмий	74,13	–	1,55	0,5	0,7	–	0,62	0,442
Ртуть	11,56	–	–	0,077	–	–	–	–
Свинец	887,13	100	61,1	25	147	71	25,7	18,5

В динамическом ряду наблюдения удельное распределение тяжелых металлов во взвеси отличается высокой изменчивостью, которая особенно резко проявляется в зоне смешения сточных и речных вод (рис. 2). Вниз от источника загрязнения практически для всех металлов наблюдается определенная идентичность в характере изменения их концентраций во взвеси. Наиболее интенсивное снижение уровней тяжелых металлов во взвеси происходит на первых 8–10 км ниже створа полного смешения сточных и речных вод. Очевидно, именно здесь особенно активны процессы выведения из потока техногенной взвеси и поступления в водную толщу природных литогенных частиц, поскольку мутность речной воды в целом слабо меняется вниз по потоку. Ниже по течению реки для валовых концентраций металлов во взвеси характерно постепенное снижение их значений,



нередко до фоновых уровней. Качественный состав геохимических ассоциаций, свойственных техногенным илам, закономерно близок составу ассоциации осадков сточных вод, образующих на городских очистных сооружениях в ходе очистки поступающих стоков (табл. 6). Установлено, что увеличение содержания тонких частиц в составе взвеси, характерное для зон техногенного загрязнения, приводит к возникновению особых динамических эффектов в зоне контакта воды с поверхностью частиц [4], что, в частности, способствует высвобождению химических элементов и их соединений из твердых взвешенных веществ в водную фазу.

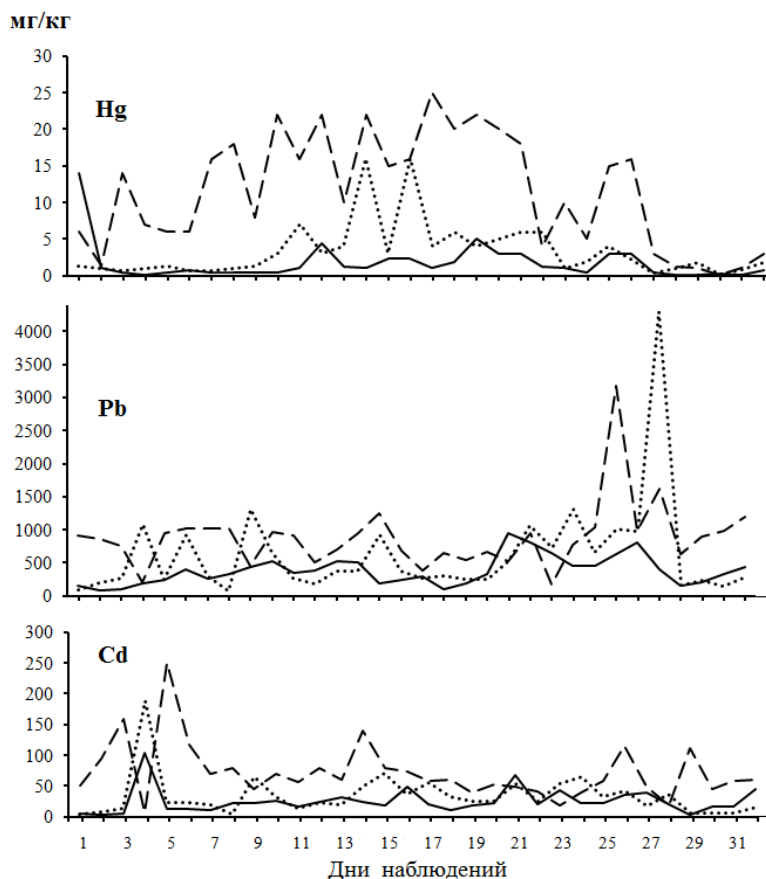


Рис. 2. Распределение удельных концентраций тяжелых металлов в взвешенном веществе на створах I (пунктир), II (точки) и III (сплошная линия).

Таблица 6

**Геохимические ассоциации в осадках сточных вод (ОСВ) г. Подольска и техногенных илах (ТИ) руч. Черного**

Компонент	Порядок значения $K_C$ элементов относительно фона в отложениях р. Пахры				
	>100	100–30	30–10	10–3	3–1,5
ОСВ [2]	Cd-Ag	Pb-Sn-Cu	In-Ni-Hg-Bi-Cr-Zn-W-Sb	Sr-Be-Mo	As-Co-Mn-Ba
ТИ [23, 26]	Hg-Ag	Cd-In	Cu-Ni-Pb-Sn-Sb-Se	V-Zn-Cr-Nb-P-W-As-Bi-Sr-Ba	Co-Be-Mo-Sc-F-Y

В поступающем с канализационным стоком взвешенном веществе (в техногенной взвеси) для тяжелых металлов характерны значимые количества их легкоподвижных (сорбционно-карбонатных) и относительно подвижных (органических и оксидных) минералого-геохимических форм нахождения (табл. 7). Это определяет потенциальную миграционную способность металлов и возможность последующего преобразования их форм нахождения в речной среде.

**Формы нахождения тяжелых металлов во взвешенном веществе  
(створ 1, устье руч. Черного) [29]**

Ме- талл	Вал, мг/кг	Сорбционно- карбонатные		Органические		Оксидные		Кристалличе- ские		Силикатные	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Ni	425	172,1	40,5	63,3	14,9	65,5	14,7	54,4	12,8	72,7	17,1
Cu	1386	43	3,1	223,2	16,1	313,2	22,6	731,8	52,8	74,8	5,4
Cd	78,3	57,1	72,9	2,7	3,5	10,3	13,1	4,8	5,2	3,4	4,3
Pb	1023	81,8	8	68,6	6,7	308,9	30,2	509,5	49,8	54,2	5,3

Примечание. 1 – абсолютная концентрация, мг/кг; 2 – доля формы от вала, %; приведены средние значения за 30-дневный период наблюдения.

Таким образом, в летнюю межень в фоновых (природных) условиях взвешенные в речной воде вещества отличаются однородным распределением во времени, их поведение контролируется преимущественно гидрометеорологическими факторами, а средняя удельная концентрация взвеси соотносится с зональными показателями. Техногенная поставка взвешенных наносов характеризуется выраженным во времени дискретным характером и осуществляется в количествах, существенно превышающих их зональный модуль стока. Участие в седиментогенезе значительных масс осадочного материала, поступающего в реку со сточными водами, отражается на режиме стока взвешенных наносов и на процессах аллювиального осадконакопления. Особенности распределения взвешенных веществ в динамическом ряду наблюдений, проявляющиеся в высокой вариации их концентраций, определяются спецификой функционирования очистных сооружений, дискретным режимом поступления осадочного материала со сточными водами, кратностью разбавления последних речными водами, а также процессами ускоренной седиментации грубых частиц, обладающих высокой гидравлической крупностью. Техногенный осадочный материал, поступающий в малую реку со сточными водами, характеризуется специфическим петрохимическим составом, высокими концентрациями тяжелых металлов и других химических элементов, существенными количествами их геохимически подвижных форм нахождения и обуславливает формирование в реках техногенных илов – нового типа современных русловых отложений, во многом определяющих современное экологическое состояние водотоков в зоне влияния промышленных городов.

## Литература

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 202 с.
2. Ачкасов А.И. Распределение микроэлементов в агроландшафтах Московской области: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. – М., 1987. – 25 с.
3. Баранова А.Г., Бикунова М.В., Каледда И.А. К вопросу определения содержания в городских сточных водах тонкой взвеси // Тез. докл. обл. конф. «Повышение эффективности работы предприятий водоочистки и водоотведения». – Куйбышев, 1990, с. 13–14.
4. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 286 с.
5. Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеоздат. 1988. – 248 с.
6. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Средний химический состав взвесей рек Мира и питание океанов речным осадочным материалом // ДАН СССР, 1978, 238, № 1, с. 225–228.
7. Кендэл М. Временные ряды: Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
8. Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. – М.: Наука, 1978. – 264 с.

9. *Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.* Русловые процессы. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
10. *Общая гидрология (гидрология суши).* – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 422 с.
11. *Павлов А.П.* Избранные сочинения. Вып. 1. – М.: Изд-во МОИН, 1948. – 216 с.
12. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Верхне-Волжский район.* Т. 10. Кн. 1. – М.: Гидрометеоиздат, 1973. – 476 с.
13. *Розанов Л.Л.* Теоретические основы геотехноморфологии. – М.: ИГРАН СССР, 1990. – 189 с.
14. *Савенко В.С.* Химический состав взвешенных наносов рек мира. – М.: ГЕОС, 2006. – 174 с.
15. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
16. *Сток наносов. Его изучение и географическое распределение.* – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 240 с.
17. *Туровский И.С.* Обработка осадков сточных вод. – М.: Стройиздат, 1988. – 256 с.
18. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 608 с.
19. *Чудаева В.А., Чудаев О.В.* Особенности химического состава воды и взвесей рек Приморья (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 2, с. 102–119.
20. *Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С. и др.* Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря) // Доклады РАН, 2010, т. 430, № 5, с. 686–692.
21. *Янин Е.П.* Особенности формирования стока взвешенных наносов малых рек в условиях техногенеза // Выявление зон загрязнения окружающей среды токсичными химическими элементами. – Челябинск: УДНТП, 1984, с. 19–20.
22. *Янин Е.П.* Геохимические закономерности формирования антропогенных потоков рассеяния химических элементов в малых реках: Автореф. дис... канд. геол.-мин. н. – М., 1985. – 25 с.
23. *Янин Е.П.* Техногенные потоки рассеяния химических элементов в донных отложениях поверхностных водотоков // Советская геология, 1988, № 10, с. 101–109.
24. *Янин Е.П.* Геохимические особенности и экологическое значение техногенных илов // Разведка и охрана недр, 1994, № 5, с. 35–37.
25. *Янин Е.П.* Эпифитовзвесь – индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами // Водные ресурсы, 1999, т. 26, № 6, с. 731–734.
26. *Янин Е.П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.
27. *Янин Е.П.* Источники и пути поступления загрязняющих веществ в реки промышленно-урбанизированных районов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2002, № 6, с. 2–56.
28. *Янин Е.П.* Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 100 с.
29. *Янин Е.П.* Тяжелые металлы в малой реке в зоне влияния промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 2003. – 89 с.
30. *Янин Е.П.* Техногенные илы в реках Московской области (геохимические особенности и экологическая оценка). – М.: ИМГРЭ, 2004. – 95 с.
31. *Янин Е.П.* Использование эпифитовзвеси для выявления и оценки техногенного загрязнения рек химическими элементами // Экологические системы и приборы, 2005, № 11, с. 15–22.
32. *Янин Е.П.* Общие условия и основные факторы формирования водного стока в городских ландшафтах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2006, № 9, с. 73–111.

33. Янин Е.П. Поверхностный сток с городских территорий как источник загрязнения речных систем // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2007, № 4, с. 2–104.
34. Янин Е.П. Экологическая роль и биогеохимические особенности речной эпифитовзвеси в условиях техногенного загрязнения // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2008, № 6, с. 2–14.
35. Янин Е.П. Роль техногенеза в формировании гранулометрического состава речных отложений // Экологические системы и приборы», 2009, № 5, с. 32–37.
36. Янин Е.П. Особенности гранулометрического состава русловых отложений малой реки в зоне влияния промышленного города // Известия вузов. Геология и разведка, 2009, № 3, с. 69–74.
37. Янин Е.П. Гранулометрический состав донных отложений реки Пахры в зоне влияния города Подольска // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2009, № 9, с. 56–61.
38. Connell Des W., Miller G.J. Chemistry and ecotoxicology of pollution. – N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1984. – 423 p.
39. Martin J.M., Meybeck M. The content of mayor elements in the dissolved and particulate load of river // Biogeochemistry of estuarine sediments. – Paris: UNESCO, 1978, p. 95–110.
40. Martin J.M., Meybeck M. Elemental mass balance of material carried by major world rivers // Mar. Chem., 1979, v.7, p. 173–206.
41. Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // Science of the Total Environment, 2009, v. 407, p. 853–868.