

# ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА ВОД СУШИ, МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

УДК 502.51

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ РЕЧНЫХ ИЛОВ

К.г.-м. н. **Е.П. Янин**

(Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва  
yanin@geokhi.ru)

*В работе приводятся основные результаты многолетнего изучения вещественного состава, геохимических особенностей, условий и процессов формирования техногенных речных илов – нового вида современных речных отложений, образующихся в реках в зонах влияния различных источников загрязнения, определяющих важнейшие экологические особенности водных систем и являющихся источниками вторичного загрязнения водной массы и гидробионтов.*

В современном представлении образование осадочных пород – литогенез (осадочный петрогенез) – включает ряд последовательно сменяющих друг друга стадий: гипергенез (выветривание, дезинтеграция исходных пород) – седиментогенез (перенос и последующее накопление осадочного материала на водосборных территориях суши и в бассейнах седиментации) – диагенез (физико-химическое изменение насыщенных водой отложений и превращение их в осадочную горную породу). Однако процессы литогенеза настолько сложны и многообразны, что выделяемые его эволюционные стадии, в свою очередь включающие самостоятельные этапы, в большинстве случаев не имеют строгих пространственно-временных границ и на разных участках земной поверхности и в разных физико-географических условиях приобретают свою специфику, а осадочное породообразование происходит практически на всех стадиях литогенеза. Собственно седиментогенез (т. е. образование рыхлых отложений) справедливо рассматривается как важнейший процесс естественной динамики поверхности Земли. Он проявляется буквально на всей поверхности нашей планеты и по сути является глобальным геохимическим процессом, с которым связана дифференциация осадочного материала и миграция химических элементов. Характеристики конечных продуктов седиментогенеза в существенной мере зависят от источников поступления, вещественного состава осадочного материала, участвующего в осадкообразовании, и геохимических условий среды осадконакопления.

В техногенных ландшафтах в седиментогенезе участвуют значительные массы материала, появление которого в осадочном цикле связано с хозяйственной деятельностью человека. Это обуславливает накопление в областях транзита и аккумуляции своеобразных по морфологии, составу и свойствам осадочных образований (техногенных отложений), до недавнего времени в природе не существовавших, процессы формирования которых в отечественной литературе получили название техногенного глиптогенеза, антропогенного литогенеза, искусственного литогенеза, технолитогенеза, техноседиментогенеза. Указанные процессы – про-

цессы техногенного литогенеза (техногенного осадочного петрогенеза) – ярко проявляются в городах, промышленно-урбанизированных и горнопромышленных районах, а также (в несколько меньшей степени) в сельскохозяйственных ландшафтах. Здесь активно происходит образование техногенных отложений, которые концентрируют значительные количества различных химических элементов и являются источниками их вторичного рассеяния, что в конечном счете меняет, говоря словами В.И. Вернадского, «вечный бег геохимических циклов» и часто порождает негативные (с утилитарной и общеэкологической точек зрения) проблемы, непосредственно отражается на процессах аллювиального седиментогенеза и приводит к формированию в реках хозяйственно освоенных районов нового вида (прежде всего, русловых) отложений – техногенных илов, которые резко отличаются от фонового руслового аллювия морфологическим обликом, вещественным составом, физико-химическими свойствами и геохимическими характеристиками. В существенной мере это 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 осадочного (техногенного) материала.

В предлагаемой работе систематизированы результаты многолетнего изучения техногенных речных илов, образующихся в руслах поверхностных водотоков в зонах влияния различных по своему характеру и масштабам воздействия источников загрязнения. Они сводятся к следующим основным положениям.

В природных условиях формирование, морфологическое проявление и вещественный (гранулометрический, минеральный, химический) состав руслового аллювия во многом обусловлены направленностью и интенсивностью эрозионно-аккумулятивных процессов, протекающих в пределах водосборного бассейна и непосредственно в руслах и долинах рек и обуславливающих поступление в водный поток осадочного материала, основными источниками которого являются почвы и горные породы [9, 15, 17, 28]. Конечный результат сопряженного действия указанных процессов, проявляющийся в накоплении аллювиальных отложений, образующих в реках закономерно построенный и достаточно сложный морфологический комплекс, существенно зависит от гидравлических характеристик потока, а также от гидрологического режима водотоков, который, в свою очередь, определяется взаимодействием факторов, прямо или косвенно влияющих на формирование речного стока. Для формирования вещественного состава фонового руслового аллювия и его пространственного преобразования особенно важное значение имеют механическая дифференциация и фракционирование транспортируемого водным потоком осадочного материала, физико-химические и гидрохимические параметры среды аллювиального осадконакопления, факторы и процессы, определяющие преобразование осадочного материала и поведение химических элементов и их соединений в водной толще и донных отложениях. Русловой аллювий равнинных рек обычно представлен литогенной фацией, являющейся результатом преимущественно механического накопления в речных руслах природного осадочного материала, важнейшие литологические, минералогические и геохимические характеристики которого предопределяются особенностями геологического строения и растительно-почвенного покрова водосборных территорий. Практически повсеместно наблюдается довольно ограниченный набор петрографических типов русловых отложений, представленных в основном песчаными и песчано-алевритовыми разностями, для которых характерно преоб-

ладание мономинеральных кварцевых песков с высокой степенью дифференциации осадочного материала, повышенными содержаниями кремния и пониженными количествами глинозема, железа и ряда других компонентов. Уровни содержания химических элементов (микроэлементов, тяжелых металлов, редких и рассеянных элементов) в фоновом русловом аллювии равнинных рек, как правило, находятся в пределах глобальных параметров их распределения в осадочных породах и литосфере. Несколько повышенные концентрации химических элементов характерны для относительно редко встречающихся в природных условиях речных илов. Химический состав горного аллювия, образующегося в природных условиях, также отражает состав коренных пород и почв водосборов и (при отсутствии рудных тел и зон минерализации в пределах водосборных территорий и речных долин) близок к глобальным геохимическим показателям (к составу осадочных пород и кларкам литосферы). В горнорудных районах в отложениях временных и постоянных водотоков нередко формируются геохимические потоки рассеяния, отличающиеся концентрациями химических элементов, которые могут заметно превышать их региональный фон и глобальные показатели распространенности. Качественный состав ассоциаций химических элементов, накапливающихся в аллювии, обычно неплохо коррелирует с элементным составом дренируемых месторождений полезных ископаемых.

В хозяйственно освоенных районах (в техногенных ландшафтах) в аллювиальном седиментогенезе участвует не только природный осадочный материал, но и значительные массы техногенного осадочного материала, появление которого в осадочном цикле связано с хозяйственной деятельностью человека [1, 4, 13, 14, 20, 21, 24, 25, 28, 30]. Техногенное поступление химических веществ и осадочного материала в поверхностные водотоки обычно существенно превышает их природную поставку, характерную для данной ландшафтной зоны (для данного водосборного бассейна). Модули твердого стока в таких районах возрастают (по сравнению с местными и зональными значениями) на один-два порядка (и даже больше), при этом техногенный осадочный материал характеризуется специфическим вещественным (гранулометрическим, минеральным, химическим) составом и высокими концентрациями разнообразных химических элементов, их неорганических и неорганических соединений.

Формирование водного стока в техногенных ландшафтах определяется их гидрологическими особенностями, являющимися отражением специфики водного баланса хозяйственно освоенных территорий, в свою очередь обусловленной климатическими факторами, своеобразием условий формирования и режима поверхностного, грунтового и подземного стока, а также масштабами водопотребления и отведения различных сточных вод [1, 4, 6, 28]. Важнейшей особенностью таких районов является вовлечение во влагооборот на сравнительно небольших территориях значительных объемов воды, которая, после ее использования на хозяйственные нужды, приобретает иные физико-химические свойства, содержит огромные массы техногенного осадочного материала и, как правило, сбрасывается в гидрографическую сеть. Здесь существуют две основные группы источников загрязнения, определяющих способы поставки осадочного материала и загрязняющих веществ в реки. Первую группу составляют точечные источники, осуществляющие сброс сточных вод в водотоки по системам канализации (канализационный сток). В большинстве городов и промышленно-урбанизированных районов таким источником являются общегородские очистные сооружения, принимающие бытовые и производственные сточные воды, которые после очистки сбрасы-

ваются в водные объекты (общегородской канализационный сток). Определенное количество сточных вод непосредственно поступает в водотоки с заводских локальных очистных сооружений (локальный канализационный сток). Вторая группа объединяет неточечные (площадные) источники загрязнения: сток с освоенных территории талых, дождевых, поливочных и оросительных вод, внутрипочвенный сток и грунтовый сток (поверхностный сток с освоенных территорий). Качественные и количественные характеристики канализационного стока зависят от размеров города (численности населения), особенностей его промышленной инфраструктуры, используемых систем сбора, очистки и отведения образующихся в его пределах сточных вод. Качественные и количественные параметры поверхностного стока в существенной мере определяются гидрологическими особенностями города (промышленного района), его размерами, благоустроенностью, а также зависят от интенсивности поступления загрязняющих веществ на подстилающую поверхность и ее характеристик, в свою очередь обусловленных степенью очистки промышленных выбросов, существующими системами сбора отходов и уборки городских территорий. В некоторых городах определенное значение имеют снеготопка, разгрузка в водотоки загрязненных подземных вод и водный транспорт. Непосредственная поставка загрязняющих веществ в реки с атмосферными выпадениями обычно незначительна, но она играет важную роль в формировании качественного состава поверхностного стока.

Современное сельскохозяйственное производство является источником поставки (со сточными водами, поверхностным и грунтовым стоком, отходами) в водотоки довольно обширной группы загрязняющих веществ, включающей химические элементы (тяжелые металлы, редкие и рассеянные элементы, микроэлементы) и их соединения, биогенные элементы, главные ионы, органические вещества [4, 23, 28]. Агрорландшафты нередко отличаются развитием ускоренной эрозии, что определяет поступление в водотоки значительных масс осадочного материала и оказывает заметное влияние на процессы формирования русловых отложений. Химические элементы, присутствующие в жидкой и твердой части сточных вод и поверхностного стока с сельскохозяйственных территорий, в конечном счете поступают в водотоки и накапливаются в донных отложениях. Наиболее важным с рассматриваемой точки зрения является массовое применение в агрорландшафтах минеральных удобрений, особенно фосфорных. Воздействие животноводства и использование нестандартных агропестицидов обычно характеризуется выраженным локальным характером, но, как правило, проявляется в формировании в реках достаточно интенсивных по уровням содержания загрязняющих веществ зон загрязнения. В целом к известной для агрорландшафтов группе загрязняющих веществ (соединения азота и фосфора, пестициды, хлориды, натрий, марганец, медь, цинк, кадмий) следует добавить такие элементы, как серебро, ртуть, селен, мышьяк, олово, молибден, скандий.

Масштабы поставки осадочного материала и, соответственно, техногенного воздействия на окружающую среду в горнорудных районах настолько велики, что всецело определяют характер проявления в водотоках процессов аллювиального осадконакопления и многие их геохимические особенности [3, 4, 9, 28]. В потенциале любое рудное месторождение представляет собой комплексный источник загрязнения окружающей среды, что связано с присутствием повышенных концентраций широкой ассоциации химических элементов в добываемых и перерабатываемых рудах, а также в отходах производства, составляющих до 98% извлекаемой горной массы. Основными источниками загрязняющих веществ являются

руды и первичные ореолы, причем пространственные размеры последних и количество (масса) заключенных в них химических элементов обычно превышают параметры рудных тел, вокруг которых они образуются. Техногенные процессы проявляются уже на стадиях поисков и разведки месторождений и особенно интенсифицируются при их эксплуатации и при переработке минерального сырья. Для техногенных миграционных цепей, где распространение поллютантов происходит при образовании отходов, стоков и выбросов, интенсивность загрязнения во многом определяется типом месторождения, его минералого-геохимическими особенностями, связана с принятой системой добычи, обогащения и переработки минерального сырья и во многом обусловлена объемами и составом извлекаемых горных пород и руд, объемами и качеством очистки сточных вод, промышленных выбросов, объемами, способами обработки и особенностями хранения твердых отходов, а также зависит от характеристик местных ландшафтов. На ранних стадиях освоения месторождения состав химического загрязнения, как правило, в целом соответствует геохимической специализации территории. По мере увеличения степени освоения месторождения интенсивность техногенного воздействия увеличивается, а качественный состав загрязнения может резко меняться. Наиболее экологически опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому увеличению мощности зоны гипергенеза и изменению условий миграции загрязняющих веществ. В образовании техногенных геохимических аномалий существенную роль играют пылевые выбросы в атмосферу, отвалы горных пород и хвостохранилища, определяющие состав поверхностного (талого и дождевого) стока с территории горнорудных районов и особенности поступающего в водоотки осадочного материала.

Техногенное воздействие обуславливает формирование своеобразной среды аллювиального осадконакопления [5, 8, 10, 22, 28]. Поверхностные воды в техногенных ландшафтах отличаются повышенными (нередко очень высокими) содержаниями главных ионов и нарушением (свойственного фоновым условиям) количественного соотношения между ними. Увеличение содержания главных ионов приводит к росту минерализации речных вод. Повсеместно наблюдается переход наиболее распространенных и(или) типичных для данного природного региона вод со средней минерализацией в воды с повышенной и даже с высокой минерализацией (т. е. в солоноватые воды). Появляются очень редко встречающиеся в природе поверхностные гидрокарбонатные воды (часто с концентрацией гидрокарбонатов > 250 мг/л) с минерализацией более 1000 мг/л, а также воды с минерализацией более 10000 мг/л и содержанием  $\text{HCO}_3^- < 10$  мг/л при значительном преобладании концентраций натрия и калия. В составе вод уже заметно доминируют натрий, сульфаты, хлориды. Еще более значительный рост содержаний (по сравнению с естественными условиями) наблюдается для соединений биогенных элементов, а также органических веществ. Изменение режима главных ионов сопровождается преобразованием исходного (зонального) химического состава речных вод, что обуславливает резко выраженную пространственную мозаичность геохимического облика водоотоков («гидрохимическую пестроту»), когда в пределах относительно однородного в ландшафтно-геохимическом отношении сравнительно небольшого по площади участка водосборного бассейна возможно одновременное существование речных вод разного химического класса, вида и типа. Загрязненные речные воды отличаются высоким общим содержанием разнообразных органических веществ и высокой мутностью. Для зон техногенного загрязнения типично развитие термофикации вод; характерна в основном слабо-

щелочная среда, но залповые сбросы сточных вод, половодья и паводки могут сопровождаться заметными изменениями показателя pH. Важнейшей особенностью речных вод в зонах техногенного воздействия является значительное увеличение в них концентраций многих химических элементов (тяжелых металлов, микроэлементов, редких и рассеянных элементов). Для ряда элементов отмечается существенное (по сравнению с фоновыми условиями) возрастание количества (удельного и относительного) взвешенных форм миграции, что обусловлено как повышенной мутностью речных вод, так и (особенно) резким ростом удельных концентраций элементов в речной взвеси в зонах техногенного загрязнения. Для состава речных вод в зонах загрязнения характерна резкая неоднородность распределения содержаний элементов и их соединений, проявляющаяся как в пространственном, так и во временном (в интервалах наблюдения «часы-сутки-сезон») аспектах. Неоднородность распределения элементов проявляется также в динамичном (в пространственно-временном аспекте) характере соотношения их взвешенных и растворенных форм миграции, в варьировании относительной доли основных форм нахождения металлов в речной взвеси и в растворе речных вод. Это создает пространственно-временную физико-химическую пестроту (гидрохимическую мозаичность) речных вод и, соответственно, динамичный, изменчивый характер геохимических условий аллювиальной обстановки осадконакопления.

В летнюю межень в природных (фоновых) 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 [4, 22, 28]. 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 во многом обуславливает формирование в реках техногенных илов. Поступающая в водотоки в составе сточных вод техногенная взвесь особенно активно выводится из водного потока в результате гидравлического осаждения, особенно на ближних к источнику загрязнения участках речного русла. В целом геохимические условия аллювиальной среды техногенного осадконакопления благоприятны для развития процессов сорбции, коагуляции, соосаждения, играющих важную роль в выведении химических элементов и их соединений из миграционного потока и в формировании вещественного состава донных отложений.

Весеннее половодье в техногенных условиях приводит к заметным изменениям в распределении как валовых, так и парциальных концентраций многих химических элементов [22]. Однако уровень техногенного загрязнения речных вод по-

прежнему достаточно высок и обусловлен как сбросом сточных вод в реку, так и поступлением поверхностного (талого) стока, особенно с территории городов и промышленных предприятий. Интенсивность проявления техногенных геохимических аномалий тяжелых металлов во взвешенных формах контролируется не только их повышенными концентрациями во взвеси, но и заметно увеличенной в этот период мутностью речных вод. Тем не менее для многих химических элементов важными внешними факторами, обуславливающими их поведение в речных водах, являются режим поставки и химический состав сточных вод, сбрасываемых в реку с общегородских очистных сооружений.

Поступление в реки значительных объемов техногенного осадочного материала резко отражается на процессах аллювиального седиментогенеза и приводит к формированию в реках (особенно в их руслах) освоенных районов нового вида отложений – техногенных речных илов, важнейшими морфологическими свойствами которых, обладающих в местах своего наибольшего накопления определенной и нередко достаточно выраженной стратификацией, обусловленной условиями их накопления и вторичными преобразованиями, являются темно-серый или черный цвет, специфический (химический, фекальный, иногда сероводородный) запах, преимущественно вязкотекучая или мягкопластичная консистенция, высокие содержания тонких (алеврито-илистых) частиц и органического вещества [6, 7, 8, 17, 26]. Указанные свойства относительно стабильны как в толще илов, вертикальная мощность которых изменяется от 0,2–0,5 до 2–3,5 м, так и на значительной протяженности (многие десятки километров) русла. Нередко накопление техногенных илов предопределяется благоприятными геоморфологическими условиями (расширение речной долины, формирование широкопойменного русла, наличие многочисленных меандр, выполаживание продольного профиля русла), развитием зарослей макрофитов, невысокой скоростью течения в меженные периоды и гидротехническими сооружениями (плотины, мостовые переходы и т. п.). Техногенные илы резко отличаются от природного (фонового) руслового аллювия морфологическим обликом, вещественным составом, физико-химическими и геохимическими свойствами.

Фоновый аллювий равнинных рек обычно представляет собой преимущественно разно-зернистый (чаще средне- и мелкозернистый) песок с включениями гравия и гальки и малым содержанием алевритовых и глинистых фракций и характеризуется относительно неплохой сортировкой слагающих его частиц [17, 26, 28]. Доля песчаных фракций в фоновом аллювии достигает 80–95%, глинистых частиц – 0,6–3%. Основные морфометрические характеристики и показатели фонового аллювия (медианный диаметр, средний арифметический диаметр, коэффициенты сортировки, асимметрии и глинистости) близки зональным значениям, свойственным данному природному региону. В зонах техногенного загрязнения в руслах рек формируются отложения, представляющие собой (с точки зрения granulометрии) песчаные или мелко-алевритовые (иногда крупно-алевритовые) илы, отличающиеся плохой сортировкой слагающих их частиц [6, 17, 26–28]. Доля песчаных фракций в техногенных илах снижается до 40–60%, алевритовых – увеличивается до 25–50%, глинистых – до 8–26%. Своими основными морфометрическими характеристиками и показателями (медианный диаметр, средний арифметический диаметр, коэффициенты сортировки, асимметрии и глинистости) техногенные илы резко отличаются от фонового руслового аллювия. Если средний (медианный) размер частиц фонового аллювия изменяется, как правило, в пределах 0,1–0,2 мм, то средний (медианный) размер частиц, слагающих техно-

генные илы, составляет 0,015–0,078 мм. Характерной особенностью гранулометрического состава техногенных илов является резкое увеличение количества частиц, отвечающих размерности физической глины, – до 10–31% (против 1–3,5% в фоновом аллювии), что во многом определяет важнейшие физические свойства илов (их пластичность, липкость, связность, способность удерживать влагу и химические вещества), а также позволяет (по содержанию физической глины) достаточно четко оконтурить зону техногенного загрязнения в водотоках. Гранулометрический состав техногенных илов во многом отражает особенности состава осадков сточных вод, образующихся на городских очистных сооружениях, – основном источнике поступления техногенного осадочного материала в реки городских и промышленно-урбанизированных районов. По мере удаления от источника загрязнения в техногенных илах отмечается общее снижение содержания тонких фракций (алеврита и глины) и обогащение нижних слое (в сравнении с верхними) песчаными и обеднение глинистыми и алевритовыми частицами, что является следствием дифференциации транспортируемого водным потоком осадочного материала, его переотложения, более активным вовлечением в русловой перенос тонких фракций наносов. С инженерно-геологической точки зрения фоновый русловой аллювий относится к несвязанным грунтам; техногенные илы обычно представляют собой связанные грунты. Отличаясь высоким количеством илесто-глинистых частиц (особенно физической глины) и органических веществ, они обладают повышенной устойчивостью к размыву, формируют различные формы руслового рельефа и тем самым влияют на ход руслового процесса и динамику речного русла.

Минеральный состав фонового руслового аллювия близок к составу пород питающих и терригенно-минеральных провинций [15, 26, 28]. Влияние других факторов (неотектоники, миграционной способности минералов, гранулометрического состава отложений и т. д.) осуществляется на фоне того качественного и количественного наборов минералов, которые определяются материнскими (питающими) породами. Обычно в природных условиях в пределах единой питающей провинции не отмечается резких пространственных изменений минерального состава руслового аллювия. Как правило, наблюдаемые изменения его качественного и количественного состава не существенны и не приводят к кардинальному изменению свойственных данной реке (данному речному бассейну) минеральных ассоциаций. В зонах техногенного загрязнения основные изменения минерального состава современных русловых отложений равнинных рек проявляются в нарушении характерных для фоновой аллювия количественных соотношений ассоциирующих друг с другом в природных условиях минералов [26, 28]. Степень указанного изменения существенно возрастает с увеличением интенсивности техногенного воздействия (в ряду «фон – сельскохозяйственный район – город – свалка отходов»), что обусловлено увеличением темпов и объемов поступления техногенного осадочного материала в водотоки, а также своеобразием условий среды техногенного осадконакопления. В легкой фракции русловых отложений (техногенных илов) наблюдается (в указанном выше ряду) направленное снижение содержания основных породообразующих минералов – кварца и полевых шпатов, измененных минералов, обломков пород, микроклина и отмечается значительный рост количества минеральных новообразований (карбонатных минералов, лимонитизированных обломков), а также заметное увеличение содержания аутигенного глауконита и кислых (Na–Ca) плагиоклазов, фиксируется появление хлорита, мусковита, халцедоновых обломков, вулканического основного и кисло-

го стекла. В тяжелой фракции илов происходит существенное увеличение содержания гидроксидов железа и заметное снижение количества эпидота. Отмечается также направленное увеличение суммарного количества минералов, обладающих выраженной магнитной восприимчивостью. В техногенных илах встречаются такие минералы, как портландит, муллит, пирит-марказит, апатит, дистен, типичные для различных отходов и выбросов (угольной золы, промышленной пыли, промышленных шламов, осадков сточных вод и др.), а также асбест [11, 27]. Содержание глинистых минералов в техногенных илах достигает 0,2–3,4%, тогда как в фоновом аллювии их не более 0,1%. Техногенные илы отличаются более высокими содержаниями таких устойчивых в зоне гипергенеза акцессорных минералов, как ставролит, дистен, рутил, анатаз, турмалин (суммарно 18–21% против 14% в фоновом аллювии), что отражается в росте коэффициента устойчивости (с 0,6 до 1,5–2); в илах фиксируется заметное снижение доли минералов низкой гидродинамической устойчивости (с 48% до 22–32%) и минералов низкой миграционной способности (с 5% до 3–4%) [26, 28]. Техногенные илы характеризуются присутствием значительного количества аморфного (рентгеноаморфного) вещества, содержание которого достигает 30% и более, тогда как в фоновом аллювии оно не превышает 10–11%. Аморфное вещество, присутствующее в илах, играет важную геохимическую роль, существенно увеличивая их коллоидальную активность, набухание, липкость, гидрофильность. Если фоновый аллювий характеризуется средней химической зрелостью, то техногенные илы (как молодые осадочные образования, находящиеся в стадии активного постседиментационного преобразования) отличаются низкой химической зрелостью. Определенную роль в формировании морфологического облика и вещественного состава речных отложений в зонах техногенного загрязнения играют искусственные материалы и частицы, поступающие в водотоки с поверхностным стоком, сточными водами и отходами. В исключительных случаях в руслах загрязненных рек формируются седиментиты, представляющие собой своеобразные техногенные осадочные породы. Минералогические особенности техногенных илов во многом обуславливают своеобразие их химического состава, а высокие содержания в них аморфного вещества, карбонатных минералов, гидроксидов железа, других новообразований, аутигенных и глинистых минералов предопределяют потенциальные вторичные преобразования илов и поведение связанных с ними химических элементов (особенно тяжелых металлов).

Фоновый аллювий, длительное время находящийся в метастабильных условиях зоны окисления, с геохимической точки зрения представляет собой зрелые, относительно устойчивые осадочные образования, которые характеризуются более высокой степенью дифференциации слагающего их материала [15, 17, 28]. Его петрохимический состав закономерно близок составу четвертичных отложений и почв, слагающих водосборные бассейны, что проявляется в доминировании кремнезема (75–82%) и глинозема (4,5–11,5%). Это является следствием минерального состава (преобладание кварца, присутствие полевых шпатов) и формирования литогенной фации аллювия. Содержание других оксидов и органического вещества обычно невелико. Техногенные илы являются образованиями незрелыми, продолжительность их формирования (с геологической точки зрения) невелика; они отличаются низкими значениями показателей степени дифференциации и способностью к активным диагенетическим изменениям слагающего их вещества, что в существенной мере и определяет дальнейшую судьбу связанных с ними органических и неорганических поллютантов [16, 17, 26, 28]. Петрохимиче-

ский состав их очень своеобразен и близок к составу осадков городских сточных вод (являющихся своего рода геохимическим аналогом техногенных илов). Содержание кремнезема в илах нередко снижается до 42–62%, существенно возрастает количество органического вещества (значения показателя потерь при прокаливании техногенных илов – 10–26% и более против 1,67–3,6% в фоновом русловом аллювии) и оксидов кальция (с 0,8–3,6% в фоновом аллювии до 6–10% и более в илах). Техногенные илы стабильно отличаются повышенными содержаниями соединений железа, титана, серы.

Групповой (компонентный) состав органического вещества фонового руслового аллювия равнинных рек близок составу органического вещества осадочных пород и особенно почв, слагающих водосборную территорию, поскольку определяется главным образом механической дифференциацией поступающего аллохтонного осадочного материала и в существенно меньшей степени накоплением автохтонной органики [26, 28]. Это обуславливает невысокое содержание органического вещества в фоновом аллювии (содержание органического углерода  $C_{орг} = 0,65\%$ ) и преобладание в его составе гумусовых кислот (81,8% от  $C_{орг}$ ) при незначительной доле остаточного органического вещества (16,7%) и липидов (1,5%). Фоновый аллювий характеризуется фульватно-гуматным типом органического вещества и очень высокой степенью его гумификации, что свидетельствует о преобладании в природных условиях окислительных процессов. Техногенные илы, формирующиеся в зоне влияния промышленного города, отличаются более высоким содержанием органического вещества ( $C_{орг}$  1,26–2,60%, среднее 1,87%), причем наиболее резко в них увеличиваются удельные концентрации липидов (в 6–59 раз по сравнению с фоновым аллювием) и нерастворимого (остаточного) органического вещества (в 3–11 раз) [6, 26, 28]. В существенно меньшей степени (в 1,3–1,6 раза) возрастает удельное содержание гумусовых кислот, в составе которых уже доминируют фульвокислоты. Техногенные илы отличаются от фонового аллювия принципиально иной структурой группового состава содержащегося в них органического вещества: относительная доля липидов возрастает до 10–20%, остаточного органического вещества – до 27,3–48,6%, а доля гумусовых кислот снижается до 29,6–57,1%. Вблизи источника загрязнения органическое вещество илов характеризуется средней и высокой степенью гумификации, фульватным и гуматным типом гумуса, что указывает на преобладание восстановительных процессов. По мере удаления от города уменьшения общего содержания органического вещества в илах происходит в основном за счет снижения в нем количества гуминовых кислот и труднорастворимых органических соединений. В техногенных илах количество органического углерода заметно превышает содержание карбонатного углерода, что отличает их от фонового аллювия и других осадочных образований. В формировании физических свойств, текстуры и структуры техногенных илов, их цвета и запаха важную роль играют нефтепродукты, содержание которых в зонах наиболее интенсивного техногенного загрязнения достигают нескольких сотен мг/кг и более. Типичными органическими поллютантами, практически повсеместно присутствующими в донных отложениях рек промышленно-урбанизированных районов, являются ПАУ (включая бенз(а)пирен – надежный маркер техногенного воздействия), ПХБ и другие органические соединения [12, 13, 28]. Органическое вещество, концентрирующееся в техногенных илах, во многом определяет их физико-химические свойства и играет важную роль в поведении тяжелых металлов. Высокое содержание органического вещества в илах обуславливает дополнительные расходы кислорода на его окис-

ление, что может способствовать появлению в речном русле анаэробных (глеевых) условий, при которых усиливается миграционная подвижность многих тяжелых металлов и их способность к обмену между донными отложениями и водой. Липиды, в значительных количествах присутствующие в техногенных илах и являющиеся наиболее лабильной частью органического вещества, могут способствовать формированию подвижных, геохимически активных форм тяжелых металлов, а повышенное содержание трудногидролизуемого органического вещества – увеличению запасов их более прочносвязанных форм.

Все виды промышленного и сельскохозяйственного производства обуславливают формирование в реках, принимающих сточные воды и поверхностный сток с освоенных территорий, техногенных геохимических аномалий, наиболее ярко проявляющихся в донных отложениях (особенно в техногенных илах), где накапливаются определенные группы химических элементов – техногенные геохимические ассоциации, характеристики которых отражают важнейшие особенности техногенного загрязнения. Качественные и количественные параметры геохимических ассоциаций, свойственных донным отложениям рек сельскохозяйственных районов, определяются спецификой хозяйственного использования водосборных территорий, при этом особенно важное значение имеет применение минеральных и органических удобрений, поступление сточных вод и отходов животноводства [2, 4, 6, 16, 28]. Для большинства химических элементов, концентрирующихся в донных отложениях рек агроландшафтов, типичны коэффициенты концентрации ( $K_C$ ) в пределах 1,5–7; для Hg и Ag в зонах влияния животноводческих комплексов отмечены его более высокие значения. В целом для зон воздействия животноводческих комплексов типично интенсивное накопление в речных отложениях Hg, Ag, Zn, As, Se, P, в меньшей степени Sn, Mo, Cd; для районов земледелия и комплексного сельскохозяйственного использования – P и Ag, иногда As, Mn, Sn, Cd; для зон влияния агропоселков – Ag и P, в меньшей степени Bi, Ni, Zn, Pb; для зон влияния дачных поселков – P, Sn, Mn, Ga. Наибольшая степень санитарно-токсикологической вредности (опасная) и наиболее интенсивный уровень загрязнения (высокий) характерны для участков рек, испытывающих воздействие животноводческих комплексов. Водотоки других сельскохозяйственных территорий отличаются умеренной степенью санитарно-токсикологической вредности и преимущественно средним уровнем загрязнения. Воздействие различных промышленно-урбанизированных объектов (город, поселок, промышленная зона, завод, фабрика) на водотоки отражается качественно сходной геохимической ассоциацией, накапливающейся в донных отложениях (техногенных илах) [4, 6, 16, 26, 28]. Практически повсеместно присутствуют Hg, Ag, Cd, Co, Cu, Ba, Zn, Cr, P, Sc, Sr. Наиболее высокими значениями  $K_C$  отличаются халькофильные элементы (обладающие малым кларком, высокой технофильностью и высокой токсичностью). Качественные и количественные параметры загрязнения водотоков (примерно равных порядков) в большей степени зависят от производственной инфраструктуры поселений, нежели от их размеров. Обычно наиболее интенсивные и комплексные по составу техногенные геохимические аномалии типичны для предприятий (промышленных зон), использующих в технологическом цикле физико-химические процессы, осуществляющие получение и переработку цветных металлов и т. п. Воздействие конкретного поселения, промышленной зоны или конкретного производства отражается формированием в донных отложениях водотока техногенной геохимической ассоциации, отличающейся особыми количественными характеристиками. Геохимическая (экологи-

геохимическая) специализация производств, предприятий, промышленных зон (как техногенных источников загрязнения водных систем) проявляется главным образом в различной интенсивности концентрирования (степени аномальности) химических элементов, в меньшей степени в появлении аномальных элементов, характерных лишь для данного объекта. Многие изученные водотоки характеризуются существенным уровнем техногенного загрязнения и опасной степенью его санитарно-токсикологической вредности.

Донные отложения (и особенно техногенные илы), в которых формируются протяженные (десятки километров) полиэлементные геохимические аномалии (техногенные потоки рассеяния), наиболее полно отражают параметры и морфологию зон воздействия различных источников загрязнения рек [6, 7, 17, 26, 28]. Пространственные особенности распределения химических элементов в техногенных илах обусловлены геологически незначительным временем образования последних, дискретным характером поступления загрязняющих веществ в водотоки, естественной русловой дифференциацией осадочного материала (наносов), литолого-геоморфологическими особенностями речных русел, свойствами и стратификацией илов. Важнейшей особенностью распределения химических элементов в техногенных илах является значительная пространственная вариация их концентраций как в толще отложений – вертикальная, так и вниз по руслу реки – латеральная. Для большинства химических элементов указанная вариация (неоднородность распределения) обычно проявляется на фоне их высоких и очень высоких концентраций. Степень пространственного разделения химических элементов (геохимических ассоциаций) в техногенных илах невелика, распределение их обычно отличается высокой степенью согласованности и резкого разделения геохимических ассоциаций не наблюдается. Естественная дифференциация и специфика накопления наносов в речных руслах, представляющих собой закономерно построенный морфологический комплекс, осложненный естественными и искусственными геохимическими барьерами, обуславливает неоднородную («пятнистую») площадную структуру геохимических аномалий в донных отложениях водотоков. Обычно ведущие химические элементы техногенной геохимической ассоциации, характерной для того или иного источника загрязнения, отличаются более значительными по площади русла геохимическими аномалиями. Закономерный характер пространственного распределения химических элементов в русловых отложениях может быть осложнен на геохимических барьерах, существование которых обусловлено изменениями геоморфологических особенностей русла и долины как естественными (выполаживание продольного профиля водотока, резкое расширение русла и долины, наличие затонов, островов, устьев аккумулятивного типа и т. д.), так и искусственными (наличие прудов, плотин, инородных предметов и т. д.) причинами. Геохимические барьеры, с одной стороны, способствуют выводу из водного потока значительных количеств загрязняющих веществ, с другой – приводят к формированию в реках зон повышенной экологической опасности. На небольших водотоках, служащих приемниками городских сточных вод, при определенных условиях, обуславливающих возникновение геохимических (седиментационных) барьеров, за относительно короткое время могут формироваться зоны интенсивного техногенного загрязнения, которые являются вторичными источниками поступления поллютантов в реку следующего порядка (например, за счет вторичного переотложения наносов, особенно в периоды паводков и половодий, и др.).

В горнорудных районах техногенное воздействие приводит к изменению природного (характерного для данной территории) соотношения основных форм миграции тяжелых металлов – взвешенной и растворенной, прежде всего, за счет увеличения доли их взвешенных форм [3, 4, 9, 28]. При удалении от источников воздействия наряду с общим снижением концентрации металлов подобные нарушения сглаживаются, главным образом, за счет более интенсивного выведения из потока взвешенного материала. Протяженность потоков рассеяния во взвешенной форме для горнодобывающих и металлургических предприятий достигает 20–30 км, в растворенных формах она намного меньше. Именно за счет высоких концентраций и значительных масс взвешенных форм элементов происходит образование интенсивных и протяженных геохимических аномалий в донных отложениях горных рек. В зонах влияния геологоразведочных работ и добывающих предприятий (штолен, шахт и т. д.), где качественный состав техногенных источников в принципе адекватен рудогенным, соотношение между химическими элементами в рядах концентрации в донных отложениях заметно меняется, а общий уровень их накопления в речных отложениях значительно выше, нежели в рудогенных потоках рассеяния. В районе горно-обогатительных и металлургических предприятий в донных отложениях водотоков фиксируются интенсивные, комплексные по составу, устойчивые и протяженные по руслу техногенные геохимические аномалии (техногенные потоки рассеяния). Степень концентрирования химических элементов уже значительно (многократно) превышает таковую в рудогенных (природных) аномалиях, причем количественные соотношения между химическими элементами в техногенных геохимических ассоциациях совершенно иные, нежели в природных (рудогенных). Очень часто степень концентрирования сопутствующих химических элементов (элементов-примесей) в донных отложениях техногенно загрязненных рек выше, нежели главных компонентов добываемых и перерабатываемых руд. Здесь в формировании техногенных геохимических аномалий существенную роль играют не только сточные воды, но и пылевые выбросы в атмосферу, отвалы горных пород и хвостохранилища, определяющие состав поверхностного (талого и дождевого) стока с территории горнорудных районов. Уровни содержания многих химических элементов в шламах, взвеси сточных вод и донных отложениях рек интенсивно освоенных горнорудных районов часто не уступают их концентрациям в рудах. Если в фоновом руслевом аллювии доминируют устойчивые, прочносвязанные формы химических элементов, то в условиях загрязнения в донных отложениях рек заметно возрастает доля их более подвижных, геохимически активных форм. В общем случае масштабы загрязнения существенно увеличиваются в следующем ряду источников воздействия: «геологоразведочные работы – добыча руд – обогащение руд – металлургическая переработка руд». Протяженность техногенных потоков рассеяния в донных отложениях рек горнорудных районов достигает десятки километров. Элементный состав техногенных геохимических ассоциаций и значения суммарного показателя загрязнения  $Z_C$  свидетельствуют о чрезвычайно высоком уровне техногенного загрязнения рек горнопромышленных районов, причем формирующиеся здесь зоны техногенного загрязнения отличаются чрезвычайно высокой устойчивостью; их негативное воздействие сказывается многие десятки лет после прекращения функционирования предприятий.

Распределение химических элементов в гранулометрическом спектре фонового руслевом аллювия обычно характеризуется увеличением их удельных концентраций от грубых к более тонким фракциям [15, 28]. Аналогичный характер рас-

предела большинства изученных химических элементов (но при их более высоких удельных содержаниях в конкретных фракциях) наблюдается и в техногенных илах [17, 27, 28]. Исключение составляют железо (основным концентратом которого является фракция крупного алеврита) и ртуть (фракция-концентрат – мелкий или средний песок), что обусловлено особенностями структурно-агрегатного состава техногенных илов. В качестве фракции-носителя для большинства металлов выступает крупный алеврит, с которым связано до 50–70% их валового содержания. Для ртути основным носителем в техногенных илах являются фракции среднего или мелкого песка (вблизи источника загрязнения) и фракции тонкого песка или алеврита (при удалении от источника загрязнения) [8].

Техногенные илы, формирующиеся в руслах равнинных рек в зонах загрязнения, отличаются от фонового руслового аллювия иным соотношением основных минералого-геохимических форм нахождения тяжелых металлов, что, прежде всего, проявляется в заметном увеличении доли их подвижных соединений, способных переходить в водную фазу и усваиваться гидробионтами [6, 17, 26, 28]. Удельные концентрации подвижных форм многих металлов в техногенных илах не только близки валовым фоновым содержаниям, но часто превышают их. Для кадмия фиксируется резкое увеличение доли сорбционно-карбонатных форм (при существенном снижении доли органических форм). Для меди отмечается рост относительного содержания гидроксидных и (особенно при удалении от города) сорбционно-карбонатных форм нахождения. Для никеля наблюдается увеличение доли сорбционно-карбонатных и гидроксидных форм (при заметном снижении доли органических и кристаллических форм). Для свинца характерен заметный рост относительного содержания сорбционно-карбонатных и небольшое увеличение доли гидроксидных форм (при снижении количества кристаллических и силикатных форм). Ртуть в техногенных илах накапливается преимущественно в относительно подвижных формах [7, 8, 29]. По мере удаления от источника загрязнения происходит снижение как валовых содержаний, так и удельных концентраций различных форм этого металла. Отмечается достаточно выраженное закономерное изменение в соотношении различных форм нахождения вниз по потоку, проявляющееся в определенном, порой значимом увеличении относительной доли оксидных форм, в меньшей степени сульфатных, а также в снижении доли элементарной ртути. Это указывает на геохимическую трансформацию форм ртути в процессе миграции, которая сопровождается ее выделением в водную массу. Доля прочносвязанных форм ртути в илах, как правило, не превышает 25–30%. Формы нахождения тяжелых металлов и особенно их соотношение в техногенных илах вблизи источников загрязнения обычно близки формам нахождения и их соотношению в осадочном материале (техногенной взвеси), поступающего в реки со сточными водами (т. е. является своего рода «первичными» формами, что, безусловно, указывает на существенную роль в формировании техногенных илов на этих участках русла процессов гидравлического (механического) осаждения техногенной взвеси [17, 28]. При удалении от источника загрязнения важную роль в осаждении переносимых водным потоком тяжелых металлов играют сорбционные процессы. Обычно вниз по течению наблюдается уменьшение относительной доли легкоподвижных форм нахождения тяжелых металлов, а баланс (соотношение) их основных форм нахождения приближается к таковому в фоновом русловом аллювии. Тем не менее в большинстве случаев потенциальный запас металлов, способных к дальнейшей трансформации и усвоению гидробионтами, в техногенных илах превышает общий пул химических

элементов в фоновых русловых отложениях. Иловые воды в зонах техногенного загрязнения отличаются высокими концентрациями многих химических элементов и их соединений (существенно выше их уровней в придонных водах и фоновых содержаниях в речных водах) [8, 26, 28]. Это свидетельствует о наличии на границе вода/илы постоянного градиента концентрации растворенных форм загрязнителей, направленного из отложений в воду. Для ртути установлена прямая зависимость ее содержания в иловой воде от концентрации этого металла в техногенных илах [7, 8].

Техногенные илы (в сравнении с фоновым аллювием) характеризуются более высокими значениями сухого остатка, высокой обменной кислотностью и значительными содержаниями обменных ионов [28]. Если емкость катионного обмена фонового руслового аллювия составляет 4,84 мг-экв/100 г отложений, то в техногенных илах она существенно увеличивается, достигая максимальных значений в 38–41 мг-экв/100 г. Наибольшие значения емкости обмена катионов закономерно характерны для илов с более низкими значениями pH. В составе обменных катионов доминирует (68–81% от суммы) кальций, доля обменного магния также значительна (32–36%). Количество обменного  $\text{NH}_4^+$  заметно превышает содержание обменных натрия и калия. Техногенные илы отличаются повышенными содержаниями  $\text{NO}_3^-$ . Колебания значений емкости поглощения техногенных илов обусловлены пространственными различиями их вещественного состава, в том числе количеством и групповым составом органического вещества. Основными носителями адсорбционных свойств техногенных илов являются аморфное и органическое вещество, гидроксиды железа, карбонатные и глинистые минералы.

Вторичные (диагенетические) преобразования техногенных илов могут быть связаны с трансформацией органической, карбонатной и илито-глинистой составляющих, преобразованием соединений железа и формированием «свежих» гидроксидов железа, марганца и алюминия и их гидрозолей, вторичных алюмосиликатов и аморфных минералов, с переходом аморфных гидроксидов железа, марганца и алюминия в кристаллические, с потерей илами при их уплотнении несвязанной воды, с относительным увеличением содержания устойчивых титанистых минералов, а также в существенной мере с разубоживанием техногенного материала природным аллювием [6, 17, 26, 28]. Деструкция органического вещества, присутствующего в значительных количествах в техногенных илах, интенсифицирует в загрязненных водотоках процессы газообразования ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ). Образование газов в донных отложениях приводит к изменению физико-механических и химических свойств последних, увеличивает их экологотоксикологическую опасность, влияет на поведение многих химических элементов, изменяет газовый режим водотоков в зонах техногенного загрязнения. Газовыделение способствует переносу различных загрязнителей из толщи отложений и придонных слоев в основной водный поток, является источником поступления некоторых газов в атмосферу.

Разливы загрязненных рек и использование загрязненных речных вод для орошения сельскохозяйственных угодий обуславливают поступление на пойму значительных масс специфического осадочного материала и разнообразных загрязняющих веществ [8, 28, 29]. Это приводит к накоплению (нередко к очень значительному) в пойменных почвах, природных и сельскохозяйственных растениях тяжелых металлов и других химических элементов, к загрязнению пойменных водоемов и грунтовых вод, способствует резкой геохимической трансформации пойменных ландшафтов и сопровождается негативными экологическими и

санитарно-гигиеническими последствиями. В пределах поймы (особенно низкой) активно формируются техногенные иллы, в пойменных водоемах (озерах-старицах) накапливаются техногенные илы. В особых условиях это приводит к формированию экстремальных экологических ситуаций, которые по интенсивности и масштабам загрязнения тяжелыми металлами различных компонентов окружающей среды соответствуют районам экологического бедствия и даже районам экологической катастрофы. Уникальным примером таких районов является пойма р. Нуры, где для орошения сельскохозяйственных угодий длительное время использовались интенсивно загрязненные ртутью речные воды. Здесь, в сущности, сформировался своеобразный «ртутный» агроиригационный ландшафт, специфической особенностью которого являются высокие концентрации токсичной ртути в основных компонентах окружающей среды и значительные (десятки тонн) запасы этого металла в пойменных почвах. Выращиваемая в пределах загрязненных пойм сельскохозяйственная продукция не отвечает гигиеническим требованиям, что не исключает вероятности включения токсичных элементов в пищевую цепь и представляет реальную угрозу для человека и сельскохозяйственных животных. На орошаемых угодьях существует также прямая опасность для сельскохозяйственных рабочих вследствие высоких концентраций паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха и ее повышенных содержаний в почвенной пыли. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что устойчивость загрязнения, обусловленного разливами загрязненных рек и орошением загрязненными водами, может быть очень значительной.

Эпифитовзвесь (взвесь, осажденная на макрофитах) представляет собой особую разновидность современных осадочных образований, является важным компонентом водной среды и речной экосистемы в целом, с которым связан определенный трофический уровень, играет определенную роль в перераспределении и миграции химических элементов, в трансформации их форм нахождения и в протекающих в реках биогеохимических процессах [1, 8, 18, 19, 28]. В условиях техногенеза решающее значение в формировании эпифитовзвеси принадлежит техногенному осадочному материалу, поступающего в водотоки со сточными водами и поверхностным стоком с освоенных территорий. Эпифитовзвесь отличается от фонового аллювия и техногенных илов своеобразным химическим составом, что особенно ярко проявляется в высоких содержаниях карбонатов и в резко пониженном количестве кремнезема. Наличие в эпифитовзвеси значительных количеств карбонатов кальция (карбонатных новообразований) обуславливает формирование карбонатных соединений некоторых тяжелых металлов, способных к преобразованию в условиях окружающей среды и относительно доступных для живых организмов. Изучение химического состава эпифитовзвеси позволяет более точно установить качественный состав техногенного загрязнения. Одновременно эпифитовзвесь характеризуется и более высокими концентрациями химических элементов, входящих в состав выявленных ассоциаций, т. е. геохимические аномалии проявляются в ней интенсивнее, нежели в техногенных илах, что находит отражение в значениях суммарного показателя загрязнения. Если русловые отложения отражают многолетнее воздействие техногенеза на водоток, то повышенные содержания химических элементов в эпифитовзвеси фиксируют современный (сезонный) уровень техногенного загрязнения. В силу биологических особенностей развития макрофитов в эпифитовзвеси присутствуют поллютанты, мигрирующие в реке в течение относительно короткого отрезка времени (в данном случае, от начала вегетации до момента отбора проб), что имеет и мето-

дикосное, и практическое значение. Присутствие в эпифитовзвеси существенных количеств легкоподвижных (сорбционных, карбонатных, обменных) форм тяжелых металлов определяет их высокую потенциальную усвояемость водными растениями и другими гидробионтами, а также вероятность их интенсивной десорбции в водную массу, особенно при изменении окружающих условий (например, при колебаниях минерализации, снижении pH, уменьшении мутности воды вниз по течению, а также в результате разнообразных биогеохимических процессов, свойственных речным условиям). После отмирания маркофитов связанная с ними эпифитовзвесь участвует в формировании техногенных илов. Существующие подходы к моделированию распределения и действия тяжелых металлов в водных экосистемах должны учитывать факт их «концентрированного» присутствия в эпифитовзвеси.

В прогнозе техногенные речные илы, концентрируя основную массу загрязняющих веществ, поступающих в реки техногенных ландшафтов, представляют собой мощный источник вторичного загрязнения водной массы, пойменных территорий и поступления токсичных веществ в гидробионты, действие которого обеспечивается разнообразными физико-химическими, биохимическими и гидродинамическими процессами, протекающими в речных системах, в том числе, непосредственно в отложениях и на границе придонная вода/ил [6, 17, 28].

Это, в сущности, и определяет необходимость дальнейшего изучения современных речных отложений и, прежде всего, техногенных илов с учетом следующих положений:

1) донные отложения рек играют важную роль в формировании химического состава природных вод и определяют многие особенности экологии водных систем;

2) донные отложения рек служат надежным индикатором техногенного загрязнения; изучение их литолого-геохимических особенностей позволяет определить состав, установить масштабы и оценить интенсивность техногенного воздействия на водотоки, а также выявить пространственные границы и структурно-морфологические особенности зон техногенного загрязнения;

3) масштабы и интенсивность техногенного осадконакопления в реках промышленно-урбанизированных районов настолько велики, что здесь формируется особый вид аллювиальных отложений (техногенные илы, технопель), которые определяют эколого-геохимические особенности речных систем, специфику проявления русловых процессов и представляют непосредственную угрозу всему живому; не исключено, что техногенные речные илы вполне могут рассматриваться в качестве своеобразного литогенетического типа современных аллювиальных отложений (их своеобразной литогеохимической фации);

4) техногенные илы, депонируя загрязняющие вещества, до определенной степени обезвреживают токсичные выбросы техногенеза, особенно на начальных этапах загрязнения водотоков; однако буферная способность илов по отношению к поллютантам не беспредельна; даже в случае полного прекращающего поступления сточных вод в водный объект техногенные илы длительное время являются вторичным источником загрязнения водной массы, биоты, пойменных ландшафтов, а химические реакции и микробиологические процессы, происходящие в них, способствуют образованию подвижных (геохимически активных) и токсичных соединений многих химических элементов и их соединений;

5) оценка экологического состояния речных систем должна проводиться с учетом вещественного состава, геохимических свойств и токсикологической опасности техногенных илов;

б) накопление техногенных илов в руслах и долинах рек с утилитарной точки зрения следует рассматривать как своего рода несанкционированное размещение в окружающей среде опасных отходов; в критических ситуациях необходимы изъятие и утилизация таких отложений, что обуславливает необходимость разработки экологически обоснованных методов и приемов ремедиации рек и технологий последующей утилизации загрязненного материала;

7) русла загрязненных рек представляют собой своеобразные природные лаборатории, позволяющие изучать литологические, физико-химические, геохимические и другие аспекты аллювиального литогенеза; такие сведения крайне важны для понимания сущности осадочного процесса и породообразования.

Дальнейшее совершенствование технологий и систем очистки сточных вод и загрязненного поверхностного стока должно осуществляться с учетом максимально возможного удаления из них техногенного осадочного материала (техногенной взвеси), что резко снизит объемы поступающих в водные объекты загрязняющих веществ и уменьшит вероятность активного формирования в руслах рек техногенных илов – основных концентраторов и носителей широкой группы загрязняющих веществ. Создание в устьевых зонах ручьев и малых рек, являющихся во многих городах приемниками сточных вод и поверхностного стока с освоенных территорий, искусственных геохимических барьеров (например, прудов-отстойников, с использованием зарослей макрофитов) будет способствовать снижению поступления многих загрязняющих веществ в основной водоток, прежде всего, за счет осаждения транспортируемого водотоками техногенного осадочного материала. Периодическая очистка таких водоемов от техногенных отложений и макрофитов исключит вероятность существенного вторичного поступления поллютантов в водную фазу. Изъятые наносы должны утилизироваться с применением соответствующей технологии.

### Литература

1. Буренков Э.К., Янин Е.П., Кижаккин С.А. и др. Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды г. Саранска. – М.: ИМГРЭ, 1993. – 115 с.
2. Сает Ю.Е., Алексинская Л.Н., Янин Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 74 с.
3. Сает Ю.Е., Онищенко Т.Л., Янин Е.П. Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. – М.: ИМГРЭ, 1987. – 100 с.
4. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
5. Сает Ю.Е., Янин Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке состояния поверхностных вод. – М.: ИМГРЭ, 1985. – 48 с.
6. Янин Е.П. Геохимические закономерности формирования антропогенных потоков рассеяния химических элементов в малых реках: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М.: ИМГРЭ, 1985. – 25 с.
7. Янин Е.П. Экогеохимическая оценка загрязнения реки Нуры ртутью. – М.: ИМГРЭ, 1989. – 43 с.
8. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
9. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. – М.: Геоинформмарк. 1993. – 50 с.

10. Янин Е.П. Фтор в питьевых водах города Саранска и его гигиеническое значение. – М.: ИМГРЭ, 1996. – 58 с.
11. Янин Е.П. Асбест в окружающей среде. (Введение в экологическое асбестоведение). – М.: ИМГРЭ, 1997. – 176 с.
12. Янин Е.П. Полихлорированные бифенилы в окружающей среде (эколого-гигиенические аспекты). – М.: Диалог-МГУ, 1997. – 35 с.
13. Янин Е.П. Электротехническая промышленность и окружающая среда (эколого-геохимические аспекты). – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 281 с.
14. Янин Е.П. Введение в экологическую геохимию. – М.: ИМГРЭ, 1999. – 68 с.
15. Янин Е.П. Русловые отложения равнинных рек (геохимические особенности условий формирования и состава). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 139 с.
16. Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.
17. Янин Е.П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 100 с.
18. Янин Е.П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 51 с.
19. Янин Е.П. Геохимический способ выявления и оценки зон техногенного загрязнения рек. Патент № 2205401. Россия, МПК7 G 01 N 33/18. № 2001131942/04: Заявл. 28.11.2001; Оpubл. 27.05.2003. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 27 мая 2003 г.
20. Янин Е.П. Горючие сланцы и окружающая среда (экологические последствия добычи, переработки и использования). – М.: ИМГРЭ, 2003. – 86 с.
21. Янин Е.П. Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). – М.: ИМГРЭ, 2003. – 82 с.
22. Янин Е.П. Тяжелые металлы в малой реке в зоне влияния промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 2003. – 89 с.
23. Янин Е.П. Источники и пути поступления тяжелых металлов в реки агроландшафтов. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 40 с.
24. Янин Е.П. Осадки городских сточных вод как источник поступления ртути в окружающую среду. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 26 с.
25. Янин Е.П. Ртуть в пылевых выбросах промышленных предприятий. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 24 с.
26. Янин Е.П. Техногенные илы в реках Московской области (геохимические особенности и экологическая оценка). – М.: ИМГРЭ, 2004. – 95 с.
27. Янин Е.П. Химический состав и минералогические особенности техногенных илов реки Нуры. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 22 с.
28. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). – М.: НП «АРСО», 2018. – 415 с.
29. Yanin E.P. Mercury in surroundings of the city of Temirtau, Central Kazakhstan. – Moscow, IMGRE, 1997. – 30 p.
30. Yanin E.P. Electrical Engineering Industry and the Urban Environment (man-made pollution and ecological effects). – Dialog-MGU Publishers, Moscow, 1998. – 37 p.