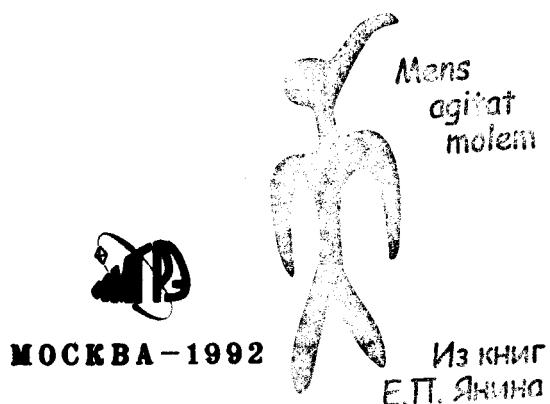


КОМИТЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НЕДР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.П. ЯНИН

Р Т У Т Ъ
в окружающей
среде
промышленного
города



В В Е Д Е Н И Е

УДК 550.4:546.49:550.4.02

Е.П.Янин. Ртуть в окружающей среде промышленного города.
М.: ИМГРЭ, 1992.—165с.

В книге на основе оригинального фактического материала рассматриваются различные аспекты поступления, распределения и поведения ртути в окружающей среде городов в связи с воздействием техногенных источников. Даётся описание структурно-морфологического строения техногенных ореолов и потоков рассеяния ртути в различных компонентах окружающей среды. Выполненный эколого-геохимический анализ особенностей концентрирования, форм нахождения и миграции ртути в атмосфере и наземных экосистемах города, в водных системах городских агломераций, в сельскохозяйственных ландшафтах пригородных зон.

Монография представляет интерес для широкого круга специалистов в области экологии, геохимии, гигиеники.

Ответственный редактор

Б.А.Колотов

Рецензент

В.М.Роговой

С

Институт минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов, 1992 г.

Рост урбанизации был и остается характерной чертой современности. По оценкам ООН к концу нашего столетия около 60% населения планеты будет проживать в городах, появится около 30 городов с населением более 5 млн. человек. Именно с городами связаны наиболее насущные проблемы человечества. С одной стороны, городские поселения требуют сосредоточения на сравнительно локальных территориях продовольствия, воды, топлива, других видов сырья и ресурсов в таких масштабах, которые не встречаются в природе. С другой стороны, производимые в городах отходы очень быстро превосходят поглотительную способность окружающих его природных экосистем. Города отражают наиболее концентрированную форму воздействия техногене на окружающую среду. В свою очередь, практически все антропогенные процессы, определяющие экологию городских поселений, повсеместно и неизбежно сопровождаются комплексной полиэлементной химизацией или металлизацией окружающей среды [6]. Это проявляется прежде всего в формировании в пределах урбландшафтов и их окружения обширных и контрастных техногенных геохимических аномалий (ореолов и потоков рассеяния) широкой группы химических элементов и соединений. Характеристики ореолов и потоков рассеяния - состав, степень концентрирования, формы нахождения и миграции поллютантов, особенности их трансформации и перераспределения, интенсивность биопоглощения – определяют качество окружающей среды, а в конечном счете и условия существования человека в принципиально новой среде обитания – городских агломерациях.

Среди многочисленной группы поллютантов особое место занимает ртуть, обладающая уникальными экогеохимическими и экотоксикологическими свойствами, обусловленных ее бесдесущностью, разнообразием форм нахождения и спецификой их трансформации в природных условиях, повышенной возможностью распределения и биопереноса в окружающей среде, а также широким и разносторонним спектром негативных воздействий на живые организмы и их популяции.

В настоящее время имеется заметное количество публикаций, посвященных рассмотрению особенностей и процессов загрязнения окружающей среды ртутью. Анализ специализированных информационных изданий показывает, что ртуть является на сегодня одним из наиболее изучаемых в связи с техногенным воздействием химическим элементом. Достаточно подробно рассмотрены вопросы, касающиеся ее глобального распределения, миграции и трансформации в окружающей среде, прежде

всего в связи с ее техногенным и природным поступлением в атмосферу. Существенное количество работ посвящено изучению метаболизма ртути в живых организмах и оценке опасности ее воздействия на человека. Имеются многочисленные данные о повышенных ее содержаниях в различных компонентах ландшафтов в результате загрязнения. Однако, как это не парадоксально, имеется не так уж много информации об особенностях распределения, накопления и поведения ртути в наиболее "горячих точках", обусловленных загрязнением окружающей среды, и прежде всего в промышленных городах. Кроме того, негативные воздействия ртути вряд ли можно связывать только с ее поступлением в атмосферу. Как показывают имеющиеся данные в настоящее время наиболее опасные и критические ситуации в связи с загрязнением ртутью проявляются в связи с ее поступлением в водные экосистемы. Свидетельством этому являются широко известные события в Японии, Швеции, Северной Америке.

В предлагаемой работе сделана попытка рассмотреть особенности поступления, распределения и поведения ртути на локальном уровне – в окружающей среде промышленного города, и, по возможности, выявить и оценить все наиболее опасные проблемы, возникающие при этом. Геохимические исследования процессов загрязнения окружающей среды проводятся прежде всего для решения практических задач. Именно поэтому основой для книги послужили результаты прикладных исследований, выполненных в двух, на наш взгляд очень показательных с позиций загрязнения окружающей среды ртутью, городах – г. Темиртау (Центральный Казахстан) и г. Саранск (Мордовия). Мы специально подчеркиваем прикладной характер исследований, поскольку в каждом случае прежде всего ставились вполне конкретные практические задачи, связанные с оценкой загрязнений окружающей среды ртутью. Надеемся, что опыт таких работ может быть интересен, поскольку проведенный комплекс эколого-геохимических исследований позволил выявить "的独特性" г. Темиртау и "типичность" г. Саранска с позиций загрязнения окружающей среды ртутью.

Оценка загрязнения окружающей среды г. Темиртау выполнялась в 1986–1988 гг. в связи с чрезвычайно сильным загрязнением ртутью р. Нуры, входящей в сложную водохозяйственную систему Центрального Казахстана. Основным стержнем этой системы является канал Иртыш-Караганда, впадающий в р. Нуру выше г. Темиртау.

На реке Нура создано два водохранилища – Самаркандское (на левом берегу которого расположен г. Темиртау) и Интумакское (примерно в 50–60 км ниже по течению), строится третье – Самарское

(примерно в 100 км ниже по течению от г. Темиртау). Самаркандское водохранилище получает воду по каналу Иртыш-Караганда и используется для промышленного, питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения, а также для рекреационных целей: по его левому берегу расположены городские пляжи, лодочные станции, а по правому – многочисленные стационарные зоны отдыха и пионерские лагеря. Интумакское водохранилище предназначено для регулирования части стока р. Нуры, аккумулирования дополнительного объема воды при увеличении зимней водоподачи по каналу Иртыш-Караганда и в районы Джезказганской и Целиноградской областей, а также для орошения сельскохозяйственных угодий. Самарский гидроузел с водохранилищем предполагается использовать для обеспечения зарегулированного отбора воды в канал Караганда-Джезказган, а также для необходимых попусков воды в районы, лежащие ниже по течению, в том числе в канал Нура-Ишим.

Темиртауский промышленный район потребляет воду из канала Иртыш-Караганда, из Самаркандского водохранилища, из скважин в нижнем и верхнем бьефах этого водохранилища и из р. Нуры. Главными водопотребителями здесь являются Карагандинский металлургический комбинат (КМК), Карагандинская государственная районная электростанция (КарГРЭС-1), производственное объединение "Карбид" (ПО "Карбид"). Основной объем сточных вод (бытовых и промышленных) сбрасывается в реку Нуру (после очистных сооружений, расположенных на западной окраине города) по так называемой Главной канаве сточных вод. Кроме того, в Самаркандское водохранилище поступают "условно-чистые" воды КМК, КарГРЭС-1, ПО "Карбид". Основным источником поставки ртути в окружающую среду в последние 30 лет считается ацетальдегидное производство ПО "Карбид".

Вода из реки Нуры интенсивно используется для орошения расположенных на пойме (в том числе ниже города) сельскохозяйственных угодий и дачных поселков, а также для водоснабжения некоторых районов Целиноградской области и г. Целинограда. Еще одним водопотребителем является Кургальджинский международный заповедник по охране водоболотных птиц, являющийся уникальным природным объектом. Благоприятное функционирование заповедника всецело определяется водным режимом озер – прежде всего проточного Кургальджино и бессточного Тенгиз, что главным образом зависит от поступления воды по р. Нуре.

Первые публикации, указавшие на интенсивное загрязнение р. Нуры, появились еще в 1960-х гг. [20, 22]. В последующие годы интерес к этой проблеме резко возрос в связи с предполагаемым использова-

нием русла р.Нуры на участке от г.Темиртау до пос.Самарка (т.е. от Самаркандинского водохранилища до Самарского гидроузла) в качестве естественной трассы канала Иртыш-Караганда (2-я очередь - Караганда-Джезказган) для подачи воды в районы Джезказгана.

В г.Саранске - крупнейшем промышленном центре России - основное загрязнение окружающей среды ртутью связывалось с деятельностью входящих в СПО "Лисма" заводов СЭЛЗ (производство люминесцентных ламп) и СИС-ЭВС (производство различных источников света). Особо резко интерес к проблеме загрязнения городской среды возрос в связи с получившими широкое освещение в печати случаями загрязнения окружающей среды ртутью в ряде городов страны, имеющих аналогичные производства (прежде всего, в г.Смоленске). В прессе стартутивном походе к проблеме, о чрезвычайно интенсивном загрязнении окружающей среды г.Саранска ртутью. В 1989-1990 гг. нами в городе также был выполнен комплекс экогеохимических исследований. Интерес этих работ усиливался тем, что в городе расположен целый ряд крупных производств, отличающихся высокой "ресурсо(металло)емкостью".

Во всех случаях работы проводились по технологии, разработанной в ИМГРЭ и изложенной в ряде публикаций [6]. Лабораторные исследования геохимических проб проводились в основном в соответствующих подразделениях ИМГРЭ и его экспедиций. Для определения ртути использовались различные модификации атомно-абсорбционного метода.

Непосредственной помощью в работе автор обязан сотрудникам бывшей лаборатории экологической геохимии ИМГРЭ, а также ряда других его подразделений, прежде всего А.В.Глебову, А.А.Динерман, Л.В.Душаниной, Л.И.Кашиной, Ю.Г.Краснову, И.Л.Палей, Н.И.Разенковой, В.М.Роговому, Н.И.Субчеву, В.И.Тростиной, С.К.Ускову, Ю.Я.Чардиной, В.В.Черновой, Л.Г.Щеме.

Особая признательность моему учителю доктору геолого-минералогических наук Ю.Е.Саэту, благодарной памяти которого посвящается эта книга. В свое время Ю.Е.Саэтом ставился вопрос о необходимости организации детальных "моноэлементных" эколого-геохимических исследований, посвященных рассмотрению геохимии отдельных элементов в условиях загрязнения, прежде всего в городах. Первый опыт такого обобщения, посвященный геохимии ртути в промышленном городе, предлагается уважаемому читателю.

Глава I.

ПРОИЗВОДСТВО, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПОСТУПЛЕНИЕ РТУТИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Ртуть известна человечеству с глубокой древности. В той или иной форме ее применение для практических целей началось несколько тысячелетий назад. С тех пор на земную поверхность поступило и было рассеяно в окружающей среде значительное количество этого металла. Интенсивность "ртутного пресса" на биосферу с каждым годом возрастает, что является следствием не только активного практического использования ртути и ее соединений, но и расширением источников и путей их поступления в окружающую среду. В настоящее время ртуть и ее соединения являются одними из наиболее опасных загрязняющих окружающую среду веществ. Это связано прежде всего с их геохимическими и токсикологическими свойствами - повышенной возможностью биопереноса и распределения в окружающей среде и широким спектром негативных воздействий на живые организмы. С экологических позиций наибольшее значение имеет локальное загрязнение окружающей среды, связанное с производственной деятельностью человека.

I. Краткая характеристика основных свойств ртути

Ртуть - серебристо-белый жидкий металл. Природная ртуть состоит из семи стабильных изотопов с массовыми числами 196, 198, 199, 200, 201, 202 и 204. Наиболее распространен самый тяжелый изотоп: его доля 29,8%. Второй по распространенности - Hg^{200} (23,13%); наименее распространен Hg^{196} (0,14%). Получено 23 радиоактивных изотопа, из которых практическое значение имеют Hg^{203} (период полураспада 46,9 суток) и Hg^{205} (5,5 минуты). Их применяют при аналитических определениях ртути и изучении ее поведения в технологических процессах [27].

Среди всех металлов ртуть обладает наиболее высоким потенциалом ионизации. Это определяет многие особенности ее химического поведения и является одним из важнейших факторов, определяющих ее геохимию. В частности, с этим свойством связана отчетливая тенденция ртути переходить в атомарную форму, то есть восстанавливаться до металла из различных ее соединений.

Ртуть может находиться в большом разнообразии физических и хи-

мических состояний. Кроме элементарного состояния, она существует в одновалентном (I) и двухвалентном (II) состояниях. Химические соединения ртути (II) встречаются в природных условиях значительно чаще, чем ртуть (I). Помимо простых солей (хлорид, нитрат, сульфат) ртуть (II) образует элементоорганические соединения (присоединение ртути к одному или двум атомам углерода). Химическая связь углерода и ртути является устойчивой, причем органический радикал может принимать различные формы. Наиболее простыми из них являются алкил, фенил и метоксиэтил. С позиций экотоксикологии наиболее важными из металлоорганических соединений ртути являются алкилртутные соединения с короткой цепью, в которых ртуть присоединяется к атому углерода из метиловой, этиловой и прониловой группы.

За исключением благородных газов, ртуть является единственным элементом, образующим пары, которые при комнатной температуре однотипные. Пары элементарной ртути хотя и слабо, но растворяются в воде. В присутствии кислорода металлическая ртуть быстро окисляется до ионной формы – ртуть (II). В водном растворе между Hg^0 , Hg_2^{2+} и Hg^{2+} устанавливается равновесие, которое определяется окислительно-восстановительным потенциалом раствора и концентрацией галоидных, тиоловых и других групп, образующих комплексы с Hg^{2+} . Ионы двухвалентной ртути образуют много устойчивых комплексов с биологически важными молекулами. Химическое сродство ртути (II) и ее одновалентных алкилртутных катионов к ряду лиганд биологического происхождения является очень сильным.

Ртуть халькофильный элемент. Минералы ртути в связи с малой ее распространенностью в земной коре немногочисленны. На сегодня установлено 87 ртутных минералов [29]. Однако промышленное значение имеют немногие из них, прежде всего киноварь и в заметно меньшей степени метатиннабарит, самородная ртуть, гипогенные оксихлориды ртути. Сложные минералы ртути в гипергенных условиях обычно менее устойчивы, чем киноварь и самородная ртуть.

Ртуть обладает высокой токсичностью для любых форм жизни, в том числе и для человека. С точки зрения патологии человека ртуть отличается широким спектром и большим разнообразием клинических проявлений токсического действия в зависимости от свойств веществ, в виде которых она поступает в организм (пары ртути, неорганические и органические соединения), путей поступления и дозы [24, 28].

Основные пути воздействия ртути на человека связаны с пищевыми продуктами, воздухом, питьевой водой (табл. I). Возможны и другие, как правило, случайные пути воздействия: при купании в загрязненном

Таблица I. Сравнительное значение различных путей воздействия ртути для взрослого человека [25]

Недельное поступление (поглощение) ртути (мкг)			
Пищевые продукты	Воздух	Вода	Общее поступление
(а) 70 (5,6)	2,8 (2,2)	14 (2,1)	87 (9,3)
(б) 140 (II,2)	2,8 (2,2)	14 (2,1)	157 (15,5)
(в) 70 (5,6)	7,0 (5,6)	14 (2,1)	91 (13,3)
(г) 140 (II,2)	7,0 (5,6)	14 (2,1)	161 (18,3)

Допущения: 1) Поступление с пищей 10 мкг/сутки (а, в) или 20 мкг/сутки (б, г) при 8% поглощения потребленной ртути; 2) При содержании в воздухе 0,02 мкг/м³ (а, б) или 0,05 мкг/м³ (в, г) при общей вентиляции порядка 20,0 м³/сутки и 80% удержании; 3) При содержании в питьевой воде 0,001 мг/л при потреблении 2 л в сутки и 15% поглощении потребленной ртути.

водоеме, при поедании детьми загрязненной почвы и т.п. Особое значение имеет профессиональное воздействие, которое особенно значимо в тех отраслях производства, где ртуть используется в технологическом процессе [28]. Выведение с мочой и калом – два основных пути экскреции ртути из организма. Дополнительными путями ее выделения служат испарения из легких, пот, слюна, кормление молоком [18]. Она теряется также в результате попадания в плаценту и через нее – в плод.

Ртуть, по-видимому, не выполняет никакой физиологической функции в организме человека. По крайней мере, жизненная необходимость этого металла не доказана. Каждое из физико-химических состояний ртути имеет свои, присущие ему свойства, которые требуют необходимости токсикологической оценки. Неорганические соединения ртути быстро накапливаются в почках – основном органе-мишени для этих веществ [18]. Поглощенная метилртуть быстро появляется в крови, где на 80–90% связывается с красными кровяными клетками [24]. Деметилирование метилртути до неорганической формы происходит хотя и медленно, но с заметной скоростью.

Ингаляционное поступление паров ртути при сильном (профессиональном) воздействии сопровождается симптомами острого бронхита, бронхиолита и пневмонии. Хроническое отравление характеризуется

наличием астеновегетативного синдрома с отчетливым трепором, лабильным пульсом, тахикардией, возбуждением, психическими нарушениями, гингивитом, фиксируются изменения в крови и экскреция ртути с мочой, превышающей нормальный уровень [16,28]. Как правило, отмеченные симптомы и синдромы наблюдаются при воздействии паров ртути при их концентрациях более 0,1 мг/м³. Имеются указания на то, что психические расстройства могут наблюдаться при концентрациях ртути в воздухе и ниже 0,1 мг/м³ [24]. При пероральном поступлении ртути наблюдается язвенно-некротический гастроэнтерит, который может привести к некротическому нефрому с гибелю эпителия проксимальных отделов почечных канальцев [16]. Клинические признаки отравления органическими соединениями ртути – поражение центральной нервной системы, атаксия, нарушение зрения, дизартрия, нарушение слуха, затрудненная речь, боль в конечностях – достаточно подробно были освещены после широко известных отравлений метилртутью в Японии и Ираке. Анализ последствий вспышки отравления в Японии показал, что у новорожденных развивался церебральный паралич, хотя у матерей симптомы поражения могли отсутствовать. Это указывает на то, что внутриутробный период представляет стадию жизненного цикла, наиболее чувствительную к воздействию метилртути [24]. Более высокая токсичность метилртути (даже при поступлении ультрамальных количеств) в сравнении с неорганической ртутью обусловлена ее липидорастворимостью, которая позволяет ей легче проходить через биологические мембранны и в особенности в головной мозг, спинной мозг и в периферические нервы, а также пересекать плацентарный барьер. На сегодня можно считать твердо установленным, что наряду с общетоксическим действием ртуть вызывает гонадотоксический, эмбриотоксический, тератогенный и мутагенный эффекты.

2. Распространенность в окружающей среде

В природных условиях наиболее значительные уровни концентрирования ртути в различных природных телах связаны в основном с районами ее месторождений, рудных участков и рудопроявлений, что может приводить к заметному локальному и даже региональному загрязнению окружающей среды. В то же время, по расчетам А.А.Саукова [26] в месторождениях заключено лишь 0,02% всей ртути, тогда как оставшаяся часть находится в состоянии крайнего рассеяния, по преимуществу в горных породах (табл.2). Как правило, ее содержания измеряются миллионными долями процента. Именно эта "рассеянная"

Таблица 2. Масса ртути, концентрирующейся в различных блоках (компонентах) окружающей среды (по обобщенным данным Ли и Яо, Кларксона и др., Лисицына)

Блок или компонент окружающей среды	Тонны
Земная кора (в целом)	$2,1 \cdot 10^{12}$
Океаническая кора	$0,9 \cdot 10^{12}$
Материковая кора	$1,2 \cdot 10^{12}$
Атмосфера	$8,5 \cdot 10^2$
Пресные воды	$2 \cdot 10^3$
Пресноводная биота	$4 \cdot 10^2$
Океанические воды (вся масса)	$4,1 \cdot 10^7$
Океанические воды (верхний 0–200 м слой)	$0,1 \cdot 10^7$
Океаническая биота	$2 \cdot 10^5$

ртуть и создает тот природный геохимический фон, на который с той или иной степенью интенсивности накладываются техногенные процессы. Естественно, что параметры природного геохимического фона ртути находятся в тесной зависимости от геологических и ландшафтно-геохимических особенностей территории, что проявляется прежде всего в определенной неоднородности распределения абсолютных содержаний ртути в различных геологических телах и компонентах окружающей среды. Это должно учитываться при оценках степени техногенного воздействия на состояние природной среды.

В прикладных геохимических исследованиях для характеристики различных категорий распространенности химических элементов (абсолютной, относительной, парциальной) используются две группы геохимических показателей [1,30]. К первой группе относятся показатели, характеризующие распространенность элементов в окружающей среде или в ее блоках и компонентах в абсолютных величинах – глобальные, региональные и местные кларки. Ко второй группе – различные геохимические коэффициенты, дающие возможность представить распределение элементов в относительных единицах. В основе большинства коэффициентов лежит так называемый коэффициент распределения, то есть величина отношения средних абсолютных содержаний в каких-либо сравниваемых между собой взаимосвязанных объектах или частях одного объекта. За базовую величину в данном случае принимается ли-

бо исходное (то есть до начала техногенного геохимического преобразования) состояние объекта, или какая-либо часть преобразуемого объекта, либо аналогичный объект, не затронутый исследуемым геохимическим процессом. Как правило, в качестве базового при экогеохимических оценках обычно принимается фоновое содержание химического элемента – среднее содержание элемента в природных телах по данным изучения их естественной вариации в пределах однородного в геологическом и/или ландшафтно-геохимическом отношении участка [6]. Таким образом, геохимический фон – понятие прежде всего местное, локальное (по сути, это понятие тождественно местному кларку), являющееся основополагающим в прикладных экогеохимических исследованиях. В то же время, геохимия изучает круговорот химических элементов в связи с техногенным воздействием на всех уровнях организации окружающей среды – локальном, региональном, глобальном. Естественно, возникает необходимость оценки их распространенности на всех трех уровнях. К сожалению, на сегодня мы не располагаем единими универсальными показателями природной распространенности элементов (то есть своеобразными стандартами) в окружающей среде, ее отдельных блоках и компонентах. Поэтому в настоящее время очень часто в качестве стандартных единиц в геохимических исследованиях для всевозможных оценок содержания и перераспределения химических элементов используются глобальные или региональные показатели их распространенности, то есть кларки (литосфера, гидросфера, осадочных пород и т.д.). В какой-то мере их использование оправдано и тем фактом, что, как показывает общий анализ материалов по фоновым данным, локальные параметры фона различаются как между собой, так и с глобальными и региональными показателями в среднем в 2–4 раза [6]. Поэтому можно согласиться с Дж.Фортескью [30] в том, что значения абсолютной распространенности химических элементов в литосфере и ее отдельных компонентах могут в первом приближении использоваться для оценки состава ландшафтов (особенно на глобальном и региональном уровнях исследования), для которых известны свойства геологического субстрата. Автор справедливо отмечает, что глобальные оценки распространенности элементов и в других геосферах (добавим и их отдельных компонентах) – гидросфере, атмосфере, биосфере – также могут служить исходными данными для подсчетов относительной распространенности ингредиентов и являться стандартами при обосновании приемов локализации геохимических аномалий.

Проблема кларков химических элементов, в том числе ртути, достаточно подробно отражена в литературе. На сегодня наиболее дета-

льно оценены глобальные содержания ртути в земной коре (литосфере); отдельных ее частях и в главных типах слагающих ее горных пород, которые в основном не вызывают возражений, хотя в их оценке и имеются определенные разногласия. Так, кларк ртути в земной коре (в $\text{n} \cdot 10^{-6}$) по А.П.Виноградову составляет 8,3; по А.А.Саукову – 7,7; по Дж.Грину – 6; по С.Р.Тейлору – 8; по И.К.Джонассону и Г.В.Бойлю – 5; по Г.Маровскому и К.Х.Ведеполю – 3; по Н.А.Озеровой – 4,5; по Ди и Яо – 8,9, то есть колеблется в пределах 3–8,9· 10^{-6} . По данным Ди и Яо кларк ртути в коре океанического типа составляет $11 \cdot 10^{-6}$. По оценкам А.А.Беуса среднее содержание ртути в континентальной литосфере (без осадочного чехла) равно $4,6 \cdot 10^{-6}$, а в гранитной оболочке – $3,3 \cdot 10^{-6}$. Во всех типах магматических пород уровни содержания ртути низкие и не превышают "n"· 10^{-6} мкг/кг. Более высокие концентрации установлены в осадочных породах, глинистых сланцах и особенно в сланцах, богатых органическим веществом (табл.3). По данным А.П.Виноградова глобальные кларки ртути (в $\text{n} \cdot 10^{-6}$) в различных типах горных пород следующие: ультраосновные породы – I; основные – 9; кислые – 8; осадочные (глины и сланцы) – 40. В песчаниках и карбонатных породах кларк ртути по А.А.Беусу равен соответственно 0,074 и 0,045 мг/кг; Х.Боузен оценивает содержание ртути в осадочных породах в 0,19 мг/кг. В базальтовых породах, гранитоидах, глинах, песчаниках, карбонатных породах средние содержания ртути согласно данным К.Турекяна и К.Ведеполя составляют ($\text{n} \cdot 10^{-6}$) 9,8, 40,3 и 4 соответственно.

Таблица 3. Ртуть в главных типах горных пород (по разным авторам приведены наиболее часто встречающиеся значения) – [9]

Тип горных пород	Содержание, мг/кг
Магматические породы	
Ультраосновные (дуниты, перидотиты, пироксениты)	0,0
Основные (базальты, габбро)	0,0X
Средние (диориты, сиениты)	0,0X
Кислые (граниты, гнейсы)	0,08
Кислые вулканические (риолиты, трахиты, дациты)	0,0X
Осадочные породы	
Глины	0,20–0,40
Сланцы	0,18–0,40
Песчаники	0,04–0,10
Известняки, доломиты	0,04–0,05

Таким образом, при использовании кларков литосферы и глобальных уровней в основных типах горных пород для оценок степени техногенного воздействия на окружающую среду, то есть при выделении техногенных геохимических аномалий в природных телах, основу которых составляют минеральные вещества земной коры (почвах, донных отложениях, взвесях, пылях, некоторых видах отходов и т.п.), наибольшую трудность будет представлять выделение аномалий небольшой интенсивности. Контрастные и средние по интенсивности аномалии (то есть наиболее опасные с экологических позиций) будут фиксироваться достаточно надежно.

Однако при экогеохимических и геогигиенических исследованиях, уделяющих главное внимание малому (локальному) геохимическому циклу, кроме сравнения с глобальными параметрами распределения, необходимо в каждом конкретном случае выявление местного (локального) фона химических элементов во всех изучаемых компонентах ландшафта. На наш взгляд, это особенно должно учитываться при изучении техногенных процессов и явлений в связи с воздействием химических элементов с малым кларком. Поскольку именно для этих элементов, по всей видимости, в различных ландшафтно-геохимических условиях существуют заметно меньшие пределы диапазона допустимых концентраций, прежде всего нижние, а интенсивность воздействия техногенных факторов наиболее сильная. Для этих элементов характерно и так называемое "скрытое" воздействие, проявляющееся при незначительных превышениях пороговых (фоновых) уровней. Поэтому выявление интенсивности их концентрирования в предполагаемых зонах загрязнения должно базироваться в большей степени на местных фоновых параметрах их распределения. Необходимость детального изучения фоновых параметров распределения ртути в различных компонентах природной среды отмечалось исследовательской группой ВОЗ по разработке гигиенических критериев состояния окружающей среды для ртути [24]. Однако параметры фонового распределения ртути в различных компонентах окружающей среды изучены недостаточно полно. Имеющиеся данные различных авторов достаточно разнообразны, причем во многих случаях различаются не только фоновые оценки, но и оценки среднего (глобального) распределения ртути в окружающей среде (табл.4-10).

Анализируя в целом приводимые данные по фоновому распределению ртути в окружающей среде можно прежде всего отметить тот факт, что ее абсолютные природные концентрации в различных средах и компонентах настолько низкие, что вряд ли могут приводить к существенному поступлению в организм человека с последующим негативным

Таблица 4. Фоновые параметры распределения ртути в атмосфере

Показатель, регион	Содержание (среднее и/или пределы)	Автор
<u>Пары ртути, нг/м³</u>		
Фон в приземном слое атмосферы	0,2-10	Люнассон, Бойль, 1972
Фон в приземном слое атмосферы	2-3	Фукузака, 1986
Средняя концентрация в незагрязненных районах	20	Гигиенические критерии... Ртуть, 1979
Фон пригородных районов промышленных городов	10	Методические рекомендации..., 1986
Фоновые уровни в приземном слое атмосферы, Центр.Казахстан	15	Рассчитано по данным Ровинского и др., 1979
<u>Аэрозольная ртуть, нг/м³</u>		
Фон для Северной и Центральной Европы	0,02	Хейндрикс и др., 1974
<u>Пылевые выпадения, мг/кг</u>		
Фон	0,01	Саэт и др., 1990
<u>Дождевая вода, мкг/л</u>		
Фон	0-0,2	Гигиенические критерии... Ртуть, 1979
Фон для Центр.Казахстана	0,05-0,16	Ровинский и др., 1978
<u>Снег или лед, нг/кг</u>		
Лед Гренландии	6	Вайс и др., 1971
Фон в снеге	70	Джонелс и др., 1967

Таблица 5. Ориентировочные средние фоновые параметры распределения ртути в почвах

Показатель, регион	Содержание, мг/кг (среднее и/или пределы)	Автор
Среднее в почвах мира	0,06	Боузен, 1979
"	0,1	Ким, Верру, 1982
"	0,01	Виноградов, 1962
Фон в почвах	0,05	Смыт, 1985
Фон в дерново-подзолистых почвах	0,009-0,01	Методические рекомендации..., 1986
Фон в камташовых почвах, Центр.Казахстан	0,0127	Смирнова, 1975
То же	0,01	Собственные данные
Фон в почвах Мордовии	0,06	"
Лесные почвы СМА	0,06	Эрдман и др., 1976
Почвы СМА (разные типы)	0,05-0,13	Маклетт, Бернген, 1984
Фон в почвах	0,07 (0,02-0,15)	Аржано, 1984

Т а б л и ц а 6. Ориентировочные фоновые и средние содержания ртути в наземной растительности

Показатель, растение, регион	Содержание (среднее и/или пределы)	Автор
Фон в наземных растениях	0,03–0,7 мг/кг сухой массы	Адриано, 1984
Среднее в наземных растениях	0,015 мг/кг сухой массы	Ковальский, 1974
Фон в растениях	0,001–0,07 мг/кг сырой массы	Джонассон, Бойль, 1972
Фон в наземной растительности Центр.Казахстан	0,02–0,06 мг/кг сухой массы	Ровинский и др., 1978
Среднее в зеле растений	$0,1 \cdot 10^{-6}\%$	Малюга, 1963

Т а б л и ц а 7. Ориентировочные фоновые уровни ртути в некоторых видах сельскохозяйственных растений

Растение	Содержание, мг/кг	Масса	Автор
Фон в сельскохозяйственных растениях (обобщенные данные)	0,003–0,010	Сухая	Саэт и др., 1990
Свежие овощи	0,002–0,004	Сырая	Сакс, Маккинли, 1979
Картофель	0,01	"	"
Томаты	0,01	"	"
Зерновые	0,01–0,02	"	"
Яблоки	0,04	"	"
Пределное содержание в пищевых растениях	0,05	"	Кабата-Пендиас, Пендиас, 1987

воздействием. Поэтому реальное воздействие ртути на живые организмы будет проявляться в наиболее "горячих" точках, обусловленных как природными, так и техногенными факторами, где уровни концентрирования ртути могут достигать и превышать имеющиеся на сегодня гигиенические нормативы (табл. II) и резко превышать местный геохимический фон.

Т а б л и ц а 8. Ориентировочные фоновые и средние уровни содержания ртути в природных водах

Показатель, регион	Содержание (среднее и/или пределы)	Автор
<u>Растворенные формы, мкг/л</u>		
Речные воды (среднее)	0,07	Ливингстон, 1963
Природные воды (в целом)	0,01–0,1	Беус и др., 1976
Фон в пресных водах	0,2	Гигиенические критерии... Ртуть, 1979
Фон в колодезной воде	0,01–0,05	"
Вода питьевого качества	0,03	"
Среднее в пресных водах	0,1	Боузэн, 1979
Фон в пресных водах	0,01	Фёрстнер, Виттманн, 1979
Среднее в реках мира	0,07	Шолкович, Прайс, 1981
Фон в озерах Центр.Казахстана	0,02–0,06	Ровинский и др., 1978
Пресная вода	0,03	Адриано, 1984
Нормальные грунтовые воды	0,05	"
Морская вода	0,1	"
Океанические воды	0,03	Виноградов, 1967
Малые реки Московской обл.	0,066	Собственные данные
Речные воды, бассейн р.Нуры, Центр.Казахстан	0,08	"
<u>Взвешенные формы, мкг/л</u>		
Малые реки Московской обл.	0,002	"
Речные воды, бассейн р.Нуры, Центр.Казахстан	0,06	"
<u>Взвесь, мг/кг</u>		
Малые реки Московской обл.	0,089	"

Таблица 9. Фоновые параметры распределения ртути в донных отложениях пресноводных экосистем

Показатель, регион	Содержание, мг/кг (среднее и/или пределы)	Автор
Фон в донных отложениях озер Центр. Казахстана	0,1-0,2	Ровинский и др., 1978
Среднее содержание в пелитовых отложениях озер Евразии	0,29	Фёрстнер, 1977
Фон в донных отложениях пресноводных экосистем	0,01-0,7	Джонассон, Бойль, 1972
Фон в речных отложениях бассейна р. Нуры, Центр. Казахстан	0,044	Собственные данные

Таблица 10. Ориентировочные фоновые и средние содержания ртути в водной растительности

Показатель, растение, регион	Содержание (среднее и/или пределы)	Автор
Фоновые уровни в макрофитах, Канада	0,035-0,050 мг/кг сухой массы	Мортимер, 1985
Фоновые уровни в гидрофитах, Центр.Казахстан	0,05 мг/кг сухой массы	Собственные данные
Фоновые уровни в гидрофитах рек Мордовии	0,05 мг/кг сухой массы	"
Фон в морских растениях	10-100 мг/кг сырой массы	Адриано, 1984
Среднее содержание в морских водорослях	0,03 мг/кг сухой массы	Ковалевский, 1967

Таблица II. Гигиенические нормативы (ПДК - предельно допустимые концентрации) ртути

Воздух рабочей зоны, ПДК Р.з.	Атмосферный концентрация, ПДК В.	Вода источников загрязнения, ПДК В.Р.	Почва, мг/кг				Пищевые продукты растительного происхождения, мг/кг	
			показатели вредности		общесоединенный	воздушный		
			транслюционный	миграционный				
10,0	0,3	0,5	1,0	2,1	33,3	2,5	5,0 0,01 0,02 0,01	

П р и м е ч а н и е: ПДК_{Р.з.} - воздух рабочей зоны производственных помещений; ПДК_{сс} - среднесуточное; ПДК_В - в воде водных объектов хозяйственного и культурно-бытового и водопользования; ПДК_{В.Р.} - в воде водоемов, используемых для рыбохозяйственных водоемов; ПДК_П - в верхнем слое почв, приведены стандарты, утвержденные byvimi Minzdravom SSSR.

3. Производство и использование
ртути

В промышленности для получения металлической ртути используют два варианта технологии ее извлечения из руд: окислительно-дистилляционный обжиг с выделением ртути из газовой фазы и комбинированный способ, включающий предварительное обогащение и пирометаллургическую переработку концентратов. Возможны также гидрометаллургические способы извлечения ртути из руд и концентратов путем растворения сульфида ртути в сульфидах щелочных металлов с последующей цементацией ртути металлами (алюминием, цинком, железом и др.).

По содержанию ртути руды обычно делятся на очень богатые, или штучные (5-10% и более ртути), богатые (около 1%), рядовые (0,2-0,3%), бедные (0,06-0,12%), убогие (0,02-0,06%) и ртутьсодержащие (0,01-0,00001%). В свою очередь месторождения ртути по масштабам добычи, разведанных запасов и прогнозных ресурсов разделяют на: 1) уникальные - с суммарными запасами более 200 тыс.т; 2) очень крупные - 50-200 тыс.т; 3) крупные - от 10 тыс. до 50 тыс.т; 4) средние - 1-10 тыс.т; 5) небольшие - 0,1-1 тыс.т; 6) мелкие - 10-100 т; 7) очень мелкие - до 10 т; 8)rudопроявление - внemасштабные [3].

Всего в мире зафиксировано около 5 тысяч ртутных месторождений, рудных участков иrudопроявлений, получивших самостоятельное название; из них в разные годы разрабатывались около 500 [29]. В настоящее время добыча ртути ведется в основном на крупных, или же богатых месторождениях Испании, Алжира, США, Мексики, Турции, бывшего СССР. За всю историю развития ртутной промышленности 3/4 суммарного ее количества получено на шести крупнейших месторождениях: Альмаден (Испания), Идрия (Югославия), Монте-Амиата (Италия), Хуанкавелика (Перу), Нью-Альмаден и Нью-Идрия (США) [29]. На сегодня разведанные запасы ртути в промышленно развитых и развивающихся странах оцениваются примерно в 150 тыс.т (табл. I2). По имеющимся данным общее производство ртути в вынешнем столетии составило $4,36 \cdot 10^5$ т [19]. Несмотря на заметные ежегодные колебания, средний темп увеличения производства ртути до 1970-х годов составил около 2% (табл. I3). Во второй половине 1970-х годов отмечается падение спроса на ртуть на мировом рынке, сокращение производства и снижение цен. Это было в значительной мере связано с проблемой загрязнения окружающей среды, в первую очередь с отголосками "ртутных событий" в Японии. С 1978 г. Международная ассоциация производителей ртути начала вводить жесткий контроль над добычей, пос-

таблица I2. Мировые разведанные запасы и ресурсы ртути, тыс.т, обобщение [3]

Регион	Страна	Разведанные запасы	Прочие ресурсы ^I	Всего	Содержание ртути в руде, %
Западная Европа	Испания	50	188	188	0,5-2,0 (до 4)
	Италия	12	57	69	0,45-0,73
	Другие	18	53	71	-
Северная Америка	США	12	15,5	27,5	0,33-0,41
Америка	Канада	4	8,0	12,0	0,1-0,4
Центральная и Южная Америка	Мексика	8,5	16,5	25,0	0,5-1,0
	Другие	1	9,5	10,5	-
Африка	Алжир	17	1,0	18,0	0,5-5,0
Азия	Турция	2	5,0	7,0	0,5-1,0
	Другие	17	34,5	51,5	1,7
Всего		141,5	338,0	479,5	0,1-5,0

^I Экономичны при повышении цен на 50% и могут быть добыты в обозримом будущем.

ставками и ценами, что, естественно, привело к снижению производства. С 1980 г. наблюдается примерное равенство спроса и предложения на ртуть - 5-6 тыс.т/год [3]. Ведущими производителями ртути в нынешнем порядке являются: бывший СССР, Испания, Алжир, США, Китай [33].

Активные меры, принимаемые многими странами в области охраны окружающей среды, привели к широкому повторному использованию ртути. Предполагается, что к 2000 г. около 25-30% потребности будет удовлетворяться за счет вторичной ртути (табл. I4).

В течение XX столетия структура прикладного использования ртути претерпела значительные изменения. Так, почти полностью сокращено ее использование для амальгамирования золота при его добычи, для производства взрывчатых веществ, косметических средств, фетра; заметно сокращено использование в медицине и фармакологии. Однако наблюдалось резкое возрастание применения ртути во многих других отраслях промышленности, прежде всего в химической, электротехнической, приборостроительной.

Таблица I3. Добыча ртути в США и остальных странах, тонны [9,19,24,44]

Год	США	Остальные страны	Год	США	Остальные страны
1933	-	2000 ^I	1965	666	8442
1951	278	4750	1966	748	8262
1952	426	4707	1967	809	7081
1953	487	4952	1968	982	7848
1954	630	5490	1969	1008	8854
1955	644	5645	1970	928	8725
1956	820	6692	1973	-	9250
1957	1177	6893	1974	2051	8880
1958	1294	7070	1975	240	8700
1959	1063	6485	1976	?	8280
1960	1130	7098	1977	?	6860
1961	1076	7083	1978	?	6070
1962	893	7437	1980	1060	?
1963	650	7498	1985	470	?
1964	480	8194	2000	1496	14000

^I С учетом США.

Таблица I4. Источники получения ртути, % [3]

Вид сырья	1969-1970 гг.	1971-1980 гг.	1981-1990 гг.	1991-2000 гг.
Собственно ртутные руды	88,0	74,8	76,2	56-65
Попутная продукция	2,1	3,4	6,6	10-14
Вторичная ртуть	9,9	21,8	17,2	25-30

В настоящее время ртуть и ее соединения используются при получении хлора и каустической соды, при производстве ацетальдегида, хлорвинила, электроприборов (лампы, реле, батареи и т.п.), контрольно-измерительных приборов и другой радио- и телеаппаратуры. В последние годы расширяется использование ртути при производстве полиуретанов, антракинола. Кроме того, ртуть и ее соединения применяются в медицине и фармацевтической промышленности (при изготовлении глазных и кожных мазей, различных веществ бактерицидного

действия, антисептиков, при производстве витамина В₁₂, в стоматологии), сельском хозяйстве (ядохимикаты, антисептики), при производстве красок, в вакуумной технике, в военном деле (детонаторы, управляемые снаряды), для получения сверхчистых металлов и точного литья, в горном деле (производство гремучей ртути). В энергетике ртуть используется как рабочее тело в мощных бинарных установках промышленного типа, где для генерации электроэнергии на первых ступенях применяются ртутно-паровые турбины. Кроме того, ртуть широко используется в ядерных реакторах для отвода тепла и в лабораторной практике.

П. Корринга и П. Хагель [24] обобщили данные по среднему потреблению ртути различными отраслями промышленности в индустриальных странах (в 1974 г.), которые выглядят следующим образом: хлорно-щелочное производство - 25%; электрооборудование - 20%; краски - 15%; контрольно-измерительные приборы - 10%; сельское хозяйство - 5%; стоматология - 3%; лабораторная деятельность - 2%; прочее применение (в том числе применение в качестве катализаторов, антикоагулянтов в целлюлозной промышленности, фармацевтика и косметика, военные нужды) - 20%. В 1990-х годах в структуре потребления ртути начинает резко преобладать электротехника (более половины общего количества используемой ртути в развитых странах); по-прежнему велико значение хлорно-щелочного производства, приборостроения. Существующие прогнозы показывают, что, во-первых, следует ожидать увеличение общего использования ртути; во-вторых, это увеличение будет вызвано более интенсивным применением ртути прежде всего в производстве красителей, в электротехнике, при производстве батареи. Одновременно ожидается резкое снижение использования ртути при производстве хлора и каустической соды, что в итоге резко изменит структуру потребления ртути в ближайшие 10-20 лет (табл. 15). В ряде стран применение ртути в целлюлозо-бумажной промышленности запрещено (например, в Швеции и Финляндии с 1968 г.).

4. Поступление ртути в окружающую среду

В 1972 г. С. Йенсен и А. Йернелов высказали предположение о наличии двух разных круговоротов ртути в окружающей среде - глобальном, включающем циркуляцию паров ртути в атмосфере, и локальном, основанном на предполагаемой циркуляции летучих соединений диметилртути. Основная часть вовлекаемой в глобальный круговорот ртути происходит из природных источников. В локальном круговороте преобладает ртуть, поступающая преимущественно в результате техногенной

Т а б л и ц а I5. Фактическое и планируемое применение ртути в различных отраслях промышленности в США
(в тоннах) [19,35,44,50]

Область применения	1969 г.	1974 г.	2000 г.	2025 г.
Производство хлорной и каустической соды	713,1	582	0	0
Производство красителей	336,2	235	244	355
Производство пестицидов	92,5	34	24	27
Катализаторы	100,2	45	58	70
Фармацевтические препараты	23,6	21	38	36
Зубоврачебное дело	94,8	104	100	115
Лабораторное дело	57,2	16	21	27
Измерительные приборы	-	173	142	180
Электронные лампы, переключатели, реле	-	60	86	213
Батареи	-	613	787	1028
Лампы, осветители	-	47	114	179
Деревообрабатывающая и бумажная промышленности	19,0	-	-	-
Прочие области применения	675	121	159	139
Всего	2111,6	2051	?	2369

П р и м е ч а н и е: Прочерки (-) - нет данных.

деятельности. Следовательно, рассматривая поступление ртути в окружающую среду, следует различать две основные группы источников: природные и антропогенные (рис. I). Количество оценки этих двух групп источников, к сожалению, очень противоречивы и неполны, поскольку во многих случаях основаны на различных допусках и приближениях. Однако на сегодня можно с уверенностью считать, что глобальный круговорот ртути всецело определяется ее поступлением из природных источников, которые, по-видимому, существенно превышают антропогенные. В то же время, антропогенные источники являются наиболее важными с точки зрения локального загрязнения окружающей среды, то есть с экологических и геогигиенических позиций. Естественно, что как техногенные источники вносят свой определенный вклад в глобальное загрязнение ртутью, так и с природными источниками может быть связано значительное локальное загрязнение.

По оценке Объединенного комитета экспертов ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам, выполненной в 1972 г., за счет естественных процессов в окружающую среду может поступать от 25000 до 150000 т ртути в год [24]. По данным Р.Хейнрикса с соавторами [24], ежегодно из земной поверхности на континентах высвобождается 50000 т ртути. П. Корнинга и П.Хагель [24] оценивают минимальное поступление ртути из природных источников (до 1900 г.) примерно в 30000 т. По данным А.А.Саукова (1953 г.), с осадками на земную поверхность ежегодно поступает 100000 т ртути (из всех источников). Происхождение ртути, высвобождаемой в ходе естественных процессов, до конца не выяснено. Считается, что основным источником служит общая дегазация земной коры и океана, причем для континентальных шельфов это поступление составляет $49 \cdot 10^{-6}$ г/м²·год, а для океанов и полярных районов $4,5 \cdot 10^{-6}$ г/м²·год [19]. По самым грубым прикидкам это может составить порядка 8-10 тыс.т/год. Здесь следует отметить следующее: по всей видимости, рассматривая поступление ртути в связи с процессами дегазации, следует различать, во-первых, дегазацию (испарение) ртути из верхнего слоя литосферы (то есть дегазацию почв и горных пород), которая может происходить по существующим предположениям путем восстановления ртути в почве в ходе химического процесса, находящегося в зависимости от локального окислительно-восстановительного потенциала, или при восстановлении в результате деятельности микроорганизмов, существование которых вполне доказано [19]. Во-вторых, собственно планетарную дегазацию, прежде всего ртутную дегазацию верхней мантии. Как отмечает Н.А.Озерова [21], в современном выражении процессы ртутной дегазации мантии наиболее четко фиксируются в срединно-океанических хребтах, Курило-Камчатском вулканическом поясе и в газовых месторождениях линеамента Карпинского, проявляясь как синхронно с вулканизмом, так и вне связи с ним. Приведенные несколько выше показатели и объемы ртутной дегазации относятся, безусловно, к дегазации почв и горных пород и, по всей видимости, могут реально отражать хотя бы порядок процесса. Так, по некоторым данным, приводимых В.П.Федорчуком [29], дегазация почвенного слоя дает 8300 т/год ртути. Интересные данные представлены Х.Боузеном (табл. I6,I7), основываясь на которых, можно рассчитать (естественно при целом ряде допущений), что в результате дегазации из почв ежегодно теряется 7-14 тыс.т ртути. Как видим, порядок цифр тот же самый.

Количественные оценки мантийной дегазации по сути отсутствуют, либо единичны. Так, по имеющимся данным вулканы играют важную роль

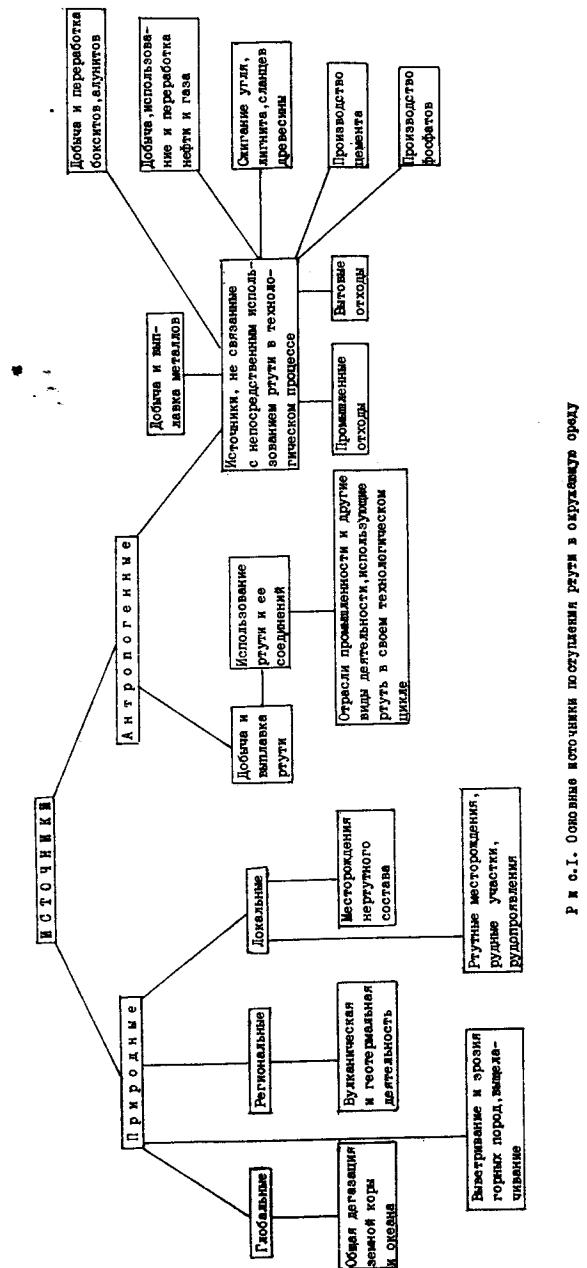


Рис. 1. Основные источники поступления ртути в окружающую среду

в балансе ртути в атмосфере [46]. Эти авторы провели оценку выноса ртути из главного жерла вулкана Килауэа на Гавайских островах, составившего за период с 1971 г. по 1980 г. около 260 т/год. В.П. Федорчук приводит данные Д.Варекампа и соавторов, показывающих, что из вулканов в атмосферу поступает в общей сложности до 7000 т ртути в год [29]. По другим оценкам глобальный выброс ртути в атмосферу вулканами может колебаться в пределах 11-3000 т/год [36]. П.Русен дает следующие цифры: дегазации потухших вулканов - 30 т, активных - 800 т ртути в год. Значимость поставки ртути вулканами, как и геотермальными источниками, отмечалась еще В.И.Вернадским. Однако приводимые данные очень различаются и практически несопоставимы.

Таблица 16. Расчетный ввод и вывод ртути для умеренно загрязненных культурных почв [34]

Процессы		Мг/м ² /год
Ввод	Выветривание горных пород	0,0013
	Удобрения	0,15
	Дождевая вода и пыль	0,05
	Выход	0,009-0,08
	Отчуждение с урожаем	0,01
	Дренаж	0,05

Таблица 17. Расчетный ввод и вывод ртути для невзагрязненных и не используемых почв [34]

Процессы		Мг/м ² /год
Ввод	Выветривание горных пород	0,0013
	Дождевые воды и пыль	0,006
	Биомасса	0,08
	Дренаж	0,02
	Дегазация	0,1

В результате процессов естественного выветривания и выщелачивания горных пород высвобождается от 230 т ртути [36] до 5000 т ртути [33] в год. По имеющимся данным в результате мобилизации

при выветривании горных пород в круговорот ежегодно включается 2500 т ртути [34]. Данные, приводимые Х.Боузеном (см.табл.17), позволяют получить цифру примерно в 130 т/год, но при условии, что в почвах содержатся фоновые уровни ртути. Если предположить, что большая часть высвобождаемой ртути в итоге попадает в океан, то опираясь на данные К.Турекяна (1969) и В.Гордеева (1983), можно рассчитать сток ртути в океан с речными водами, который составит для растворенных форм порядка 2800 т, для взвешенных около 1800 т в год, что в сумме составит около 4600 т. Эта цифра близка к данным П.Корринга и П.Хагеля [24], определивших, что вынос "природной" ртути реками в океан составляет около 5000 т/год. Определение концентраций ртути в воздухе показывает, что дисперсия почвы в атмосферу не является существенным источником ртути [24]. Имеющиеся оценки свидетельствуют, что с пылью, поднятой ветром, в атмосферу поступает 5-30 т ртути в год [36].

Как уже отмечалось, с перечисленными выше процессами связано, главным образом, глобальное и региональное рассеивание ртути в окружающей среде. Хотя, естественно, в районах активной вулканической и геотермальной деятельности может фиксироваться и чрезвычайно интенсивное локальное загрязнение территории.

Еще более значимое локальное загрязнение формируется в районах ртутных месторождений, где в различных компонентах окружающей среды фиксируются контрастные аномалии ртути. Более того, как показано Н.А.Озеровой [21], ртуть образует промышленные концентрации и в гидротермальных месторождениях нетрутного состава, прежде всего в колчеданных, полиметаллических, медных. Установлено также накопление ртути в железных и марганцевых рудах, бокситах, каустобалитах, мергелистых глинах, сланцах, известняках и доломитах, в месторождениях углей, нефти и природного газа. По масштабам ртутности и промышленной значимости можно составить следующий ряд нетрадиционного ртутьсодержащего минерального сырья [3]: свинцово-цинковые баритсодержащие месторождения (запасы ртути до нескольких тысяч тонн); медноколчеданные (до нескольких тысяч тонн); колчеданно-полиметаллические (несколько десятков тонн); медно-никелевые (несколько десятков тонн); свинцово-цинковые (несколько тонн, до первых десятков тонн); угольные (до нескольких десятков тысяч тонн); нефтяные (до нескольких сот тонн); природного газа (до первых тысяч тонн); медно-порфировые и медистые песчаники (первые десятки тонн); железные руды, бокситы, алуниты (первые десятки тонн);нерудное сырье (несколько тонн, до первых десятков тонн).

Детальный анализ ртутности рудных и газонефтяных месторождений позволил Н.А.Озеровой [21] выделить ртутнорудные пояса нового типа, что значительно расширяет площадь воздействия указанных месторождений как источников ртути. К сожалению, каких-либо количественных оценок поступления ртути в окружающую среду в районах размещения как ртутных, так и ртутьсодержащих месторождений (без внимания человеческой деятельности) практически не существует. Однако естественным было бы предположить, что на данных территориях интенсивность мобилизации ртути в результате процессов выветривания и выщелачивания, дегазации почв и горных пород, вулканической деятельности, мантийной дегазации будет значительно выше, чем в фоновых районах. Подтверждением этому являются многочисленные данные о чрезвычайно высоких концентрациях ртути во всех компонентах окружающей среды - воздухе, почвах, биоте, водах. По всей видимости, здесь в результате естественных процессов может высвобождаться не меньшее количество ртути, чем на "фоновых" территориях, то есть порядка 10 тыс. т/год. С учетом вулканической и геотермальной деятельности эта цифра может быть увеличена в 1,5-2 раза. Таким образом, общее количество ртути, ежегодно высвобождающееся в окружающую среду и поступающее в глобальный круговорот, может включать: дегазации почв и горных пород - 10-14 тыс.т; выветривание - 2-4 тыс.т, дегазацию и вулканическую деятельность в ртутных поясах - 15-20 тыс.т; прочие источники (золовая эрозия, испарение с морской поверхности, лесные пожары и т.п.) - десятки тонн, что в сумме дает примерно 30-40 тыс.т. Эти цифры близки выше приведенным данным Р.Хейндрикса и соавторов, предполагающим, что ежегодно из земной поверхности на континентах высвобождается 50000 т ртути, а также оценкам П.Корринги и П.Хагеля (30000 т). Последние оценки [36] свидетельствуют о том, что за счет общей дегазации всей земли в атмосферу ежегодно поступает 30000 т ртути. В то же время, имеются указания, что приводимые максимальные цифры могут быть увеличены до 150000 т в год с учетом возможных неточностей в определении природного глобального высвобождения ртути [24].

Существующие оценки глобального поступления ртути в окружающую среду от антропогенных источников также противоречивы. Так, по данным, приводимым К.А.Булгуневой [15], ее общее поступление в результате человеческой деятельности составило в 1975 г. около 20000 т. По предположению П.Корринги и П.Хагеля [24], в атмосферу ежегодно выбрасывается из антропогенных источников 16000 т ртути. По другим данным в результате хозяйственной деятельности человека ежегодно

в окружающую среду поступает в 80 раз больше ртути, чем за счет природных процессов, причем по сравнению с другими тяжелыми металлами это отношение у ртути самое большое [43]. По данным этих авторов более 70% от ее производства в США необратимо рассеивается в окружающей среде. Думается, что резкое преобладание антропогенного ввода ртути над природным фиксируется лишь локально. Например, выделение ртути в результате хозяйственной деятельности человека в Нидерландах в 100 раз превышает высвобождение ртути в процессе естественной дегазации. В то же время, имеются данные, оценившие как природный, так и техногенный потоки ртути значительно меньшими цифрами (табл. I8), что вряд ли правомочно.

Количество ртути, поступающее в окружающую среду при разработке и выплавке этого металла, оценить трудно; точнее, еще не ставилась такая задача. По некоторым глобальным оценкам при уровне производства ртути в 10000 т/год можно ожидать выделение в атмосферу порядка 300 т ртути в год [24]. Однако к этому следует добавить значимое количество ртути, поступающей со стоками, шламами в водные системы, а также захороняющейся в отвалах горных пород. На масштабах возможного воздействия могут свидетельствовать данные по добыче ртути на наиболее крупных месторождениях. Так, за последние 100 лет при эксплуатации месторождения Монте-Амиата было извлечено 100000 т ртути, а на месторождении Альмаден за 2000 лет – около 500000 т [29]. В настоящее время на месторождении Альмаден добывается 1500–2000 т ртути. Имеющиеся данные позволяют предположить, что при добыче и производстве ртути может теряться до 15–20% от общего добываемого и произведенного количества. Следует также отметить, что при разработке месторождений заметно интенсифицируются и "чисто" природные процессы поставки ртути в окружающую среду (выветривание, выщелачивание и т.п.). Таким образом, при добычи и производстве ртути в окружающую среду может поступать около 2 тыс.т этого металла ежегодно.

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды ртутью являются производства, использующие ее в своем технологическом цикле. Именно с ними и связаны все наиболее известные экстремальные экологические ситуации, обусловленные загрязнением ртутью. Так, при производстве каустической соды, ацетальдегида, хлорвинила образуются отходы, содержащие значительное количество ртути. Как известно, в промышленности каустическую соду получают электролизом раствора поваренной соли с ртутным катодом или диафрагмой. В нашей стране наибольшее применение нашел метод электролиза с ртутным

т а б л и ц а I8. Мировое производство ртути и ее поступление в окружающую среду [33]

Период	Производство, тонны	Поступление, тонны			Среднегодовое поступление за указанный период, тыс.т			Общее поступление, тыс.т	
		Воздух	Вода	Почва	Воздух	Вода	Почва		
до 1900 г.	200000	232000	37000	252000	-	-	-	-	
1900–1909	34300	39800	6300	43300	4	0,63	4,3	8,9	
1910–1919	37600	43600	6900	47500	4,4	0,69	4,8	9,9	
1920–1929	37800	43800	7000	47800	4,4	0,7	4,8	9,9	
1930–1939	35900	41600	6600	45300	4,2	0,66	4,5	9,4	
1940–1949	61500	71300	11400	77800	7,1	1,1	7,8	16	
1950–1959	65000	75400	12000	82200	7,5	1,2	8,2	16,9	
1960–1969	78500	91100	14500	99200	9,1	1,5	9,9	20,5	
1970–1979	87600	102000	16200	111000	10,2	1,6	11,1	22,9	
Общее	638000	741000	118000	806000					

катодом. Мировое производство каустической соды по ртутному методу составляет порядка 15 млн.т, в том числе у нас 3 млн.т (Даценко и др., 1986). При получении соды этим способом используется большое количество ртути, соединения которой выделяются в воздух и переходят в раствор и со сточными водами поступают в водные системы. Значительные количества ртути накапливаются в шламах и осадках сточных вод, что не исключает ее попадание в ландшафт. Кроме того, при разложении амальгам и получении раствора едкого натра образуется определенное количество хлоридов ртути, которые в дальнейшем попадают со щелочью в различную продукцию (Цыганков и др., 1979). Большие потери ртути возможны также при чистке электролизеров в случае различных неполадок в технологическом процессе. Согласно имеющимся данным, основное количество ртути теряется с растворами, хотя в некоторых случаях отмечено высокое содержание паров ртути и в отходящих газах. Суммарное количество потери ртути для установки мощностью 100 т хлора в сутки составляет 30 кг/сут., что эквивалентно 10 т/год (Цыганков и др., 1979). По данным Р.Брукса [31], на заводах по производству каустической соды в Онтарио потери ртути составляют 15 кг/сутки, что за 10 лет превысило 100 т. В Швеции

ежегодно производится 220000 т хлора, причем в процессе получения 1 т хлора в сточные воды попадает 150–200 г ртути, или около 25–35 т/год [7]. Значительное количество ртути используется и при производстве ацетальдегида. Гидратация ацетилена идет в присутствии сернокислой ртути, которая образуется непосредственно в гидраторе при взаимодействии металлической ртути с сернокислым окисным железом в растворе серной кислоты. Ртуть попадает в окружающую среду с газообразными выбросами, а главное со сточными водами и твердыми шламами (осадками сточных вод), которые во многих случаях могут подвергаться термической переработке. Есть данные, показывающие, что даже при всех возможных мерах улавливания общие потери ртути не удается снизить менее чем до 150 г на 1 т конечного продукта, то есть при производстве 100000 т ацетальдегида в год в окружающую среду поступает около 15 т ртути (Цыганков и др., 1979). Например, в Минамате, где расположены заводы по производству ацетальдегида и хлорвинаила в период с 1952 по 1968 гг. в залив Минамата было сброшено со стоками от 200 до 600 т ртути [7].

По всей видимости, интенсивное загрязнение ртутью наблюдается в районе заводов по изготовлению атомных и водородных бомб. Каких-либо оценок по известным причинам в литературе не имеется. Однако по имеющимся упоминаниям, например в районе заводов по изготовлению водородных бомб в г. Ок-Ридже (шт. Теннесси, США) с 1953 г. выброс ртути в окружающую среду составил около 1000 т [41].

Данные о потерях ртути в других отраслях промышленности, использующих ее в технологическом процессе, разрознены и единичны. По всей видимости, наиболее интенсивные потери ртути могут происходить на предприятиях по производству красителей, измерительных приборов, электроламп и осветителей, пестицидов. По некоторым данным в странах БЭС ежегодно в сточные воды попадает 40 т ртути только в результате оказания стоматологической помощи населению [49]. В последние годы во многих странах возросло производство и потребление сухих гальванических элементов, применяемых во многих бытовых электроприборах и радиоаппаратуре. Например, в Японии около 50% потребляемой ртути приходится на производство этих батарей [48]. В одном сухом гальваническом элементе может содержаться от 0,2 до 1 г ртути. По данным С. Гото (1985), общее содержание ртути в сухих батареях в 1979 г. составило 144,3 т. В районе заводов по производству люминесцентных ламп могут отмечаться повышенные содержания ртути в различных компонентах окружающей среды.

Интенсивным локальным источником загрязнения может быть испо-

льзование ртути при добче золота. В частности, при разработках месторождений золота в районах Бразильской Амазонии все еще применяется примитивная ручная промывка золотого песка с применением ртути. На 1 кг добываемого золота расходуется около 2 кг ртути, однако, малоопытные старатели нередко расходуют до 10 кг ртути на 1 кг добываемого золота. В ходе промывки около 2/3 используемой ртути оказывается в реке. Согласно официальным сведениям Института золота Бразилии в 1984 г. в стране было добыто 55 т золота, значительная часть из которых старателями, то есть потери ртути в бассейне Амазонки могут быть очень велики (Amvio, 1986, XУ, № 4).

По имеющимся на сегодня данным считается, что примерно 50–70% ртути, используемой непосредственно в различных производственных процессах в конечном счете либо целенаправленно, либо случайно попадает в окружающую среду [36].

Таким образом, исходя из общего ежегодного количества потребляемой в мире ртути (порядка 7–8 тыс.т), "рутные" производства могут являться источниками поступления в окружающую среду примерно 4–5 тыс.т ртути ежегодно.

Значимым источником поставки ртути в окружающую среду может быть промышленная деятельность, не связанная с непосредственным ее использованием в технологическом цикле. Ведущее место отводится процессам, связанным с сжиганием различных видов топлива.

Так, многочисленными исследованиями установлено практически повсеместное присутствие ртути в углях [14]. Поэтому даже при очень низких концентрациях этого металла в углях на современные ТЭС и коксохимические заводы ежедневно поступает заметное количество ртути. Считается, что основная масса ртути выбрасывается в атмосферу с отходящими газами и летучей золой. По имеющимся данным, на коксохимических заводах около 60% содержащейся в шихте ртути участвует в коксохимическом производстве; остальное количество приходится на его отходы, причем отмечена значительная концентрация ртути в отвалах пород, смолах, надсыпных водах, газах, концентратах [6]. По ориентировочной оценке Л.В.Бобровой с соавторами [3] количество ртути, поступающей в теплоэнергетику бывшего СССР, достигает 134 т в год, то есть потенциально более 100т ежегодно рассеивается в окружающей среде.

В результате сжигания древесины в атмосферу по разным оценкам может поступать от 40–160 т до 197 т ртути в год [42].

Только в последние годы стали обращать внимание на тот факт, что определенное количество ртути может поступать при разработке

газовых, газоконденсатных, газонефтяных и нефтяных месторождений, а также, естественно, при переработке и сжигании этих видов сырья. Исследования Н.А.Озеровой показали, что содержания ртути в нефтях составляют обычно 10^{-6} - 10^{-5} % (0,01-0,1 г/т). Ртуть в углеводородных газах присутствует во всех крупных тектонических структурах: разновозрастных платформах и молодых складчатых сооружениях [21]. Ртутоносные газы залегают в отложениях практически всех стратиграфических горизонтов палеозоя, мезозоя и кайнозоя при самом разнообразном литологическом составе пород - коллекторов.

На известном газовом месторождении Гронинген в Нидерландах в 1977 г. при годовой добыче газа в 100 млрд.м³ высвободилось 20 т ртути, которая извлекается в целях охраны окружающей среды, чтобы газ с высокой концентрацией ртути не поступил к потребителю. В многих случаях, в том числе в нашей стране, этого не делается.

Существуют довольно многочисленные оценки поставки ртути в окружающую среду при сжигании различных видов топлива. Так, по данным Р.Хайдрикса и соавторов [24], сжигание угля и ликнита сопровождается выделением в атмосферу 3000 т ртути в год, очистка и сжигание нефти и природного газа - 400 т ртути в год. По оценке П.Корнинги и П.Хагеля [24] за счет сжигания угля в атмосферу выделяется 3000 т ртути, за счет сжигания нефтепродуктов - 1250 т, природного газа - 250 т, что в сумме составляет 4500 т в год. Х.Боузен [34] считает, что за счет сжигания разных видов топлива в окружающую среду ежегодно выделяется 8400 т ртути.

Близкие цифры - с углем до 3000 т/год, с нефтью 400-1500 т, со всеми видами топлива от 1600 до 5000 т/год - приводятся в ряде других работ [37, 36].

В ходе освоения большого количества ртутьсодержащих месторождений и последующей переработки руд определенное количество ртути будет высвобождаться в окружающую среду, как с выбросами в атмосферу, так и со сточными водами в водные системы, а также захороняться в отвалах. По существующим глобальным оценкам при переработке сульфидных руд только в атмосферу может ежегодно высвобождаться до 2-2,2 тыс.т ртути [24]. О масштабах воздействия этого процесса свидетельствуют данные Л.В.Бобровой с соавторами [3] о том, что в цветной металлургии при современных мировых производственных мощностях возможно получение следующего количества попутной ртути: на цинковом заводе до 12 т; свинцовом - 2-3, медном комбинате на базе медноколчеданных руд - 1,5-2; медном комбинате на базе существенно медных руд - 0,8; глиноземный комбинат на базе бок-

ситового сырья - 0,7-1,5, а на базе алюнитового сырья - 0,3-0,8 т. Как отмечает Н.А.Озерова [21], в том случае, когда содержания ртути в рудных концентрататах повышены, но масштабы переработки невелики, ртуть не представляет особо серьезной опасности. Однако, если объем продукции достаточно велик, то даже при значительно меньших содержаниях ртути высвобождающаяся при металлургическом переработке ртуть может значительно загрязнять окружающую среду. Так, расчеты, проведенные для месторождения Садбери, показали, что количество ртути, соответствующее ежегодной продукции никеля, изменяется тоннами. Аналогичное может происходить и при переработке океанических железо-марганцевых конкреций, учитывая масштабы их добчи и высокие содержания в них ртути (до 2 г/т).

Определенные проблемы могут возникать при переработке и использовании различных осадочных пород (доломитов, мергелей и мергелистых глин, известняков, сланцев и др.). Имеются указания на то, что переработка горючих сланцев может сопровождаться значительным выделением ртути в окружающую среду, поскольку они характеризуются значимыми концентрациями ртути - от среднего 0,5 г/т до локально-высокого 2 г/т [14]. По данным упомянутых выше Р.Хайдрикса и соавторов при производстве стали, цемента и фосфатов в мире ежегодно выделяется в атмосферу до 500 т ртути. По данным Вуда и Гольдберга (1977), при производстве цемента высвобождается 100 т ртути в год. Возможно, что процессы, связанные с переработкой осадочных пород, могут в конечном счете поставлять в окружающую среду более значимые количества ртути. Так, интенсивно окварцованные песчаники в районах развития ртутнорудных полей кварц-дикитового типа содержат ртуть в количестве до 0,06% [3]. Они используются в качестве строительного материала, причем ртуть - после дробления и грохочения - концентрируется в рудной дикитовой мелочи, причем при производительности карьера в 1 млн.м³/год количество ртути достигает 50 т.

Ртуть встречается в различных бытовых и промышленных отходах в виде разнообразных соединений - амальгам, неорганических солей, металлической ртути, органомеркуратов и др. Так, в 1984 г. в 37 млн.т бытовых отходов, образующихся на территории ФРГ, количество ртути достигало 186 т [43], причем при утилизации отходов примерно 145 т ртути захоронилось на свалках, а 40 т - попадало в атмосферу при сжигании отходов. Если исходить из среднего содержания ртути в бытовых отходах 5 г/т, то для территории США общее количество связанной с ними ртути составит более 1200 т, а для всего

мира будет измеряться несколькими тысячами тонн. Естественно, что еще большее количество ртути будет фиксироваться в промышленных отходах. По имеющимся оценкам только сжигание городского мусора дает ежегодное поступление ртути в атмосферу на уровне 390 т [50].

В существующих глобальных и региональных оценках техногенного поступления ртути в окружающую среду главное внимание уделяется ее выбросам в атмосферу. Однако анализ имеющихся данных свидетельствует о том, что огромные ее количества поступают непосредственно в водные системы, в отдельных случаях формируя локальные, экстремально сильные зоны загрязнения. Так, сточные воды промышленно-урбанизированных агломераций являются существенным источником поступления ртути в окружающую среду. Характерно, что высокие концентрации ртути фиксируются в стоках многих производств, а не только тех, в которых этот металл и его соединения используются в технологическом процессе (табл. I9). В частности, было показано, что около 200-400 кг ртути на 1 млн. жителей может сбрасываться городскими очистными сооружениями [37]. Для всей территории США это должно составить порядка 40-80 т ртути в год, а для всего мира около 1000 т. По данным Национальной Академии наук США глобальное поступление ртути в воду оценивается в 1300 т/год, в том числе 200т/год для США. По оценке Буда и Гольдберга (1977) в результате человеческой деятельности вынос ртути с суши в океан реками увеличился в 4 раза. Думается, что приводимые оценки все-таки значительно занижены. Так, например, в 1970 г. во всем мире образовалось и было сброшено в водоемы 9145 млрд.т стоков; даже при содержании в стоках ртути на уровне 0,5-1 мкг/л это в глобальном масштабе даст 4,6-9,2 тыс.т ртути, поступающей с ними в водные системы. Последняя цифра, на наш взгляд, более соответствует реальности.

По всей видимости, сбросы сточных вод и приводят к формированию наиболее критических экологических ситуаций, обусловленных загрязнением ртутью (Минамата, Ниигата, Ок-Ридж и др.). Интенсивность техногенного поступления ртути в водные системы может быть очень велика и многократно превышать природную. Например, в 1970-е годы р. Рейн в Северное море ежегодно выносилось более 90 т ртути (40-50 т в растворенных формах, 50-80 т со взвесью). Это более чем в 20 раз превышало количество ртути, которое высвобождается в результате выветривания горных пород [39].

При существующих уровнях развития систем очистки полностью исключить из сточных вод ртуть можно только путем проведения очень сложных и дорогостоящих мероприятий. Так, С.Герлах [7] приводит

следующий пример. В 1971 г. в Лос-Анджелес казалось бы были прекращены все источники поступления ртути в сточные воды. Тем не менее, ежедневно с 1,29 млн.м³ сточных вод, прошедших обработку на очистных сооружениях, выносилось 2-5 кг ртути.

т а б л и ц а I9. Содержание растворенной ртути в сточных водах некоторых производств, мкг/л

Производство	Среднее или пределы колебаний	Автор
Бумажная фабрика	2,0-3,4	Мур, Рамамурти [19]
Пивоваренный завод	2,0-4,0	"
Завод по производству удобрений	2,6-4,0	"
Хлорно-щелочное производство	80-2000	"
Гальванические производства	1-371000	Саэт, Ревич, Янин и др. [6]
Дождевой сток с территории города Рочестер (США)	18,1	Марфи, Карлео, 1978
Объединенный сток промышленного города (г.Подольск)	0,40-1,2	Собственные данные
Объединенный сток промышленного города (г.Саранск)	0,4-0,6	"

Итак, рассмотренные выше данные позволяют достаточно ориентировочно оценить поступление ртути в результате различных техногенных процессов, включающих добычу и переработку ртутных руд (2 тыс.т/год); "ртутные" производства (4-5 тыс. т/год); сжигание всех видов топлива (5-8,4 тыс. т/год); переработка сульфидных руд (2-2,2 тыс. т/год); производство стали, цемента, фосфатов (0,5 тыс.т/год); сжигания городского мусора (0,4 тыс.т). В итоге это дает около 14-19 тыс.т ртути в год, что хорошо соотносится с приводимыми ранее данными, оценивающими техногенный выброс ртути в 16 тыс.т и 20 тыс.т в год. В данном случае речь идет преимущественно о выбросах в атмосферу. Как указывалось, еще 5-10 тыс.т ртути ежегодно поступает в водные системы, то есть общее ежегодное антропогенное поступление ртути в окружающую среду составляет 19-29 тыс.т.

Таким образом, поступление ртути в окружающую среду осуществляется широкой группой как природных, так и антропогенных источников. Количественные оценки этих источников противоречивы и да-

леко неполны. В настоящее время наиболее реальными для природных источников может считаться 40–50 тыс.т ртути в год, а для антропогенных порядка 19–29 тыс.т ртути в год. Возможно, следует ожидать при дальнейших уточнениях заметного (до 100 тыс.т и более) увеличения доли "природной" ртути и незначительного (до 40–50тыс.т) "техногенной" ртути. В настоящее время глобальный круговорот ртути в большей степени определяется ее поступлением из природных источников. Антропогенные источники являются наиболее важными с позиций локального загрязнения окружающей среды. Однако как техногенные источники вносят свой вклад в глобальное загрязнение ртутью, так и с природными источниками может быть связано значительное локальное загрязнение. Принципиально важным является тот факт, что в результате действия техногенных процессов значительные количества ртути поступают в водные системы.

Г л а в а 2

РТУТЬ В АТМОСФЕРЕ И НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ГОРОДА

Техногенные геохимические преобразования атмосферы и загрязнение наземных экосистем города – один из наиболее актуальных вопросов для этих территорий. Пылегазовые выбросы и отходы многих источников загрязнения приводят к поступлению и распространению ртути в атмосфере промышленных городов, к загрязнению воздуха и ее концентрированию в различных компонентах наземных ландшафтов. В конечном счете это выражается в формировании в пределах урбанизированных территорий зон загрязнения – атмохимических и биогеохимических аномалий, а также техногенных ореолов рассеяния ртути в депонирующих средах.

I. Техногенные аномалии и ореолы рассеяния ртути

Пространственная картина распространения потоков загрязняющих веществ в условиях города наиболее четко устанавливается по изменению химического состава тех природных сред, которые надолго депонируют поступающие загрязняющие вещества. Прежде всего это относится к почве – наиболее устойчивому компоненту ландшафта [6]. Как было установлено, при определенных сроках воздействия источников загрязнения концентрация поллютанта в почве промышленных городов пропорциональна нагрузке элемента, поступающего на ее поверхность при выпадении из атмосферы. Поступление загрязняющих веществ на поверхность почв может быть столь велико, что приводит к заметному возрастанию в ней их содержаний до таких уровней, при которых флукутации фоновых концентраций практически не сказываются, а интенсивность концентрирования отражает степень загрязнения атмосферы.

С гигиенических позиций опасность загрязнения почвы химическими веществами определяется уровнем ее возможного отрицательного влияния на контактирующие среды, пищевые продукты и опосредованно человека, а также на биологическую активность почвы и процессы самоочищения [17].

В общем случае важность изучения техногенных геохимических преобразований и оценки загрязнения почвы населенных пунктов определяется: 1) эпидемиологической значимостью загрязненной химическими веществами почвы; 2) роли загрязненной почвы как источника

вторичного загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха и природных вод; 3) возможностью опосредованного и непосредственного воздействия загрязненной почвы на человека и другие живые организмы; 4) значимостью степени загрязнения почвы как индикатора загрязнения воздушного бассейна.

Как показали исследования, в загрязненной почве на фоне уменьшения истинных представителей почвенных микробоценозов (антагонистов патогенной кишечной микрофлоры) и снижения ее биоактивности отмечается увеличение числа патогенных энтеробактерий и геогельминтов, которые более устойчивы к химическому загрязнению, нежели представители естественных почвенных микробоценозов.

В городах, где экологическая обстановка определяется прежде всего состоянием воздуха, загрязнение почв может привести к усилению загрязнения атмосферы. Почвенная пыль является важнейшим источником пыли в жилищах. Кроме того, почвенная пыль попадает в организм детей с грязных рук и игрушек. Ртуть может улетучиваться в виде паров в атмосферу.

В зонах воздействия выбросов биологическое поглощение из загрязненных почв влияет на качество сельскохозяйственной продукции, а поверхностный сток с загрязненных почв и фильтрация атмосферных осадков может приводить к загрязнению поверхностных и подземных вод.

Изучение распределения химических элементов в почвах, находящихся в зоне влияния выбросов различных промышленных предприятий, позволяет определить характер и степень их загрязнения за счет выпадений из атмосферы и соответственно оценить уровень загрязнения воздуха и всей территории города в целом. Оценка уровня химического загрязнения почв как индикаторов неблагоприятного воздействия на здоровье населения проводится либо по гигиеническим показателям (ПДК), либо по геохимическим показателям (коэффициент концентрации относительно фоновых содержаний). Как правило, концентрация металлов в почве населенных мест отражает многолетнее воздействие источников и оказывает на устойчивый процесс загрязнения атмосферы. Формирующиеся в почвах техногенные ореолы рассеяния отличаются своеобразными структурно-морфологическими особенностями распределения химических элементов, что зависит прежде всего от размещения и характера источников загрязнения, а также от закономерностей выпадения загрязняющих веществ из атмосферы на земную поверхность и процессов последующего перераспределения. Основным методом изучения пространственной структуры распределения загрязняющих веществ

в почвах является геохимическое картирование [6].

Представляется логичным рассмотреть особенности распределения ртути в атмосфере и компонентах наземных экосистем урбокландшафтов на примере двух промышленных городов, резко отличающихся по интенсивности техногенной "ртутной" нагрузки на окружающую среду. Это: г. Темиртау - пример крупного промышленного города с мощным "ртутным" производством, и г. Саранск - типичный многоотраслевой промышленный центр с относительно незначительным "ртутным" производством. В первом случае, как уже упоминалось, ртуть используется в качестве катализатора при производстве ацетальдегида и практически полностью после завершения технологического процесса переходит в отходы (ежегодное потребление порядка 60-70 т). Во втором случае ртуть используется при производстве люминесцентных ламп и по условиям технологического процесса должна практически полностью входить в состав конечной продукции (ежегодное потребление порядка 5,5 т). Естественно, что в обоих городах существуют и дополнительные источники поступления ртути в окружающую среду.

В г. Темиртау интенсивность загрязнения городской территории определяется огромным объемом пылегазовых выбросов, составляющим более 1 млн.т/год, из которых около 50-55 тыс.т приходится на ПО "Карбид" (производство карбида кальция, ацетилена, ацетальдегида и т.п.). Считается, что наиболее значительное поступление ртути в атмосферу города было до 1977 г., когда ртуть содержащие шламы ацетальдегидного производства утилизировались термическим способом на специальной установке, располагавшейся в пределах промзоны завода "Карбид". По некоторым оценкам выброс ртути составлял более 8 т в год (в реальности безусловно больше). В настоящее время организованный выброс металлической ртути на ПО "Карбид" оценивается в 300-400 кг ежегодно, поскольку с 1976 г. шламы, обогащенные ртутью, стали отправляться для переработки на Никитовский ртутный комбинат. Однако, по всей видимости, эти цифры занижены, поскольку существующий неорганизованный выброс ртути практически не поддается учету и не берется в расчет. Более того, заводскими службами и соответствующими контролирующими организациями учитывается, как правило, только парогазовая составляющая ртутных выбросов. Ртуть, связанная со взвешенными твердыми частицами, практически не учитывается. Кроме того, в пределах г. Темиртау размещен ряд крупных предприятий, в выбросах и отходах которых также присутствует ртуть. Это, в первую очередь, Карагандинский металлургический комбинат с мощным коксохимическим производством, крупная ГРЭС, работающая на

угле, а также цементные заводы в расположеннном рядом с городом пос. Актау. Даже при низких абсолютных концентрациях ртути огромные объемы пылегазовых выбросов могут обусловливать значительную техногенную нагрузку этим элементом.

На рис.2 приведена карта загрязнения почв г.Темиртау ртутью, отражающая примерно 30-летний период техногенного воздействия на городскую среду.

При составлении карты в почвах фиксировались следующие пороговые концентрации ртути, что позволило выделить территории с разной степенью загрязнения:

1) $\leq 0,02 \text{ мг/кг}$ - концентрации максимально превышающие местный геохимический фон в 2 раза. Уровень $0,02 \text{ мг/кг}$ учитывает его естественную вариацию, а территории города с такими содержаниями ртути в почвах отнесены к незагрязненным;

2) $> 0,2 - \leq 0,1 \text{ мг/кг}$ - концентрации, превышающие фоновое содержание в 2-10 раз. По имеющимся данным уровень в $0,1 \text{ мг/кг}$ фиксируется в незагрязненных природных почвах как максимально возможный. Участки города с указанными концентрациями отнесены к слабо загрязненным территориям;

3) $> 0,1 - < 0,4 \text{ мг/кг}$ - концентрации, превышающие местный фон в 10-40 раз. Уровень в $0,4 \text{ мг/кг}$ в последнее время предлагается в качестве новой предельно допустимой концентрации ртути в почвах. Территории с такими содержаниями характеризуются средним ("явным") уровнем загрязнения;

4) $\geq 0,4 - < 2,1 \text{ мг/кг}$ - превышают фон в 40-210 раз; уровень $2,1 \text{ мг/кг}$ является принятой ныне ПДК ртути в почвах. Участки города с данными концентрациями ртути отнесены к территориям сильного загрязнения;

5) $\geq 2,1 - \leq 21 \text{ мг/кг}$ - уровни, превышающие фоновую концентрацию в 210-2100 раз и равные I-10 ПДК. Такими содержаниями характеризуются участки города с опасным загрязнением;

6) $> 21 \text{ мг/кг}$ - уровни значительно (более чем в 10 раз) превышающие ПДК. Территории города с такими содержаниями ртути в почвах характеризуются чрезвычайно опасным уровнем загрязнения.

В табл.20 приведены данные по количественной оценке техногенных аномалий в почвенном покрове города, а также результаты подсчета запасов ртути в верхнем слое почв зон с различным уровнем загрязнения. При оценке запасов ртути мы исходили из того, что почвы с небольшим содержанием гумуса и достаточно плотным сложением имеют объемный вес $\sim 1,5-1,6 \text{ г/см}^3$ (Почвоведение, 1972). Учитыва-

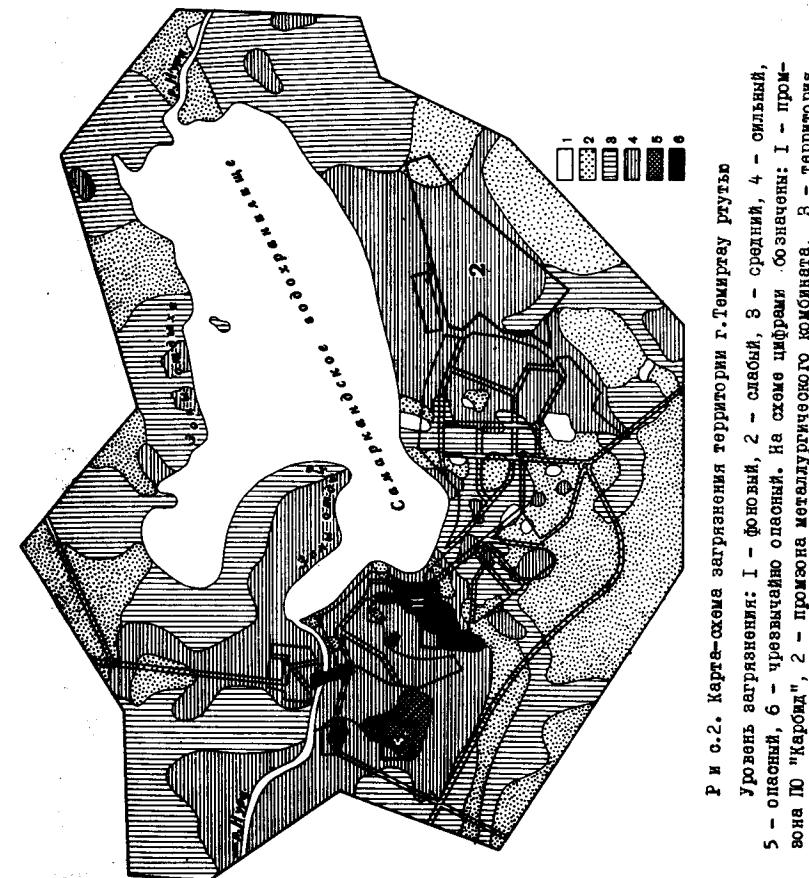


Рис.2. Карта-схема загрязнения территории г.Темиртау ртутью
Уровни загрязнения: 1 - фоновый, 2 - слабый, 3 - средний, 4 - сильный,
5 - опасный, 6 - чрезвычайно опасный. На схеме цифрами обозначены: 1 - пром-
зона Ю "Карбон", 2 - промзона металлургического комбината, 3 - террито-
рия очистных сооружений

лось также то, что территории городов отличаются наличием непроницаемых покрытий (асфальт, строения и т.п.). В городах с численностью населения менее 300000 человек их площадь, как правило, около 20% (Гидрологические аспекты урбанизации, 1978). Поэтому при окончательной оценке запасов вводился поправочный коэффициент 0,8.

Как следует из картосхемы (рис.2) и табл.20, территория города и его ближайшего обрамления характеризуется развитием практически сплошного аномального поля довольно значительных размеров. Структура этого поля выражается в чередовании зон с различным уровнем загрязнения, расположение которых зависит от местоположения источников и, по всей видимости, от метеорологических параметров. В общем случае можно говорить о наличии трех крупных очагов распространения техногенных аномалий, различающихся по морфоструктурным особенностям и контрастности накопления ртути.

Центральная часть города характеризуется незакономерным сочетанием участков неправильной формы в основном слабой и средней интенсивности загрязнения. Восточная – отличается развитием сплошной аномалии, отвечающей среднему уровню загрязнения. Западная – также характеризуется сплошным развитием аномалий аналогичной интенсивности. Однако на этом фоне фиксируются ярко выраженные центры с экстремально высоким уровнем загрязнения, закономерно приуроченных к источникам. Участки с фоновым уровнем занимают незначительную часть территории города, располагаясь небольшими пятнами в пределах центральной части поселения.

Более существенная часть территории (~26%) относится к участкам со слабым уровнем загрязнения. Они занимают практически всю южную окраину города и отдельными пятнами встречаются в северной части Центра.

Около 17% территории приходится на участки со средним уровнем загрязнения. Аномалии данной интенсивности имеют довольно сложную конфигурацию и перекрывают Соцгород, а также юго-восточную часть Центра. В виде небольших пятен (0,06–0,25 кв.км) они встречаются и в других районах города.

Большую часть территории города (около 46%) занимают участки с сильным уровнем загрязнения. Среднее содержание ртути в почвах здесь составляет 0,9–1,0 мг/кг ($K_c = 90$ – 100), а максимальные превышают 2 мг/кг, то есть достигают уровня ПДК. Четко выделяются два обширных очага аномалий данной интенсивности, перекрывающих западные и восточные районы города и закономерно приуроченные к промзонам. Если в восточной части города эти аномалии характеризуются

Таблица 20. Структура загрязнения территории г. Темиртау ртутью и ее запасы в верхнем (0–10 см) слое почв

Уровень загрязнения	Площадь аномалий		Содержание, мг/кг		K_c от нося- тель- но	Запасы ртути в верхнем слое почв, кг
	км ²	% от об- щей пло- щади	сред- нее	пределы колеба- ний		
Фоновый	1,1	2,6	0,015	0,01–0,02	1,5	2
Слабый	10,6	26,3	0,08	0,021–0,1	8	102
Средний	6,7	16,6	0,3	0,11–0,39	30	241
Сильный	18,8	46,4	0,9	0,4–2,09	90	2000
Опасный (промзона ПО "Карбид")	0,5	1,3	3	2,1–21	300	180
Опасный (Старый город)	1,7	4,2	10	4–21	1000	1400
Чрезвычайно опасный	1,1	2,6	375	21–2000	37500	49000
Общее	40,5	100				53000 (53 т)

сплошным и достаточно однородным (по концентрациям ртути) распространением, то в западной части фиксируются участки с более интенсивным накоплением ртути.

Участки с опасным уровнем загрязнения занимают незначительную часть города и развиты, главным образом, в пределах промзоны "Карбид" и прилегающих районах, а также тяготеют отдельными пятнами к району очистных сооружений и Главной канавы сточных вод. Среднее содержание ртути на участках, тяготеющих к заводу, составляет 3 мг/кг ($K_c = 300$), а в районе Старого города, очистных сооружений и п.Чкалово – 10 мг/кг ($K_c = 1000$), причем максимальные уровни достигают 21 мг/кг (табл.20). Аномалии, вытянутые в юго-западном направлении узкой полосой, могут быть связаны как с транспортировкой отходов, так и с использованием последних для создания дорожной насыпи.

Чрезвычайно опасным уровнем загрязнения характеризуется территория, практически полностью совпадающая с промзоной ПО "Карбид". Среднее содержание ртути в верхнем слое почв достигает здесь 375 мг/кг, а в отдельных точках даже 3000–6000 мг/кг. Указанные экст-

несмотря на это, общие запасы ртути в верхнем слое почв промзоны "Карбид" оцениваются колоссальной цифрой в 49 т (табл.20).

Интенсивность техногенного воздействия подтверждается и особенностями вертикального распределения ртути в почвенном профиле (рис.3). Так, в пределах промзоны практически во всей 1,5-метровой толще разреза фиксируются очень высокие содержания металла. Экстремально высокие концентрации обнаружены в верхнем (0-15 см) слое почв, причем в верхних 5 см они достигают 160 мг/кг. Характерно появление повышенных концентраций (3-7 мг/кг) ртути в нижних горизонтах разреза. Это может быть связано как с ее миграцией, так и с возможным реликтовым загрязнением.

Для вертикального распределения ртути в шурфах, заложенных вне зоны "Карбид", также характерно ярко выраженное накопление этого металла в верхнем слое почв (рис.3, графики 2-4). Интересно отметить, что по мере удаления от "Карбида" фиксируется не только снижение содержаний ртути в верхнем слое почв, но и наблюдается уменьшение мощности загрязненного слоя почв. Так, в пределах промзоны достаточно интенсивно загрязнена вся 1,5-метровая толща почв; на удалении в 0,5 км от завода техногенные аномалии фиксируются до глубины в 90 см; в центре города (~ 3-4 км от завода) - до 60-65 см; в восточной части города (8-9 км) - до 30-35 см. В фоновых почвах распределение этого элемента при низких уровнях довольно однородное. Таким образом, устанавливается четкая зависимость глубины проникновения поллютанта от расстояния до источника его поступления, то есть от интенсивности его выпадения из атмосферы на подстилающую поверхность. Данные по вертикальному распределению загрязняющих веществ в профиле почв позволяют установить приоритетный их источник (в данном случае явно видна ведущая роль ПО "Карбид" в поставке ртути в окружающую среду).

В данном регионе преобладают ветры южных румбов, в частности юго-западного, обладающие достаточно высокой скоростью. Это и обуславливает некоторую вытянутость техногенных аномалий в почвах в северо-восточном направлении. В частности, в западном районе города зона сильного загрязнения прослеживается и на значительных участках правобережья р.Нуры и на полуострове, где расположены пионерские лагеря, а также фиксируется отдельными пятнами на правом берегу водохранилища.

Изучение распределения ртути в почвах по системе профилей и площадок, расположенных на различном удалении от г.Темиртау, ука-

зывает на формирование в исследуемом регионе значительного регионального поля загрязнения ртутью, которое прослеживается достаточно четко до 60-70 км (по радиусу от города) и заметно вытянуто в северо-восточном направлении (по преобладающим ветрам). Основной фон, по-видимому, создается незакономерно варьирующим сочетанием обширных участков со слабым и средним уровнем загрязнения территории.

Таким образом, наличие мощных источников поставки ртути привело в исследуемом регионе к формированию обширного регионального поля загрязнения, характеризующегося чередованием ореолов ртути с различной степенью ее концентрирования в почвах. При этом наиболее интенсивно загрязненные территории закономерно приурочены к источникам загрязнения, то есть к промышленным зонам. Это подтверждают многочисленные исследования, показавших, что наиболее контрастно техногенные аномалии в почвах (снеговом покрове) проявляются в пределах промзон и в непосредственной близости от них [6].

В табл.21 приведены результаты газорутных исследований, выполненных в пределах г.Темиртау. Разовые измерения концентраций паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха промзоны ПО "Карбид" свидетельствуют о наличии локальных участков с резко повышенными их содержаниями. Так, при относительно небольшой площади промзоны наблюдаются значительные колебания содержаний паров ртути как в пространстве, так и во времени (в течение суток). Максимальные содержания приурочены к цеху ацетальдегидного производства и достигают 58130 нг/м³, то есть в 5,8 раз выше ПДК в рабочей зоне. В целом же вся промзона отличается достаточно стабильным и высоким уровнем загрязнения воздуха парами ртути. В пределах санитарно-защитной зоны их концентрации заметно снижаются, однако, в некоторых точках превышают уровень ПДК (300 нг/м³).

В пределах селитебной застройки содержания паров ртути в течение всего периода наблюдений находились в пределах 30-199 нг/м³, причем более высокие уровни тяготели к промзоне ПО "Карбид". Несмотря на то, что из-за высокой динамичности воздушной среды и специфики режима работы источников загрязнения разовые измерения не отражают достаточно реально уровень загрязнения воздуха, полученные данные свидетельствуют о стабильном превышении в пределах города фоновых уровней в 2-10 раз. Высокий уровень загрязнения воздуха парами ртути подтверждается и результатами динамических наблюдений, выполненных в течение суток на трех стационарных точках с интервалом опробования 1 час (рис.4). Как следует из приведенного

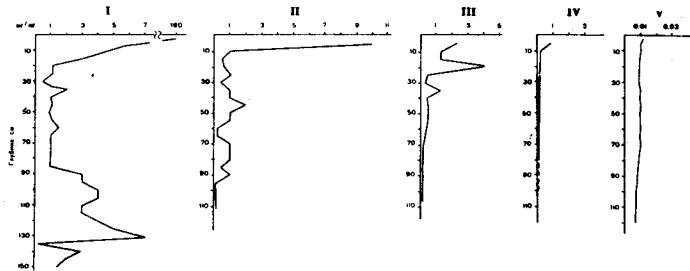


Рис.3. Распределение ртути в профиле почв.
I - промзона ПО "Карбид", II - близ промзоны,
III - центр города, IV - восточный район города, V - фон

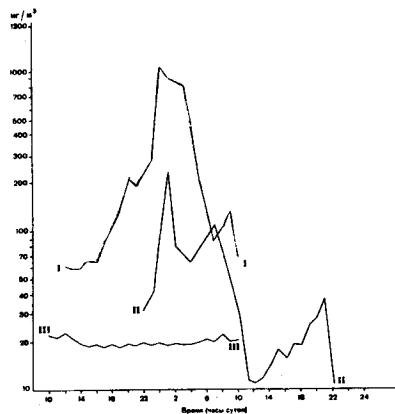


Рис.4. Динамика распределения ртути в приземном слое атмосферного воздуха.

I - санитарно-защитная зона
ПО "Карбид", II - зона отдыха в 8 км от ПО "Карбид", III - восточный район города

рисунка, в пределах санитарно-защитной зоны ПО "Карбид" в ночное время (от 21-00 до 5-00) было зафиксировано резкое увеличение концентраций паров ртути (до 3-3,5 ПДК). Аналогичное явление отмечено и на территории рекреационной зоны, расположенной в 8 км к северо-востоку от завода на правом берегу Самаркандинского водохранилища, где в ночное время также наблюдалось резкое увеличение содержания паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха (рис.4). Вероятно, отмеченное увеличение концентраций паров ртути может быть связано с режимом работы ПО "Карбид". Так, при наблюдениях в рекреационной зоне преобладал слабый ветер со стороны завода. Очень характерно распределение паров ртути на третьей точке наблюдения, расположенной в восточной части города (рис.4). В данном случае фиксировались лишь незначительные (в пределах фона) колебания концентраций, причем отмечалось преобладание слабого ветра в сторону ПО "Карбид". В то же время, нельзя исключить и вероятность поступления ртути из загрязненных (в пределах промзоны "Карбид" и его ССЗ) почв при изменениях метеопараметров воздуха в ночное время (уменьшение температуры, увеличение влажности). Кроме того, если днем, как правило, наличие температурного градиента у земной поверхности вызывает перемешивание нижних слоев атмосферы и приводит к формированию восходящих потоков воздуха, то ночью при уменьшении температурного градиента воздух становится более устойчивым и создается вероятность для развития нисходящих потоков. Это может приводить к одновременному интенсивному осаждению паров ртути из верхних слоев на земную поверхность. Не исключена также возможность изменения соотношения разных форм миграции ртути и, в частности, трансформация аэрозольной формы в парогазовую. В целом же имеющийся материал позволяет утверждать, что главной причиной резкого повышения содержаний паров ртути в ночное время являются все-таки выбросы завода "Карбид". Подтверждением этого могут служить результаты замеров содержаний паровой ртути, выполненных в пределах города при стабильном южном направлении ветра. Так, если в южной части города в этот период концентрации ртути находились в пределах 28-61 ng/m^3 , то непосредственно к северу от "Карбida" они достигали 458-575 ng/m^3 . Приведенные материалы позволяют рассматривать всю промзону завода "Карбид", учитывая чрезвычайно сильно загрязненные почвы, как мощный источник поступления паров ртути в атмосферу.

Разовое определение концентраций паров ртути в населенных пунктах, расположенных в ближайших окрестностях города, показало, что они превышают фоновые уровни в среднем в 2-5 раз. Это может быть

Таблица 21. Содержание паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха в г. Темиртау

Место отбора	Кол-во точек наблюдений	Концентрация, нг/м ³	Примечание
Территория ПО "Карбид"			
цех "А"	8	4618-58130	Разовые замеры на площадках
цех "Б"	4	1022-6426	
цех "В"	3	4456-6488	22-23.06.88 г.
Санитарно-защитная зона ПО "Карбид"	6	30-420	Разовые замеры на площадках 10.06.88 г. Результаты газорутных измерений на площадках во второй половине июня 1988 г.
Территория г. Темиртау			
Правый берег	1	39	
Старый город (юго-западная часть)	3	41-42	измерений на площадках во второй половине июня 1988 г.
Старый город (северо-восточная часть)	2	176-199	в течение 6 дней в период от 10-00 до 15-00 для
Сонгород	3	35-74	
Центр	4	30-52	
Восток (близ КМК)	2	31-38	
Восток (берег водохранилища)	1	81	
Район с. Петровка (местный фон)	3	12-19	Разовые измерения 27.06.88 г.

связано как с переносом от завода "Карбид", так и со вторичным поступлением из сильно загрязненных (срощаемых речными водами) сельскохозяйственных почв, над которыми фиксировались концентрации паров ртути в 80-120 нг/м³ и даже более. Естественно, что на уровне содержания паров ртути большое влияние оказывает характер и интенсивность проветриваемости жилой застройки. Так, отмечается четкая тенденция к локализации ртути в замкнутых пространствах (табл.22). Это указывает на вероятность увеличения ее содержаний в жилых рабочих помещениях, а также в слабо проветриваемых зонах городской застройки, что представляет определенную гигиеническую опасность.

Таблица 22. Содержание паров ртути в приземном слое воздуха зоны отдыха ПО "Карбид" (по результатам разовых измерений в дневное время)

Место отбора проб	Концентрация, нг/м ³
Открытая площадка	35
Внутри дома	78
Под настилом пола дома	140
Под перевернутой лодкой	160

Безусловно, что наиболее интенсивное формирование техногенных аномалий в почвах происходило до 1977 г. и было связано не только с несовершенством технологических процессов на ПО "Карбид", но и в первую очередь с скижанием ртутьсодержащих шламов, приводящего к огромному выбросу ртути в атмосферу. Естественно, что в настоящее время поставка ртути в атмосферу указанным предприятием резко снизилась. Однако соотношение ныне существующих источников ("Карбид", металлургический комбинат, ГРЭС, цементные заводы) в поставке ртути выяснить достаточно сложно. Здесь прежде всего следует отметить, что и в настоящее время в воздушную среду города выбрасывается существенное количество этого поллютанта, причем он поступает не только в парогазовой форме, но и в составе твердых выпадений. Более того, ртуть, связанная с пылевыми бросами, может, по всей видимости, играть существенную роль в процессах загрязнения воздушной среды и территории города. Выше мы отмечали тот факт, что наиболее интенсивно ртуть концентрируется в почвах вблизи источника загрязнения. Это связано с ее более активным выпадением из атмосферы. Имеющиеся материалы не позволяют связать формирование контрастных аномалий ртути в депонирующих средах только или в основном с ее парогазовой фракцией. Безусловно, формирование почвенных техногенных аномалий в первую очередь связано с поступлением ртути именно в составе пылевых выпадений, значительная часть которых осаждается в пределах промышленных зон. Это подтверждается следующими данными. В частности, Р.Феррара и соавторы [38] проводили исследование распределения ртути в атмосфере промышленных районов Центральной Италии и влияние дождя на интенсивность вымывания металла из воздуха на земную поверхность. Авторы установили, что наиболее высокие концентрации ртути в дождевой воде характерны для начальных стадий дождя. Измерение концентраций газообразной ртути до и после

дождя свидетельствовало об умеренном их снижении (примерно на 20%), причем отмеченное снижение отчетливо проявлялось лишь в тех случаях, когда дождь выпадал после долгого периода сухой погоды. Механизм вымывания ртути дождем из атмосферы был связан с растворением $HgCl_2$ и CH_3HgCl , которые составляют около 10–20% общего количества газообразной ртути, присутствующей в воздухе. Авторы делают вывод о том, что дождь не оказывает заметного влияния на изменение уровней содержания газообразной ртути в воздухе. По всей видимости, преобладание газообразных форм ртути и их относительная "устойчивость" указывают на более длительное время ее пребывания в атмосфере, а также на то, что только небольшая доля выброшенной газообразной ртути выпадает локально, большая часть ее распространяется на значительные расстояния (табл.23).

Таблица 23. Распределение ртути в воздухе и атмосферных осадках Центральной Италии (осредненные данные)

Пробы	Уровни содержания ртути
Дождевой воды	7,9–17,0 нг/л
Твердого вещества дождевой воды	2,1–13,3 нг/л
Газообразной ртути	5,7–22,5 нг/м ³

Однако проведенные исследования показали, что дождь хорошо вымывает взвешенные твердые примеси, легко удаляя связанную с ними ртуть. Детальные работы по изучению процессов распределения газообразной ртути от локального источника (хлорно-щелочной завод) были выполнены финскими учеными [40]. Завод расположен в юго-западной части Финляндии. Выброс ртути в воздух достигал 400 кг в год, других крупных источников ртути в этой зоне нет. В качестве контроля использовалась сельская незагрязненная область на расстоянии в 225 км от завода. В качестве индикаторов аэрозольного загрязнения использовались так называемые мховые сумки, приготовленные из различных видов мхов, отобранных в "чистых" районах. Мховые сумки были расположены в разных направлениях и на разном удалении от завода. Результаты исследований показали, что накопление ртути в мховых сумках и концентрация ее в мхах значительно выше близи завода, чем на расстоянии в 20–100 км. Загрязнение мхов-индикаторов, расположенных

в зоне 20–100 км было выше, чем в контрольном районе. Однако было установлено, что только 6% валового выброса ртути вымывается с осадками на расстоянии до 5 км от завода; почти 60% выпадает на удалении 70–100 км.

Таким образом, в промышленных городах формирование техногенных среолов ртути в почвах должно быть в большей степени связано с ее поступлением в составе пылевых выбросов, нежели за счет вымывания парогазообразной ртути. В частности, на обогащенность пылевых выбросов промышленных предприятий города указывают следующие факты. Так, в пылях, отобранных в производственных помещениях и из вентиляционных систем ПО "Карбид", обнаружены чрезвычайно высокие концентрации ртути (табл.24). Очень высоки содержания ртути и в некоторых твердых отходах предприятий города (табл.25), большая часть которых складируется практически в пределах городской застройки и является существенным источником поступления пыли, обогащенной ртутью, в атмосферу.

На существенную роль взвешенных форм ртути в формировании педохимических аномалий указывают и особенности ее распределения в суглинистом покрове. Так, в пределах промзоны ПО "Карбид" при валовых содержаниях ртути в суглинистой воде порядка 2–4 мкг/л около 75–95% было связано с твердым материалом, то есть с пылью, осажденной снегом. В центре города доля взвешенных форм при заметном снижении валовых концентраций (в 5–10 раз) уменьшалась до 40–60%. По всей видимости, снег активно вымывает твердые частицы, содержащиеся в воздухе. В общем случае зона воздействия города по результатам суглинистого отборования фиксируется достаточно четко на расстоянии в 35–40 км. Заметно повышен уровень содержания ртути и в дождевых осадках. Так, вблизи промзоны ПО "Карбид" валовая концентрация ртути в дождевой воде достигала 2–3 мкг/л; на удалении в 5–8 км от города она снижалась до 0,2–0,6 мкг/л, причем, как правило, до 30–35% от речного содержания было связано с взвешенными формами (с частицами размером более 0,45 мкм).

Вопросы, связанные с изучением форм нахождения ртути в атмосфере и их влияния на земную поверхность, относятся к наименее изученным в геохимии ртути. Считается, что доминирующей формой ртути в атмосфере является ее пары. Так, например, в пригороде Флориды 60% ртути в атмосфере присутствует в виде пара, 10% – в виде неорганической ионной ртути, около 15% – в виде метилированных соединений и только 1% – в виде частиц [36]. По некоторым данным доля аэрозольной ртути от общего содержания в промышленных районах

Таблица 24. Ртуть в пылях из производственных помещений и вентиляционных систем ПО "Карбид"

Место отбора	мг/кг	Кс относительно фона в почвах
Пыль из труб вентсистем цеха по производству ацетальдегида	10000	1000000
Градирня цеха по производству ацетальдегида	10000	1000000
Отделение гидратации цеха по производству ацетальдегида	10000	1000000
Отделение регенерации цеха по производству ацетальдегида	10000	10000000
Цех по ректификации ацетальдегида	3000	300000
Эстакада вентиляционной системы цеха по производству ацетальдегида (на улице)	4000	400000

Таблица 25. Ртуть в некоторых отходах промпредприятий г. Темиртау (мг/кг)

Характеристика отходов	Пределы колебаний	Среднее	Кс относительно фона в почвах
Материалы из гидроотвалов золы КарГРЭС-І	3-50	10	1000
Мелкозем из отвалов шлака КМК	4-2000	76	7600
Материал из шламонакопителя ПО "Карбид"	300-5000	2020	202000

изменяется от I до 30%. Предполагается, что аэрозольная ртуть связана, как правило, с частицами менее 0,4 мкм [24]. Однако, безусловно, в атмосфере, особенно вблизи земной поверхности постоянно присутствуют и более крупные частицы, которые могут содержать значительные уровни ртути. На наш взгляд, это подтверждается приводимыми выше материалами; в крупных промышленных районах заметно возрастает количество ртути, переносимой в атмосфере в составе твердых выбросов и активно осаждаемой на земную поверхность, формируя техногенные аномалии в почвах. Существенное значение взвешенных частиц в формировании техногенных геохимических аномалий, прежде всего вблизи источника, в какой-то мере подтверждается ее формами нахождения в почвах (табл.26). Как видим, в почвах промзоны резко преобладает доля прочносвязанных форм ртути, тогда как в центре города их значение заметно снижено. В то же время, присутствие значимых количеств ртути в почвах в геохимически подвижных формах указывает на их потенциальное значение как источников вторичного загрязнения атмосферного воздуха, а также растительности. В частности, изучение распределения ртути в яблоках в разных районах города показало, что в плодах, отобранных в пределах промзоны "Карбид", ее концентрации более чем в 25 раз превышали существующую ПДК. Отдельные районы города также характеризовались уровнями ртути в яблоках, превышающими ПДК.

В г.Саранске формирование техногенных аномалий и ореолов рассеяния ртути связано с воздействием ряда промышленных предприятий. Это прежде всего предприятия Саранского ПО "Лисма" – два крупных светотехнических завода – СЭЛЗ (производство люминесцентных ламп) и СИС-ЭВС (производство различных источников света). Производство люминесцентных ртутных ламп на Саранском ЭЛЗ организовано с начала 1960-х годов. Начиная с 1965 г., ежегодно выпускается 30-35 млн. ламп. По данным завода в течение первых 15 лет в атмосферу города поступало до 200-400 кг ртути в год, что вполне соответствует действительности, поскольку ртуть входит практически полностью в состав конечной продукции. В 1976 г. в цехах, где идет использование ртути, были установлены угольные адсорбера. Это позволило снизить выбросы ртути до 62 кг/год. Таким образом, максимальное количество ртути, поступившее в атмосферу за весь период существования производства, составляет примерно 6 т, то есть на два порядка меньше, чем в г.Темиртау. Существенным источником поступления ртути могут являться и другие предприятия, в первую очередь ТЭЦ-2, работавшая ранее на угле, а сейчас использующая мазут и газ; многочисленные ю-

Таблица 26. Формы нахождения ртути в почвах г. Темиртау

Место отбора проб	Вал, мг/кг	Сульфатные		Оксидные		Элементарная		Прочносвязанные	
		мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
Промзона ПО "Карбид"	2300	0,16	0,01	240	10,4	450	19,6	1609,84	70
	900	0,7	0,08	94	10,4	80	8,9	725	80,6
	300	0,14	0,05	88	29,3	25	8,3	186,9	62,3
	14	0,06	0,43	1,2	8,6	0,5	3,6	12,24	87,4
Центр города	4,6	0,3	6,5	2,5	54,4	0,4	8,7	1,4	30,4
	4	0,04	I	0,4	10	2,8	70	0,76	18,8

тельни. Таким образом, можно предположить, что ситуация, существующая в г. Саранске, в какой-то мере будет являться типичной для многих городов, обладающих схожей промышленной структурой.

Анализ данных по структуре загрязнения территории города ртутью и особенностей ее площадного распределения в верхнем слое почв свидетельствует о том, что для подавляющей части города загрязнение этим металлом не представляет серьезной угрозы (табл. 27). Так, более 80% площади города характеризуется ее фоновыми уровнями в почвах. Около 10% территории отличается слабоконтрастными аномалиями ($K_c = 1,5-3$). Наиболее значимые по контрастности и размерам техногенные ореолы ртути приурочены к электроламповому заводу и его окрестностям, в меньшей степени – к заводу СИС-ЭВС, району ТЭЦ-2 (микрорайон "Северный") и в какой-то степени – к центральной части города. В указанных районах фиксируются значимые ореолы ртути с ее концентрациями, превышающими фон в 3-10, 10-30 раз и более.

Таблица 27. Структура загрязнения территории (почв) г. Саранска ртутью

Kc относительно фона	Относительная доля (%) от общей площади города
I,5	82
I,5-3	9,2
3-10	6,9
10-30	1,5
30-100	0,3
100	0,1

Уровни, достигающие ПДК, отмечены практически только в пределах промзоны завода СЭЛЗ и его СЭЗ и лишь эпизодически в пределах промзоны СИС-ЭВС (табл. 28). По всей видимости, рассмотренные особенности достаточно объективно отражают реальную ситуацию, сложившуюся на территории города и

свидетельствуют в целом о незначительном уровне загрязнения окружающей среды этим токсичным металлом. Наиболее интенсивно техногенные аномалии проявлялись в основном в пределах промышленных зон, используемых ртутью (заводы СЭЛЗ и СИС-ЭВС), либо тех предприятий, где ртуть входит в виде примесей в состав сырья (ТЭЦ). Изучение особенностей вертикального распределения ртути в профиле почв показало, что в пределах промзон СЭЛЗ и СИС-ЭВС загрязнение прослеживается до глубины в 40-50 см (рис. 5, 6), тогда как в пределах остальной территории аномальные уровни ртути фиксируются только в верхнем 5-10 см слое почв. Характерно, что в зоне влияния ТЭЦ-2 загрязнение прослеживается до глубины 15-20 см.

Таблица 28. Уровни содержания ртути

в верхнем слое почв

в пределах промзон СЭЛЗ

и СИС-ЭВС, мг/кг

Место отбора проб	Среднее	Пределы	Kc-средний
СЭЛЗ	28,3	0,08-300	472
СИС-ЭВС	0,84	0,015-5	14

Результаты лите-

химической съемки х-

орошо соотносятся с

данными газорутных

исследований, которые

подтверждают локаль-

ный характер загрязн-

нения окружающей сре-

ды города ртутью. В

табл. 29 приведены ос-

редненные данные по уровням содержания паров ртути в приземном

слое атмосферного воздуха различных районов города. Как видим, практически на всей территории города уровни содержания паров ртути находились в пределах фоновых. Значимые ее содержания, достигающие и превышающие уровни ПДК, закономерно фиксировались вблизи завода ТЭЦ-2 (микрорайон "Северный") и в районе СИС-ЭВС (район Северный). Уровни содержания паров ртути в районах СЭЛЗ и СЭЗ были в пределах фоновых.

Таблица 29. Уровни содержания паров ртути в приземном

слое атмосферного воздуха разных районов

г. Саранска, ng/m^3

Район города	Лето	Осень
Микрорайон "Светотехника"	< 50-70	< 50
Северная промзона (район СИС-ЭВС)	< 50-80	< 50
Микрорайон "Северный"	< 50-70	< 50
Близ ТЭЦ-2	150-250	100-200
Санитарно-защитная зона СЭЛЗ	250-350	70-80
Центр города	< 50-80	< 50-60
Микрорайон "Октябрьский"	< 50	< 50
Микрорайон "Заречный"	< 50-70	< 50
Ф о н	< 50	< 50

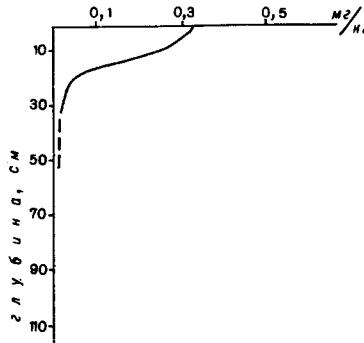


Рис. 5. Распределение ртути в профиле почв промзоны завода по производству источников света

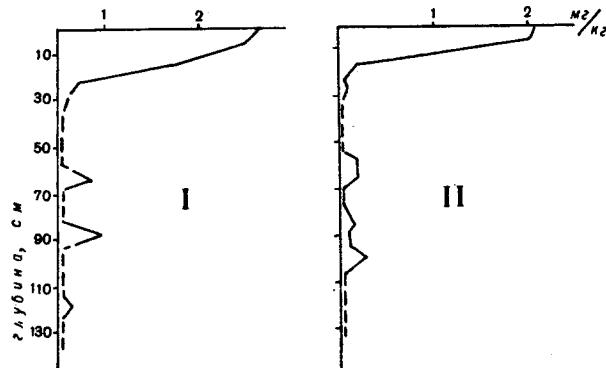


Рис. 6. Распределение ртути в профиле почв промзоны электролампового завода

I - шурф в западной части; II - шурф в восточной части промзоны

СЭЛЗ, а также в районе ТЭЦ-2 (приближаясь к уровню ПДК, заметно и стабильно превышая фон). При этом в летнее время уровни содержания паров ртути во всех районах города в среднем в 1,5-3 раза превышали концентрации, наблюдавшиеся в осенне (более холодное) время, что вполне естественно. Таким образом, в целом для города загрязнение парогазообразной фракцией ртути не представляет серьезной проблемы, за исключением территорий, тяготеющих к источникам загрязнения (заводу СЭЛЗ и ТЭЦ-2). Характерно, что в городской растительности (листья, ветви и кора бересклета) значимые содержания ртути фиксировались только в пределах промзоны электролампового завода.

Таким образом, в зависимости от мощности источника воздействия в атмосфере и наземных экосистемах города формируются в той или иной степени контрастные аномалии ртути, отличающиеся разнообразием пространственной структуры. Сложные цепи миграции этого полиманта, формируемые в связи с распределением в городах различных отходов, в итоге неизбежно приводят к его поступлению в организм человека.

2. Гигиенические аспекты загрязнения городской среды ртутью

Имеющиеся в настоящее время материалы позволяют в целом достаточно реально представить ключевые моменты метаболизма ртути в организме человека, установить биохимические и физиологические механизмы ее токсичности, а также оценить степень опасности соединений этого металла для здоровья населения. Однако в большей степени эти данные основываются на экспериментальных лабораторных исследованиях, нежели на непосредственных эпидемиологических наблюдениях. Как подчеркивается в специальном документе ВОЗ, чтобы управлять здоровьем человека, зависящим от присутствия ртути в окружающей среде, необходимо попытаться определить степень риска при различных состояниях природной среды [24]. Оценка же риска для здоровья определяется прежде всего знанием зависимости доза-эффект и доза-отклик, а также зависит от вариабельности воздействия ртути в любой данной ситуации. В силу различных причин именно эти аспекты для условий города изучены слабо. В этом плане представляется наиболее важным, прежде всего, выделить контингенты лиц, которые подвергаются различному по интенсивности воздействию ртути.

В общем случае в промышленных городах можно выделить следую-

щие группы населения, отличающихся по особенностям контакта с ртутью. Это, во-первых, группа лиц, подвергенных профессиональному воздействию высоких доз ртути. Многочисленные данные свидетельствуют о том, что именно для этой группы (то есть работников ртутных производств) характерно наиболее интенсивно проявляющееся воздействие ртути, что фиксируется высокими ее концентрациями в организме и появлением характерных признаков и симптомов ртутной интоксикации. В частности, в г. Темиртау (данные Б.А. Ревича и В.И. Тростиной) самые высокие уровни ртути в организме людей (моча и волосы) наблюдались у рабочих ацетальдегидного производства. Так, практически у всех рабочих уровня содержания ртути в моче заметно превышали физиологический уровень (то есть 10 мкг/л), причем у части рабочих они были выше критического уровня, превышая 40–50 мкг/л. В волосах рабочих содержания ртути, стабильно превышая фоновый и/или физиологический уровни, были прямо связаны с продолжительностью производственного стажа, то есть по мере его увеличения возрастала доля лиц с резко увеличенным содержанием металла в волосах. Например, при стаже до 5 лет концентрации ртути составляли 6,4 мкг/г, в 5–10 лет – 23 мкг/г, более 10 лет – 28,9 мкг/г. Анализ жалоб рабочих показал наличие симптомов, характерных для ртутной интоксикации. Аналогичная ситуация наблюдалась и в г. Саранске, где самые высокие концентрации ртути отмечены в волосах работников электролампового завода, имеющих профессиональный контакт с ртутью. Однако в целом они были заметно ниже, нежели у рабочих ацетальдегидного производства в г. Темиртау, и не превышали 1,5–2 мкг/г. В то же время, по данным городской санэпидемстанции у некоторых работников электролампового завода фиксировались отклонения в состоянии здоровья, характерные для длительного воздействия ртути.

Следующую группу, которая может быть достаточно многочисленной, составляют лица, подвергающиеся воздействию, как правило, более низких доз ртути, но также в производственных условиях. По данным И.М. Трахтенберга [15] в настоящее время имеется более 200 объектов и производств различного профиля, где в воздухе рабочей зоны постоянно обнаруживаются относительно невысокие концентрации ртути. Как правило, на таких объектах ртуть входит в состав сырья в виде нежелательных примесей, является составной частью приборов и т.п. По всей видимости, к этой же группе можно отнести и работников "ртутных" предприятий, не связанных непосредственно с ртутным производством, но "вынужденно" испытывающих вредное воздействие ртути. В частности, у работников санитарной лаборатории ПО "Карсил", распо-

ложенной на территории завода, фиксировались в моче содержания ртути, превышающие физиологический уровень. Повышенные концентрации ртути в волосах отмечались у рабочих подсобных цехов электролампового завода в г. Саранске.

Следующую группу, которая безусловно может быть отнесена к группе повышенного риска, составляют члены семей рабочих, имеющих по роду своей деятельности профессиональный контакт с ртутью и ее соединениями. По всей видимости, впервые на это было указано Б.А. Ревичем и соавторами [6], показавших что у детей в моче и волосах более высокие концентрации ртути фиксировались в тех случаях, когда их родители работали на ртутных производствах. Это было обусловлено привносом рабочими ртути на одежду и обувь в жилые помещения. Аналогичный факт был отмечен в г. Темиртау и в г. Саранске, когда независимо от района проживания биоконцентрации ртути были выше у тех детей, родители которых также работали на ртутных производствах (табл. 30). Таким образом, кроме воздействия, связанного с общей геохимической ситуацией в городе, эта группа дополнительно испытывает своеобразное "профессиональное" воздействие, которое, по всей видимости, в отдельных случаях может быть достаточно высоким.

Таблица 30. Уровни содержания ртути в волосах детей г. Саранска в зависимости от места работы родителей

Место работы родителей	Пределы содержаний, мкг/г
Электроламповый завод	0,1–1,6
Приборостроительный и телевизионный заводы	< 0,1–0,5
Механический и инструментальный заводы	< 0,1–0,4
Кабельный завод	< 0,1–0,2
Литейный завод	< 0,1–0,1

Интенсивность ртутной нагрузки на другие группы населения, а также дополнительная на вышеперечисленные будет определяться прежде всего общей геохимической структурой загрязнения территории города. При этом, естественно, в условиях "的独特性" г. Темиртау общая численность населения, испытывающая высокое воздействие ртути, будет достаточно велика. В условиях "типичности" г. Саранска –

заметно меньше. Если в условиях такого города как Темиртау может фиксироваться определенная площадная зависимость в интенсивности биоконцентрирования ртути, то в таком как Саранск эта зависимость прослеживается слабо и проявляется только в более частом появлении высоких концентраций этого металла в различных биосредах. Не следует также забывать о "сглаживающем" воздействии ртути, привносящей в жилые помещения на одежду и обувь рабочих ртутных производств, а также о вероятности появления высоких концентраций ртути в связи с таким ее путем поступления в организм человека.

Таким образом, в зависимости от мощности источников поставки ртути в окружающую среду в городах выделяются значительные контингенты населения, испытывающие заметное воздействие ртути. Более того, как отмечалось выше, даже в городах, не имеющих ртутных производств, содержания этого металла в атмосферном воздухе в несколько раз выше фоновых значений. Даже при таких уровнях воздействия ртути в организме жителей фиксируются концентрации этого металла в несколько раз более высокие, чем в фоновых условиях [6]. Особо следует отметить, что в городах, подобных Темиртау, заметное поступление ртути в организм жителей может осуществляться в результате потребления загрязненной питьевой воды и пищевых продуктов.

В настоящее время имеется значительное количество фактов, свидетельствующих о достоверной связи между уровнем загрязнения городской среды и показателями состояния здоровья населения. Убедительно показано, что загрязнение окружающей среды – один из ведущих факторов, определяющих состояние здоровья населения в городских условиях [6]. Как правило, такие связи выявляются при оценках суммарного воздействия всего комплекса поллютантов на городское население. Обычно для непрофессиональных групп населения воздействие ртути описывается по хорошо ныне известной и детально рассмотренной в литературе болезни Минамата. Однако, как правило, во всех известных случаях заболевание было связано с употреблением в пищу продуктов питания с повышенными в результате техногенного воздействия содержаниями метиловых соединений ртути. Работы, в которых бы для условий промышленного города достоверно и количественно были показаны взаимосвязи между повышенными уровнями ртути в компонентах городской среды и показателями состояния здоровья населения, практически отсутствуют. Как правило, речь идет о потенциальном воздействии ртути на человека, исходя из соображений о ее токсичности, либо ртуть рассматривается в общем комплексе поллютантов. Возможно, что для многих городов будет характерно так - на-

зывающее скрытое воздействие этого металла. Поэтому необходимо развертывание специальных исследований, направленных на выявление прямых связей между интенсивностью загрязнения ртутью окружающей среды и отклонениями в состоянии здоровья населения. Естественно, что организация таких исследований в условиях полиметаллического загрязнения достаточно сложна, однако их значимость и актуальность очевидны. Например, при анализе особенностей распространения различных заболеваний в г.Саранске был зафиксирован факт очень характерного распределения некоторых из них (табл.31). Как видим, районы

Т а б л и ц а 31. Распространенность случаев заболеваний пиелонефритом и циститом в г.Саранске

Район города	Количество случаев на 1000 детей
Зона влияния электролампового завода	18
Центр города	21
Прочие районы города	0,9-4,8

города, отличающиеся более повышенными содержаниями ртути в почвах и атмосферном воздухе, характеризуются резко повышенной частотой появления таких специфических заболеваний как пиелонефрит и цистит. В то же время для г.Саранска характерно достаточно интенсивное загрязнение территории многими тяжелыми металлами, в частности свинцом и кадмием. Поэтому связывать эти заболевания только с негативным воздействием ртути вряд ли правомочно, но и не учитывать ее возможного воздействия нельзя.

РТУТЬ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

Ртуть в природных водах может присутствовать в трех состояниях: элементарном, одновалентном и двухвалентном. Формы ее нахождения зависят от pH и Σ_{L} среды, от характера и концентрации анионах преобладает Hg^{2+} , а в восстановительных - Hg^0 [4]. В присутствии сульфид-иона даже при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала двухвалентная ртуть стабилизируется в виде гидросульфида или сульфидных комплексов.

Ионы Hg^{2+} образуют большое количество комплексных соединений с координационным числом 2,3,4,5,6 и 8, в которых связи "Ртуть-сталь" имеют ковалентный характер и обладают высокой прочностью [27]. Наиболее устойчивы комплексы с лигандами, содержащими атомы галогенов, азота, фосфора, серы, углерода. Ион Hg_2^{2+} образует ограниченное количество комплексов, что обусловлено как слабо вытак и реакцией диспропорционирования ее соединений [19].

В хорошо аэрируемых водах, содержащих небольшое количество стабильных органических лигандов, ртуть может находиться (в зависимости от pH среды и концентрации хлоридов) в виде комплексных соединений с хлором и гидроксилом [19]. Расчеты, выполненные Н.Н. Линником и Б.И. Набиванцем [13], показали, что в окислительных условиях в слабокислой и нейтральной среде при содержании хлоридов в 36 мг/л подавляющая часть ртути находится в виде HgCl_2^0 , тогда как при $\text{pH} > 7,0$ доминирующей формой является гидроксид ртути (II). В восстановительной обстановке характерно присутствие элементарной ртути, а также образование сульфидных комплексов $\text{Hg}^{(II)}$ различного состава.

При наличии достаточных количеств органических соединений ртуть образует с ними стабильные комплексы [45]. Особенно сильные ковалентные комплексы образуются с серосодержащими лигандами - пистеином, аминокислотами, оксикарбоновой кислотой. Очень устойчивые комплексные соединения ртути (II) формируют с органическими макролигандами - веществами гумусовой природы [19]. Среди других тяжелых металлов ртуть, по данным Р.Мантуры (1978), по устойчивости гуматных и фульватных комплексов занимает первое место в известном ряду Ирвинга-Уильямса. В последние годы доказана возможность связывания ионов Hg^{2+} в комплексы поверхностно-активными веществами, значительные количества которых содержатся в за-

грязненных водах. Как показано хорошо известными работами С.Раммутти, ртуть активно связывается с компонентами микробиологической среды [19]. Предполагается, что ионы металла могут проникать в бактериальные клетки, которые эффективно конкурируют с компонентами питательной среды в связывании ионов.

Результаты исследования молекулярно-массового распределения растворенных форм ртути (II) показали, что они в основном связаны с фракцией органических веществ с молекулярным весом порядка 500-100000 [13]. Характерно, что в незагрязненных водах преобладают (около 75%) фракции с низким молекулярным весом (< 500), а в загрязненных - преобладает (до 66%) связь с частицами, имеющими молекулярный вес более 100000. Как правило, фиксируется хорошая корреляция между распределением ртути и растворенного органического углерода в различных по молекулярному весу фракциях.

Существующие данные по реальным формам миграции ртути (II) в растворе природных вод свидетельствуют о преобладании ее закомплексированных форм [13].

Среди различных соединений ртути (II) в природных водах по своему экотоксикологическому значению важнейшее место принадлежит элементоорганическим соединениям типа R_2Hg и RHgX (где R - органический радикал, X - остаток неорганической или органической кислоты). Обычно эту группу специфических элементоорганических соединений разделяют на две категории [26]: I - соединения, в которых ртуть является амфифильной, то есть связывается с одним органическим радикалом и неорганическим анионом ($\text{R}-\text{Hg}^{d+}-\text{X}^{d-}$); 2 - соединения, в которых ртуть является липофильной, то есть связывается с двумя органическими радикалами ($\text{R}-\text{Hg}-\text{R}'^1$). Первая группа характеризуется водной и липидной растворимостью и устойчивостью в водной системе - например, ион метилртути (CH_3-Hg^+). Вторая группа включает неполярные соединения, почти нерастворимые в воде и очень летучие. Данных о содержании элементоорганических соединений ртути в поверхностных водах немного, к тому же они в значительной мере противоречивы. Имеются указания на то, что такие соединения составляют не более 1% общего количества растворенной ртути. В то же время, в некоторых речных водах, по приводимым Н.Н.Линником и Б.И.Набиванцем [13] данным, на долю ртутьорганических соединений приходится до 46% общей растворенной ртути, а в некоторых озерных водах доля метилртути достигает 20%. При этом за редким исключением в поверхностных водах обнаружены только метильные производные ртути, хотя ежегодно в мире химической промышлен-

ностью производится огромное количество этильных и фенильных ее соединений, часть которых в итоге попадает в водные системы. Но эти соединения неустойчивы и быстро трансформируются в результате микробиологических и химических процессов, которые сопровождаются последующим природным метилированием с образованием метильных производных. В свою очередь, основными продуктами метилиации ртути являются моно- и диметилртуть. Если образуется диметилртуть, то благодаря своей низкой растворимости в воде и высокой летучести она легко испаряется в атмосферу, где подвергается разложению до элементарной ртути под воздействием ультрафиолета солнечной радиации. Если же образуется монометилртуть, то она извлекается из донных отложений, взвеси и аккумулируется в живых организмах. Соотношение между количествами образующихся моно- и диметилртути сильно зависит от pH. При более высоких значениях pH (до 8-9), почти вся метилированная ртуть находится в форме диметилртути, при более низких условиях pH преобладает монометилртуть.

Ртуть поступает из антропогенных источников и мигрирует в поверхностных водах в двух основных формах: растворенной и взвешенной. В свою очередь, как растворенные, так и взвешенные фракции характеризуются заметным разнообразием ее форм нахождения. Рассмотренные выше материалы в большей степени касались нахождения и миграции ртути в растворе природных вод. Относительно же взвешенных форм имеющиеся данные достаточно противоречивы. Так, результаты обобщения, выполненного С.Рамамурти и Дж.Муром, свидетельствуют о том, что ртуть в природных водах интенсивно связывается с твердым взвешенным веществом (табл.32). В то же время, имеются утверждения, подтвержденные фактическим материалом, о том, что значимость взвешенных форм в миграции ртути невелика. Возможно, такое утверждение в какой-то степени правомочно для фоновых водотоков. В условиях же загрязнения роль взвешенных форм, безусловно, будет очень значима. Это может быть обусловлено, во-первых, сильно увеличенным содержанием взвешенных веществ в загрязненных водах. Более того, поскольку ртуть (Hg) характеризуется высокой электроотрицательностью, она должна достаточно активно адсорбироваться на взвешенных частицах. Степень же связывания зависит от pH, минерализации, Eh и присутствия органических лигантов. По данным Дж.Мура и С.Рамамурти [19] со взвешенными частицами (размером $< 20-0,45 \text{ мкм}$) связано примерно в 10^5 больше ртути, чем с растворенными, причем независимо от природы взвесей. В последние годы в виде особой формы миграции ртути выделяют кол-

Таблица 32. Взвешенные формы нахождения ртути в природных водах

Тип воды	Доля взвешенных форм, %	Содержание ртути во взвеси, мг/кг
Озерная	10-13	-
Речная	83-96	-
"	31-58	1,08-1,45
"	87	1,8
Эстuarная	96-98	4,3-4,3
Морская	96	9,6
Сточные (города)	82	35,5

лоидную форму. В частности, детальные исследования физико-химического состояния ртути в поверхностных водах были выполнены Р.Кулматовым (1982, 1983). Эти работы показали, что в поверхностных водах Средней Азии основная доля ртути мигрирует в форме истинных и коллоидных растворов, при этом для ртути характерно преобладание анионных, нейтральных и коллоидных форм. Присутствие значимой массы ртути в форме истинных растворов и тончайших коллоидов, которые являются устойчивыми формами и могут переноситься на значительные расстояния, заставляют считаться с возможностью образования обширных ореолов загрязнения природных вод.

Таким образом, в настоящее время имеется значительное количество информации о формах нахождения и миграции ртути в поверхностных водах. Однако большая часть этой информации носит в основном теоретический характер, либо посвящена рассмотрению потенциального поведения ртути в природных условиях. Работ, посвященных рассмотрению особенностей поведения и распределения ртути в зонах влияния конкретных источников загрязнения не так много. В то же время, каждая водная система отличается присущими только ей специфическими параметрами, определяемых как природными, так и техногенными факторами. Естественно, что они будут характеризоваться большим разнообразием распределения и миграции ртути. Это особенно ярко будет проявляться в условиях загрязнения.

I. Особенности поступления и распределения ртути в водах рек урбанизированных районов

Как уже отмечалось, химические элементы, в том числе и ртуть,

мигрируют в природных водах в двух основных группах физико-химических форм – растворенной и взвешенной. Соотношение этих форм зависит от факторов среды миграции, а в условиях техногенного воздействия и от характера и режима работы источника загрязнения. Все это может приводить к широкому варьированию соотношения этих групп форм. Общая концентрация растворенных форм складывается из суммы неорганических и органических компонент. В условиях загрязнения она определяется прежде всего уровнем содержания в поступающих сточных водах и степенью их разбавления речными водами. Большое значение также имеют химические и биогеохимические взаимодействия в системе вода – донные отложения – биота, в ходе которых уровень концентрации растворенных форм может меняться. Например, в случае интенсивного загрязнения донные отложения могут являться источником вторичного поступления ртути в водную fazу.

Количество элемента, мигрирующего во взвешенных формах (то есть его содержание, связанное со взвешенным веществом, приходящимся на единицу объема воды), зависит как от абсолютных его концентраций в самой взвеси, так и от степени разбавления "техногенных" взвешенных частиц природными литогенными частицами и водной массой (то есть зависит от водообильности водотока и мутности воды). Ртуть, связанная со взвешенным веществом, может быть закреплена в различных гранулометрических фракциях взвеси и химических формах.

Рассмотрим особенности поступления и распределения ртути и ее основных форм миграции на примере р. Нуры в зоне влияния промышленного города. Как уже отмечалось, в течение последних 40 лет в систему р. Нуры поступают значительные объемы сточных вод, содержащих высокие концентрации различных поллютантов, в том числе и ртуть. С 1950 г. в реку постоянный сброс сточных вод, обогащенных ртутью, осуществляет завод "Карбид" (по так называемой Главной канаве сточных вод), расположенный в г. Темиртау и до 1976 г. не имевший локальных очистных сооружений. По оценкам на середину 60-х годов существовавшие в городе очистные сооружения работали с перегрузкой и имели низкое качество очистки сточных вод [22]. Особо следует подчеркнуть то, что до середины 70-х годов в реку осуществлялся сброс шламовых вод КарГРЭС-1, содержащих огромное количество взвешенных веществ – до 2500 мг/л (в среднем в 100 раз выше фона). Это имело существенные литогеохимические последствия и отразилось на особенностях современного аллювиального осадконакопления в бассейне реки. По разным параметрам зона загрязнения в р. Нури в середине 60-х годов четко фиксировалась на расстоянии до 150 км от места

пуска сточных вод [20].

Несмотря на то, что с 1976 г. на указанном заводе начали функционировать локальные очистные сооружения, позволившие улавливать значительную часть ртути, уровень загрязнения вод р. Нуры по-прежнему достаточно высок. Это связано с поступающими сточными водами предприятий, расположенных в г. Темиртау (ПО "Карбид", Карагандинский металлургический комбинат, крупная ГРЭС). Достаточно отметить, что в настоящее время со сточными водами ПО "Карбид" на городские очистные сооружения поступает около 13,5 т ртути. Считается, что практически вся эта масса остается на очистных сооружениях в составе осадков сточных вод, а в реку со сбрасываемыми стоками переходит ежегодно в среднем около 158 кг ртути. Дальнейшая же судьба "ртутных" осадков сточных вод неизвестна.

Для оценки современного уровня загрязнения водной массы р. Нуры в летний период был выполнен следующий комплекс гидрохимических исследований:

1. Гидрохимическое прослеживание состава воды на 6 стационарных створах. Створ 1 находился на р. Нуре ниже плотины Самаркандского водохранилища (то есть выше места сброса сточных вод, осуществляемых по Главной канаве сточных вод); выполненные на нем наблюдения позволяют оценить поступление ртути из водохранилища. Створ 2 располагался в устье Главной канавы сточных вод, что позволило оценить особенности техногенного поступления ртути. Створ 3 – на р. Нуре, непосредственно ниже канавы, то есть в пределах зоны смешения речных и сточных вод. Створы 4–6 были расположены на р. Нуре на различном удалении от Главной канавы (6 км, 16 км и 30 км соответственно) и позволяют оценить особенности миграции ртути в пределах наиболее интенсивно загрязненного участка русла реки. На указанных створах в течение 8 дней велись ежедневные наблюдения за распределением в воде ртути и ее основных форм миграции.

2. Динамические гидрохимические наблюдения на створе 2 (устье Главной канавы сточных вод) в течение одного дня с интервалами опробования 30 минут для растворенных форм и 60 минут для взвешенных форм ртути. Эти наблюдения позволяют выявить особенности поставки ртути источником загрязнения на коротких интервалах времени.

3. Разовое гидрохимическое прослеживание состава воды р. Нуры на участке от г. Темиртау до с. Самарка с отбором проб на II створах, позволяющее оценить дальность влияния источника загрязнения.

В табл. 33 приведены данные гидрохимических прослеживаний сос-

Таблица 33. Распределение ртути в воде р.Нуры по данным гидрохимического прослеживания (среднее за 8-дневный период наблюдения)

Параметр	Створ 1	Створ 2	Створ 3	Створ 4	Створ 5	Створ 6
Растворенная, мкг/л	0,94 0,5-1,2 (11,8)	2,88 0,92-5,3 (36)	0,87 0,5-1,2 (10,9)	1,31 0,40-4,10 (16,4)	1,22 0,04-4,2 (15,3)	2,09 0,24-4,10 (26,1)
Взвешенная, мкг/л	0,12 0,08-0,18 (2)	1,31 0,1-1,6 (21,8)	0,89 0,06-2,1 (14,8)	0,07 0,04-0,14 (1,2)	0,10 0,04-0,2 (1,7)	0,08 0,04-0,2 (1,3)
Общее содержание, мкг/л	1,06 0,68-1,3 (7,6)	4,19 1,2-9,0 (30)	1,76 0,82-3,3 (12,6)	1,38 0,44-4,24 (9,9)	1,32 0,28-4,4 (9,4)	2,12 0,28-4,3 (15,5)
Доля взвешенной, %	11,3 7,7-20,5	31,3 7,4-76,2	50,6 7,3-72,3	5,1 3,3-12,2	7,6 4,2-18,9	3,7 1,4-15,0
Абсолютная концентрация во взвеси, мкг/кг	19,7 7,8-38,2 (2,5)	209,4 5,5-398 (26,2)	79,8 4,3-218,7 (10)	61,5 16-140 (7,7)	73,9 9-200 (9,2)	60,9 9,6-200 (7,6)
Мутность, мг/л	7,3 5,5-12,7	8,4 4-18	9,9 6-14,1	1,6 1-2,5	2,1 1-4,2	3,3 1-7,3

Причение: Числитель - среднее; знаменатель - пределы колебаний, в скобках - Ко - коэффициент концентрации относительно фона (фоновое содержание растворенных форм - 0,08 мкг/л; взвешенных форм - 0,06 мкг/л; фоновое зелевое содержание - 0,14 мкг/л).

тава воды, выполненных на 6 стационарных створах. Прежде всего, следует отметить стабильное присутствие в водах Главной канавы стоков очень высоких концентраций ртути (Ко растворенных форм до 70; взвешенных до 26). В течение всего периода наблюдений концентрации растворенной ртути превышали существующую ПДК для объектов хозяйствственно-питьевого назначения (в 1,8-10,6 раз). Среднее валовое содержание ртути составляет 4,19 мкг/л, а средний расход сточных вод поступающих в канаву, колеблется примерно около 2 м³/сек. Таким образом, при данном стационарном режиме сточных вод в реку Нуру с ними поступает около 270 кг ртути в год.

Уровни содержания ртути в районе створа I заметно ниже, нежели в канаве стоков (табл.33). Однако, если степень концентрирования данного элемента во взвешенных формах сравнительно невелика (Кс в среднем = 2), то для его растворенных форм стабильно фиксируются высокие концентрации (в 1-2,4 раза выше ПДК). Это указывает на то, что значительные количества ртути поступают за счет попусков и фильтрации воды из Самаркандского водохранилища, в которое сбрасываются "условно-чистые" сточные воды основных предприятий г.Темиртау.

Непосредственно ниже Главной канавы (створ 3, табл.33) в результате процессов гидродинамического перемешивания, приводящих к разбавлению исходных концентраций ртути в поступающих сточных водах, отмечается снижение ее содержаний. Однако интенсивность проявления техногенных аномалий достаточно велика. Коэффициенты концентрации относительно фона для растворенных и взвешенных форм в среднем составляют 10,9 и 14,8 соответственно, причем содержания ртути в растворе речных вод стабильно превышают ПДК (в 1-2,4 раза). Таким образом, при существующих объемах поступающих сточных вод и выявленных уровнях содержания ртути не происходит разбавления стоков речными водами до нормативных показателей.

Анализируя поведение ртути в водах р.Нуры на участке от створа 3 до створа 6, следует отметить достаточно однородный характер распределения ее взвешенных форм, отличающихся слабоконтрастными аномалиями (табл.33, рис.7). Напротив, для растворенных форм фиксируется четкая тенденция к увеличению концентраций по мере удаления от основного источника загрязнения. (табл.33, рис.7). Так, средние уровни растворенной ртути на створах 4-6, стабильно превышая ПДК, в 1,5-2,5 раза выше, нежели на створе 3. Это явно указывает на существование на этом отрезке реки дополнительных источников поступления ртути в водную fazу. Можно предположить, что увеличи-

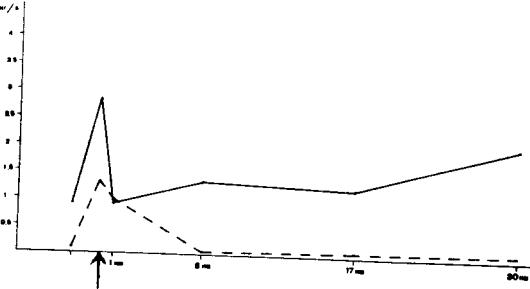


Рис.7. Распределение растворенных (сплошная линия) и взвешенных (пунктир) форм ртути в воде реки Нуры (средние данные за 8-дневный период наблюдения). Стрелкой показано место поступления сточных вод.

ние содержаний ртути в водной массе могут вызывать поступающие в реку возвратные (дренажные) воды орошения. Однако сравнительное изучение состава оросительных и дренажных вод показало, что уровни содержания ртути в сбросовых водах орошения в целом заметно ниже, нежели в оросительных (то есть в речных) водах (табл.34). Это, в частности, указывает на то, что существенная часть ртути, поступающая с речными водами, аккумулируется в агроландшафтах или улетучивается в атмосферу. Таким образом, единственным реальным источником поступления ртути в водную фазу могут быть интенсивно загрязненные техногенные илья. Характерно, что на данном участке в речной воде постоянно фиксировались также заметные увеличения концентраций сульфатов, хлоридов, растворенных железа и марганца, ряда других компонентов.

Таблица 34. Уровни содержания растворенной ртути в водах оросительных и дренажных систем, мкг/л

Параметр	Оросительные системы	Дренажные системы
Среднее	0,83	0,55
Пределы колебаний	0,50-1,0	0,38-0,88
Коэффициент относительно фона (средний)	10,4	6,8

Примечание: Приведены средние данные для правобережной оросительной системы поймы р.Нуры.

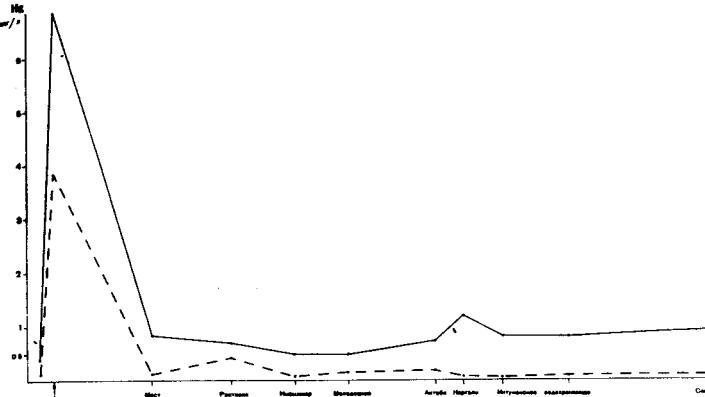


Рис.8. Распределение растворенных (сплошная линия) и взвешенных (пунктир) форм ртути в воде реки Нуры по результатам разового опробования

Относительно невысокое содержание взвешенных форм ртути на данном участке русла р.Нуры связано с малой мутностью поверхностного слоя воды. В самой же взвеси абсолютные концентрации этого элемента достаточно велики и превышают как фоновые уровни, так и содержания на участке реки выше Главной канавы стоков (табл.33). Это указывает на то, что в составе взвеси преобладают, по всей видимости, тонкие "техногенные" частицы, обогащенные ртутью и способные мигрировать на значительные расстояния. Безусловно, определенное количество взвешенной ртути переносится нижними слоями воды, которые, как известно, отличаются более высокой мутностью.

Таким образом, на всем изученном 30-км участке реки стабильно отмечается высокий уровень загрязнения поверхностных вод ртутью. Преобладание ее растворенных форм, высокие концентрации во взвеси, а также поступление в водную fazу из илов указывают на повышенную миграционную способность данного элемента, что должно выражаться в протяженных техногенных аномалиях, прежде всего в растворе речных вод.

Действительно, даже разовое гидрохимическое прослеживание выявляет достаточно сильное загрязнение реки Нуры на всем 100-км участке от г. Темиртау до с. Самарка, то есть на предполагаемом тракте канала Караганда-Джезказган (табл.35, рис.8). Наиболее контрастно

Таблица 35. Распределение ртути в воде р.Нуры по данным разового гидрохимического прослеживания (в скобках Кс)

Место отбора проб	растворенная мкг/л	взвешенная общее содержание мкг/л	доля взвешен- ной, от общего, %	абсолютная концентрация в воде взвеси, мг/кг	Мутность, мг/л	
0,5 км выше сброса стоков Устье Главной канавы стоков	0,40 (5) 6,8 (85)	0,15 (2,5) 3,8 (63,3)	0,55 (3,9) 10,6 (75,7)	27 36	19,5 (2,4) 481 (60,1)	7,7 7,9
Мост на шоссе Темиртау - Ростовка	0,82 (10,3) 0,58 (7,3)	0,09 (1,5) 0,41 (6,8)	0,91 (6,5) 0,99 (7,1)	4 41	90 (II,3) 293 (36,6)	1,0 1,4
Ростовка	0,44 (5,5)	0,09 (1,5)	0,53 (3,8)	17	12 (I,5)	7,5
Кзыл-Жар	0,44 (5,5)	0,12 (2)	0,56 (4,7)	18	120 (15)	1,0
Молодецкое	0,74 (9,3)	0,18 (3)	0,92 (6,6)	20	4 (0,9)	45
Актобе	1,16 (14,5)	0,10 (1,7)	1,26 (9)	8	9,4 (I,2)	10,7
Каргали	0,82 (10,3) 0,80 (10)	0,07 (1,2) 0,08 (1,3)	0,89 (6,4) 0,88 (6,3)	8 9	7,7 (I) 8,7 (I,1)	9,1 9,2
Верховья Интумакского водохранилища	0,90 (11,3)	0,07 (1,2)	0,97 (6,9)	7	30,4 (3,8)	2,3
Нижний бьеф Интумак- ского водохранилища						
Самарка (105 км ниже сброса стоков)						

техногенные аномалии фиксируются для растворенных форм ртути. Взвешенные формы ртути отличаются слабоконтрастными аномалиями. В данном случае это обусловлено как относительно невысокими абсолютными концентрациями в самой взвеси, так и сравнительно малой мутностью речных вод. Можно предположить то, что значительная часть "техногенной" взвеси выводится из водного потока на первых 30-40 км реки ниже города, формируя контрастные аномалии в донных отложениях. Результаты разового прослеживания показали, что на отдельных участках реки (в частности, в районе Интумакского водохранилища) также наблюдается заметное увеличение содержаний растворенных форм ртути. Это связано, прежде всего, с ее поступлением из донных отложений и, вероятно, является результатом интенсификации биогеохимических процессов, особенно в верховых названного водохранилища. В частности, формирующаяся на прибрежных отмелях корка из отмерших водорослей отличалась высокими уровнями ртути. Резкое увеличение содержания взвешенных форм на участке реки перед п.Ростовка может быть связано с размывом загрязненных илов и поступлением в водный поток обогащенной ртутью тонкой взвеси. Это, в частности, выразилось в значительном увеличении абсолютных концентраций ртути в самой взвеси (с 90 до 293 мг/кг), тогда как мутность практически не изменилась (табл.35).

При стабильно высоких уровнях ртути в воде реки Нуры для ее концентраций характерна резко выраженная временная неоднородность распределения, которая особенно четко проявляется на коротких интервалах времени. Выявленная неоднородность (динамичность) распределения, как правило, более резко фиксирующаяся для растворенных форм, может быть обусловлена особенностями поставки загрязняющего вещества, то есть режимом работы источников загрязнения; неравномерностью поступления ртути из донных отложений; существующей гидродинамической неоднородностью водного потока, а также может быть связана с различной интенсивностью биогеохимических процессов и фазовых превращений форм миграции.

Наиболее динамичен состав воды вблизи источника загрязнения, причем как в интервалах опробования "сутки" (рис.9), так и при отборе проб с интервалом "минуты-часы" (рис.10). Принципиально важным является тот факт, что при динамических наблюдениях на всех створах и в любых интервалах времени более 90% проб воды характеризуются концентрациями ртути, превышающими ПДК. Это еще раз подтверждает стабильно высокий уровень загрязнения водной массы реки.

Существующая неоднородность в распределении взвешенных

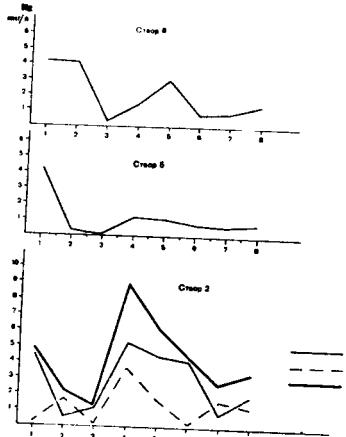


Рис.9. Динамика распределения ртути в воде Главной канавы сточных вод (створ 2) и реки Нуры (створы 5 и 6). Приведены средние данные за 8-дневный период наблюдения.

1 - растворенные формы, 2 - взвешенные, 3 - общее содержание

и растворенных форм выражается в самом разнообразном соотношении их долей в общем содержании ртути в воде, что наиболее сильно проявляется вблизи источника загрязнения. Так, в Главной канаве стоков и непосредственно ниже нее доля взвешенных форм ртути от вала в течение 8-дневного периода наблюдения изменялась от 7 до 76% (табл.33). Таким образом, в отдельные дни большая часть ртути может поступать во взвешенных формах, что, в частности, наблюдалось непосредственно (рис.10). В среднем же около 30% ртути, поступающей со сточными водами по Главной канаве стоков, связано со взвешенными формами (табл.33). По мере удаления от источника загрязнения относительная доля взвешенных форм стабилизируется, изменяясь от 4 до 8% (табл.35). По данным Г.Ф.Вознесенского и соавторов (1983) в весенний и осенний периоды в ближней зоне воздействия в растворенных формах присутствовало до 7-8% органических соединений ртути, в летнюю межень их доля снижалась до 1%.

Как отмечалось ранее [6], при оценках степени техногенного воздействия на водотоки необходимо учитывать не только объемную концентрацию ртути, связанную со взвешенным веществом (выражаемую как мкг/л), но и распределение абсолютных концентраций ртути во взвеси (выражаемых как мг ртути на кг взвеси). При высокой мутности и значительных уровнях ртути во взвеси контрастность техногенных аномалий взвешенных форм будет максимальной. Принципиальным является и выявление форм закрепления поллютанта в твердом взвешенном веществе. Так, изучение особенностей распределения ртути по гра-

Таблица 36. Формы нахождения ртути в твердом взвешенном веществе р.Нуры

Место отбора проб	Валовое содержание, мг/кг	Сухофагные		Оксидные		Элементарная		Прочно-связанные	
		мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
Створ 1	37,61	0,43	1,1	15,98	42,5	7,10	18,9	14,10	37,5
Створ 2	136,86	0,31	0,20	55,88	43	71,17	52	6,5	4,8
Створ 3	85,44	0,22	0,30	51,86	60,7	17,65	20,7	15,71	18,40
Фон	3,24	0,02	0,60	2,30	71	0,90	27,8	0,02	0,60

Приимечание: мг/кг - абсолютная концентрация; % - доля форм от вала; при извлечении форм ртути использовалась следующая последовательная схема: сульфатные - 0,1 М HCl; оксидные - 6 М HCl; элементарная - концентрированный HNO₃; прочно связанные - остаток.

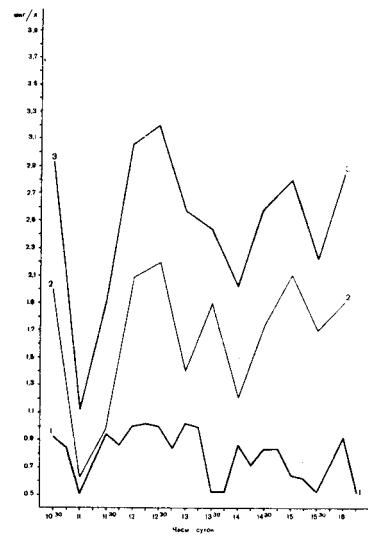


Рис. 10. Динамика распределения ртути в водах Главной канавы сточных вод.

I - растворенные формы,
2 - взвешенные, 3 - общее содержание

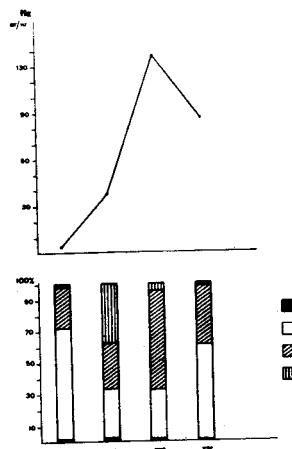


Рис. II. Формы нахождения ртути во взвесях.

I - сульфатная, 2 - оксидная,
3 - элементарная, 4 - прочносвязанные;
I - фон, II - р. Нура выше места сброса стоков, III - Главная канава сточных вод, IV - р. Нура ниже места сброса сточных вод

нулометрическим фракциям взвеси показало четкую зависимость увеличения ее концентраций от грубых к более тонким фракциям. Это, в частности, подтверждает приводимый выше факт о том, что даже при невысокой мутности воды могут наблюдаться достаточно высокие концентрации ртути во взвешенной форме. К тому же, по мере удаления от города в составе взвеси (при низкой мутности) увеличивается доля именно тонких частиц. Принципиально важным является и тот факт, что ртуть, связанная со взвесью, поступает в р. Нуру в значительной своей массе в подвижных, геохимически активных формах (табл. 36). По мере миграции взвеси в водном потоке происходят преобразования "первичных" форм (образовавшихся при технологических процессах), что приводит к изменению концентраций и их соотношения в общем балансе (рис. II).

Выявленные особенности распределения и поведения ртути в условиях загрязнения подтверждаются результатами исследований на других объектах. Так, нами изучалось распределение взвешенных и растворенных форм ртути в водах малой реки (р. Лахра, Московская область) в зоне влияния промышленного города (г. Подольск) - (табл. 37, рис. 12). Как видим, наиболее контрастно техногенные аномалии проявились для взвешенных форм миграции ртути (от 300-400 Кс вбли-

зи источника до 30-40 при удалении). Это связано как с увеличенной (в 2-3 раза) мутностью загрязненных вод, так и (в большей степени) с высокими абсолютными концентрациями ртути в самой взвеси. Например, если средняя абсолютная концентрация ртути в фоновой взвеси составляла 0,09 мг/кг, то на створе I - II, 56 мг/кг при колебаниях от 0,2 до 22 мг/кг. Для взвешенных форм характерна резко выраженная неоднородность распределения, особенно вблизи источника загрязнения. Контрастность техногенных аномалий ртути в растворе вод заметно ниже ($K_c = 9-11$), нежели во взвешенных формах ($K_c = 30-400$). Однако аномалии в растворенных формах очень стабильны в пространстве. В техногенных условиях, особенно вблизи к источнику загрязнения (рис. 12), соотношение взвешенных и растворенных форм ртути в среднем примерно равное. Однако фиксируется незакономерная смена преобладания в течение срока наблюдения то одной, то другой формы. По мере удаления от источника (створ 2 и 3) начинают заметно преобладать растворенные формы ртути. Но следует отметить, что даже в этих случаях абсолютное содержание последней во взвеси значительно превышало фоновый уровень. Нетрудно заметить, что в условиях загрязнения фиксируется принципиально иное соотношение взвешенных и растворенных форм, чем в фоновых водах. Если в фоновых условиях ртуть мигрировала главным образом в растворенной форме, то в загрязненных водах значение взвешенных форм резко возрастает. Безусловно, мы имеем дело с совершенно новым типом аномальности, проявляющейся не только (часто не столько) в возрастании валовых со-

Таблица 37. Ртуть в воде р.Пахры, мкг/л

Створ наблюдения	Среднее содержание			Доля взвешенных форм, %
	Взвешенные формы	Растворенные формы	Валовое	
Фоновый	0,0015 (90)	0,0660 (81)	0,0675	2,3
I	0,5520 (137)	0,7300 (52)	1,2820	43,1
2	0,0450 (153)	0,6360 (101)	0,7410	6,1
3	0,0620 (37)	0,5960 (78)	0,658	9,2

Причина: Приведены средние данные за 32-дневный период наблюдения; створ I-3: р.Пахра в зоне влияния г. Подольска; № I - в устье ручья, принимающего основной бытовой и промышленный сток города; № 2 - в 2 км ниже устья ручья на реке; № 3 - в 9 км ниже устья ручья; в скобках приведены коэффициенты вариации.

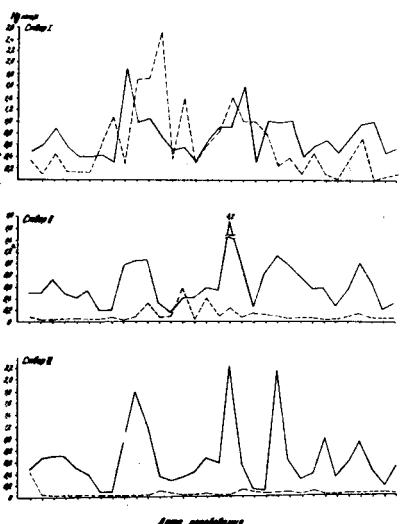


Рис.12. Динамика распределения растворенных (сплошная линия) и взвешенных (пунктир) форм ртути в воде р.Пахры в зоне влияния г.Подольска. Описание створов см. в табл.37.

держаний, а прежде всего в резкой трансформации основных форм миграции. В данном случае это проявилось в значительном увеличении доли взвешенных форм миграции ртути. По всей видимости, значимость взвешенных форм миграции для ртути в условиях загрязнения (в срав-

нении с фоном) является наиболее характерной чертой техногенных водных потоков рассеяния этого металла, что фиксируется во многих других районах. Так, аналогичное возрастание доли взвешенных форм наблюдалось нами и в р.Инсар в зоне влияния г.Саранска (табл.38).

Таблица 38. Ртуть в водах р.Инсар в зоне влияния г.Саранска, мкг/л

Место отбора проб	Растворенные формы	Взвешенные формы	В а л	Доля взвешенных форм, %
Фон	0,07	0,02	0,09	22
Устье ручья, дренирующего промышленную зону	0,40	0,50	0,90	56
Ниже города	0,09	0,10	0,19	52

Таким образом, в условиях загрязнения особенности распределения и поведения ртути в поверхностных водах определяются сложным взаимодействием техногенных и природных факторов. Это может приводить к принципиально иному как количественному, так и качественному соотношению основных форм миграции. В случае интенсивного техногенного воздействия в водах рек урбокомплексов фиксируются контрастные и протяженные потоки рассеяния ртути. При общем преобладании растворенных форм отмечается резкое возрастание доли взвешенных форм миграции, играющих основную роль в формировании ярких и контрастных потоков рассеяния в техногенных илах. Экотоксикологическая и геогигиеническая опасность присутствия высоких содержаний ртути в водной массе усиливается постоянным поступлением ртути из сильно загрязненных донных отложений - техногенных илов, которые в прогнозе будут определять качество поверхностных вод и оказывать негативное воздействие на биоту.

2. Ртуть в техногенных илах

Осадконакопление как процесс естественной динамики ландшафта имеет не только положительные, но и отрицательные последствия для окружающей человека среды. Но, тем не менее только в последнее время стало осознаваться в какой степени хозяйственная деятельность способна усилить этот процесс и к каким катастрофическим последствиям это может привести. В результате интенсификации техноген-

ми факторами процессов осадкообразования и осадконакопления, главными звенями которых являются эрозия (поступление), перенос и осаждение, происходит гигантское перераспределение вещества. Участие в этих процессах огромных объемов материала (как природного, так и техногенного) неизбежно порождает существенные проблемы в водных системах.

В настоящее время человеческая деятельность не только меняет естественные условия осадконакопления, но и приводит к формированию в областях транзита и аккумуляции принципиально нового типа русловых образований – своеобразных аллювиальных отложений, являющихся по сути геологическими образованиями нового типа. На этот факт указывал еще В.И.Вернадский, отметивший, что человек не только коренным образом меняет окружающую среду, в том числе и водные системы, но и создает новые типы геологических образований, раньше не существовавших.

Ф.В.Котлов назвал геологический процесс формирования наиболее молодых в истории Земли образований, связанных с инженерно-хозяйственной деятельностью человека, антропогенным литогенезом [11]. Наиболее яркое проявление антропогенного литогенеза характерно для территорий городов и горнопромышленных районов.

В настоящее время в водотоках и водоемах в зоне влияния городских агломераций формируется новый тип современных русловых отложений – техногенные илы [6]. Их образование и накопление связано с изменением условий формирования прежде всего твердого стока рек в промышленных регионах и поступлением в водные объекты значительных масс твердого материала техногенного происхождения. По своим литогеохимическим особенностям они принципиально отличаются от русловой фации типичного речного аллювия. Важным является тот факт, что поставка твердого материала техногенного происхождения осуществляется как с поверхностным стоком с промышленно-урбанизированных территорий (в теплое время года), так и со сточными водами (круглогодично), значительно превышая природную.

Имеющиеся материалы позволяют говорить о техногенных илах как о новом генетическом типе аллювиальных отложений. Как известно, "генетический тип отложений – это совокупность осадочных или вулканических накоплений, возникающих в ходе одной из наблюдавших в природе своеобразных по динамике развития форм аккумуляции, особенности которой определяют общность главных черт их строения как закономерных сочетаний (парагенезов) определенных осадков или горных пород" [32, с.7]. Происхождение речных отложений (в том числе

техногенных илов) обусловлено прежде всего одной и той же причиной – гидродинамикой, гидрологическим режимом и особенностями геологической деятельности речного потока. Другое дело, если для природной деятельности речного потока "материальной" основой является "совокупность осадочных или вулканических накоплений", то для техногенных илов ведущее значение имеют образования, являющиеся результатом хозяйственной деятельности человека, то есть антропогенного литогенеза.

Как отмечает Е.В.Шандер, "аллювий является генетической категорией столь большого объема, что ... заслуживает ... возведения в ранг целой группы генетических типов" [32, с.7]. В настоящее время среди этой группы, безусловно, следует выделять новый генетический тип – техногенные илы (техногенные фации руслового аллювия).

До недавних пор донные отложения загрязненных водных систем изучались главным образом с методических позиций. Являясь конечным звеном ландшафтно-геохимических сопряжений, они в какой-то мере интегрируют геохимические особенности водосборной площади. Это позволяет по их химическому составу выделить техногенные потоки рассеяния и оценить степень техногенной нагрузки на водоток. Однако как следует из выше сказанного, к донным отложениям загрязненных водных систем следует подходить шире и изучать их комплексно, как новое геологическое образование, как самостоятельный генетический тип русловых отложений. Необходимость всестороннего изучения техногенных илов обуславливается следующими положениями.

1. Донные отложения (техногенные илы), являясь депонентом для загрязняющих веществ, служат индикаторами загрязнения. Изучение литогеохимических особенностей позволяет оценить характер, степень и интенсивность техногенного воздействия на водные системы.

2. Донные отложения (техногенные илы), являясь своеобразной "подводной почвой" (В.И.Вернадский), определяют многие особенности экологии водных систем и оказывают огромное влияние на формирование качества природных вод.

3. Донные отложения (техногенные илы) являются своеобразным фильтром, поглощающим и до некоторой степени обезвреживающим токсичные выбросы техногенеза.

4. Буферная способность донных отложений (техногенных илов) по отношению к поллютантам не беспредельна. Загрязненные отложения даже в случае полного прекращения поступления сточных вод в водный объект, длительное время могут являться вторичным источником загрязнения водной массы и биоты. Возникает необходимость разработки

ПДК поллютантов для этого компонента водных систем.

5. Химические реакции и микробиологические процессы в донных отложениях могут обуславливать трансформацию концентрирующихся в них поллютантов в более токсичные и/или подвижные соединения. Ярким примером является преобразование неорганических соединений ртути в экотоксичную метиатрут.

6. В случае чрезвычайно сильного загрязнения донных отложений (техногенных илов) возникает проблема их изъятия, последующих обезвреживания и утилизации. В отдельных случаях техногенные илы могут рассматриваться как вторичные источники различных полезных компонентов. Поэтому правомочно ставить вопрос о техногенных илах как новом типе (техногенных) месторождений.

Литохимические особенности техногенных илов

Сбросы значительных объемов сточных вод, аварийные залповье спуски и поверхностный сток с промышленно-урбанизированных зон способствовали поступлению в речную сеть больших объемов твердого материала техногенного происхождения, что принципиально изменило процесс современного аллювиального осадконакопления на значительной части русел рек городских агломераций.

Так, в настоящее время в системе р.Нуры в пределах и ниже г. Темиртау на значительном протяжении распространен новый тип аллювиальных отложений - техногенные илы, которые по своим морфологическим и литохимическим параметрам резко отличаются от естественного речного аллювия.

Фоновые участки русла реки Нуры выстланы, как правило, типичным речным аллювием, представляющим собой разновидности песков с обилием крупного материала и присутствием незначительных количеств глинистых частиц.

Русло реки в зоне влияния города в значительной степени (особенно на первых 40-50 км) сложено техногенными илами. Они представляют собой черные с пепельными прослойками илистые отложения, сверху мягкие (часто в виде насыщенной суспензии), книзу более плотные, пластичные, с резким неприятным запахом (химическим, сероводорода), маслянистые, жирные, при их взмучивании всплывают обильные нефтеподобные пятна и выделяется значительное количество газов. Очень часто в илах встречаются прослои серого и черного песка. Илы пачкаются и при длительном контакте оказывают раздражаю-

щее воздействие на кожу рук и разъедающее на резину (например, на экспедиционную лодку). На отдельных участках русла их мощность достигает 2-3 м, иногда до 3,5 м.

Интенсивность антропогенного литогенеза настолько велика, что на первых 8-10 км реки ниже основного поступления стоков ее русло практически полностью выстлано техногенными илами. По мере удаления илы встречаются в виде значительных пятен и линзообразных скоплений вблизи берегов, на отмелях, в затонинах. Свободные от ила участки русла выстланы песчано-гравийно-галечным материалом, реже песками. Однако очень часто в этих речных отложениях в качестве своеобразного наполнителя присутствуют частицы техногенного ила. Более того, в отдельных случаях илы могут образовывать заметные скопления даже на значительном расстоянии от города (в 80-100 км), а иногда даже полностью перекрывать слоем мощностью в 40-50 см русло реки, особенно в протоках, функционирующих в периоды половодий и паводков.

Проведенные расчеты показали, что на участке реки ниже города, протяженность которого составляет около 100 км, объем илов оценивается примерно в 1,3 млн.м³. Из этого количества около 340 тыс.м³ приходится на первые 9-10 км реки.

Гранулометрический анализ донных отложений фоновых участков реки Нуры показал резкое преобладание в них фракций крупного (около 57%) и среднего (около 30%) песка; заметна доля грубозернистого песка (до 7%). Доля более тонких фракций незначительна (табл.39). Такое распределение реально отражает состав природного аллювия степных рек данного региона.

В техногенных илах резко преобладают более тонкие частицы (табл.39). Так, заметно увеличена доля глинистых частиц (до 10-20%), а также фракций мелкого и тонкого песка и алеврита. Какой-либо четкой закономерности в вертикальном распределении фракций вблизи источника загрязнения в толще илов отмечено не было (табл.39). По мере удаления от источника воздействия отмечается, во-первых, общее снижение содержания более тонких (алеврита и глины) фракций, во-вторых, обогащение нижележащих слоев илов в сравнении с поверхностными слоями песчаными частицами и обеднение глинистыми и алевритовыми. Это указывает на существование определенной дифференциации мигрирующего в русле реки твердого материала и на развитие процессов его переотложения, которые более активно вовлекают в перенос тонкие фракции отложений. Таким образом, техногенные илы сравнительно интенсивно размываются и перемешиваются вниз по реке.

Таблица 39.

Гранулометрический состав техногенных илов р.Нуры, %

Створ опробования	Горизонт, см	Фракции, мм			Алеврит	Глина
		грубозернистый	крупный средний	мелкий		
2-I	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,063	0,063-0,04	<0,04
3 км ниже канавы стоков	2,7	3,1	54,5	7,8	16,1	3,8
20-40	2,6	3,1	3,7	5,2	12,7	50,8
40-60	2,5	3	56,7	7,9	15,9	3,9
60-80	0,7	0,7	17	19	21	15
80-100	2,0	3,0	13	39	1	22
100-120	0,7	0,7	28,7	3,3	50	3,3
120-140	5,7	3,0	3,5	13,2	6,8	49,9
40-60	1,3	3,4	27,2	31,5	8,4	5,3
80-100	0,3	8	27	31,4	12,1	5,1
120-140	0,6	22	24,8	32,6	12,1	1,4
20-40	0,6	9,3	31,6	32,7	8,2	5,4
20-40	0,1	2,2	31	30,1	8,8	5,2
90-120	0,8	27,4	86,9	25,8	2,1	0,8
0-80	6,6	57,4	80,2	1,9	0,5	0,8
ФОН						

Таблица 40. Основные компоненты химического состава (%) техногенных илов р.Нуры (слой 0-30 см)

Компонент	ФОН	Техногенный или ниже сброса стоков		
		4,4 км	9 км	44,5 км
SiO ₂	74,90	42,37	50,46	50,5
TiO ₂	0,24	0,80	0,75	0,68
Al ₂ O ₃	II,66	17,26	17,26	12,95
Fe ₂ O ₃	I,28	1,41	1,24	3,04
FeO	I,41	3,45	4,31	2,16
MnO	0,06	0,09	0,09	0,38
CaO	I,35	10,51	4,44	5,92
MgO	0,62	0,7	1,3	1,9
Na ₂ O	2,94	0,5	1,0	1,0
K ₂ O	3,36	1,00	1,9	2,05
P ₂ O ₅	0,07	0,34	0,27	0,29
H ₂ O ₂	0,26	0,68	1,66	4,04
III	I,73	19,6	14,39	14,94
S свободная	20,I	0,27	0,41	0,4
S общая	40,10	0,54	0,83	0,81
CO ₂	0,13	6,38	I,98	4,4
Фтор	0,02	0,05	0,025	0,05
Hg, мг/кг	0,044	200	200	10

Примечание: III - здесь и далее потеря при прокаливании.

Таблица 41. Основные компоненты химического состава (%) донных отложений р.Нуры (слой 0-20 см, 12,5 км ниже сброса сточных вод)

Компонент	Техногенный ил			
	1	2	3	5
SiO ₂	57,6	50,5	64,8	52,23
TiO ₂	0,69	0,75	0,59	0,79
Al ₂ O ₃	13,95	14,82	11,99	15,37
Fe ₂ O ₃	2,95	2,65	2,55	3,33
FeO	I,44	2,87	2,44	2,73
MnO	0,1	0,11	0,09	0,1
CaO	2,9	4,32	2,4	3,68
MgO	I,6	I,8	I,8	2,6
Na ₂ O	I,35	I,00	I,65	I,1
K ₂ O	2,05	I,8	2,2	2,1
P ₂ O ₅	0,23	0,26	0,15	0,24
H ₂ O	2,38	3,1	I,32	2,64
III	I2,48	I5,25	7,92	I2,07
S свободная	0,14	0,3	0,25	0,34
S общая	0,27	0,61	0,5	0,65
CO ₂	I,54	I,98	I,1	I,98
Фтор	0,03	0,03	0,03	0,03
Hg, мг/кг	20	100	15	200

I Номер вертикали опробования.

Техногенные илы принципиально отличаются от фоновых донных отложений и содержанием основных компонентов химического состава (табл. 41). Так, донные отложения фоновых участков русла р.Нуры характеризуют преобладанием SiO_2 , невысоким содержанием органических веществ, отсутствием серы; их состав довольно стабилен в пространстве. Техногенных илах доля кремния резко снижается (в среднем около 40%), иногда снижалась до 26-85%, заметно возрастает практическое содержание всех других компонентов, стабильно присутствуют высокие концентрации серы; резко увеличивается содержание органических веществ. Химический состав илов, резко отличающийся от состава коренного аллювия, менее выдержан в пространстве. Это наблюдается даже в пределах одного створа наблюдения (табл.41).

Химический состав техногенных илов на более глубоких горизонтах слегка отличается от верхних слоев, что является следствием его преобразования при консолидации и изменения различными диagenетическими процессами. В частности, увеличивается содержание соединений железа, марганца, магния, натрия, фосфора и уменьшается доли серы, фтора, органических веществ, кальция.

В целом, химическое своеобразие илов выдерживается на значительных расстояниях. Так, даже на удалении в 100 км состав илов практически идентичен составу илов вблизи источника загрязнения. Различие проявляется лишь в уровнях концентрирования поллютантов, прежде всего и.

Отмеченные выше характерные литогеохимические особенности техногенных илов фиксируются и при исследованиях в других регионах. Например, участки с развитием техногенных илов прослеживались в руслах многих рек Московской области. В частности, это наиболее резко выражено для участков русла р.Пахры ниже г.Подольска и р.Клязьмы в г.Шелково. На отдельных участках русла (в затонах, в местах меандрирования и т.п.) мощность подобных отложений достигает 1-1,5 м. В пространственном отношении они могут занимать заметную значительную часть современного русла. Как известно, сортированные наносы по длине русла у типично равнинных малых рек в природных условиях выражена слабо (Маккавеев, 1955). В данном случае в р.Пахре ниже г.Подольска гранулометрическая структура донных отложений резко трансформируется (табл.42). Заметно возрастает доля кварцевой и глинистой фракций (поставка со сточными водами), в меньшей степени фракции крупного песка (поставка с поверхностным стоком с городских территорий). Техногенное воздействие фиксировалось даже в изменении минерального состава отложений. Так, техногенные илы от фоновых донных отложений отличаются.

Таблица 42. Гранулометрический состав техногенных илов р.Пахры в зоне влияния г.Подольска

Участок реки	Фракция, мм			
	Песок		Алеврит	Глина
	крупный	мелкий		
I-0,25	0,25-0,1	0,1-0,01	0,01-0,005	<0,005
Выше города	19,8	53,1	26,2	0,5
Центр города	29	34,9	33,4	1,3
Ниже города, 3 км	8,7	33,5	49,2	3,8
Ниже города, 9 км	33,5	32,5	31	1,4
Ниже города, 25 км	15,7	40,2	40,6	1,6

ится повышенным содержанием гидроксидов железа, карбонатных минералов. Существенные различия и в химическом составе (табл.43). Характернейшая особенность техногенных илов - чрезвычайно высокое содержание в них техногенной органики (нефтепродуктов, ПАВ, ПХБ и т.п.). Например, содержания битумоидов в отложениях р.Пахры выше г.Подольска колебались в пределах 0,04-0,1 г/кг; ниже города они находились в пределах 0,8-10 г/кг.

Очень интенсивно техногенные илы развиты в р.Инсар в зоне влияния г.Саранска (Мордовия). Если фоновые участки русла выстланы типичным речным аллювием, представляющим собой разновидности песков с обилием более крупного материала и присутствием незначительных количеств глинистых частиц, то в зоне загрязнения, фиксируемой до устья, русло р.Инсар практически полностью сложено техногенными илами мощностью, как правило, до 1-1,2 м, в отдельных случаях до 2,5-3 м. Расчеты показали, что в русле р.Инсар на участке от города до устья (протяженностью в 70 км) аккумулировалось примерно 0,5 млн.м³ илов. По своему гранулометрическому и химическому составу илы резко отличаются от природного аллювия. Так, довольно четко прослеживается тенденция к увеличению доли более тонких частиц, прежде всего грубого алеврита и грубой глины. Это, в частности, находит отражение в своеобразном распределении доли физической глины (рис.13). Как видим, на участке реки выше города ее доля в среднем составляет около 17%, при входе реки в пределы города увеличивается до 25-30%. По мере удаления вниз по течению вплоть до устья отмечается снижение доли глинистых частиц, причем на отдельных участках

Таблица 42. Гранулометрический состав техногенных илов
р.Пахры в зоне влияния г.Подольска

Участок реки	Фракция, мм				
	Песок		Алеврит	Глина	
	крупный	мелкий		0,01-0,005	<0,005
I-0,25	0,25-0,1	0,1-0,01			
Выше города	19,8	53,1	26,2	0,5	0,4
Центр города	29	34,9	33,4	1,3	1,4
Ниже города, 3 км	8,7	33,5	49,2	3,8	4,8
Ниже города, 9 км	33,5	32,5	31	1,4	,6
Ниже города, 25 км	15,7	40,2	40,6	1,6	1,8

Химический состав техногенных илов на более глубоких горизонтах залегания несколько отличается от верхних слоев, что является следствием его преобразования при консолидации и изменения различными дегенеративными процессами. В частности, увеличивается содержание соединений железа, марганца, магния, натрия, фосфора и уменьшается доля серы, фтора, органических веществ, кальция.

В целом, химическое своеобразие илов выдерживается на значительных расстояниях. Так, даже на удалении в 100 км состав илов практически идентичен составу илов вблизи источника загрязнения. Различие проявляется лишь в уровнях концентрирования поллютантов, прежде всего ртути.

Отмеченные выше характерные литогеохимические особенности техногенных илов фиксируются и при исследованиях в других регионах. Например, участки с развитием техногенных илов прослеживались в руслах многих рек Московской области. В частности, это наиболее резко выражено для участков русла р.Пахры ниже г.Подольска и р.Клязьмы ниже г.Щелково. На отдельных участках русла (в затонах, в местах резкого меандрирования и т.п.) мощность подобных отложений достигала I-I,5 м. В пространственном отношении они могут занимать заметную долю значительную часть современного русла. Как известно, сортировкой донных наносов по длине русла у типично равнинных малых рек в природных условиях выражена слабо (Маккавеев, 1955). В данном случае в р.Пахре ниже г.Подольска гранулометрическая структура донных отложений резко трансформируется (табл.42). Заметно возрастает доля алевритовой и глинистой фракций (поставка со сточными водами), в меньшей степени фракции крупного песка (поставка с поверхностным стоком с городских территорий). Техногенное воздействие фиксировалось даже в изменении минерального состава отложений. Так, техногенные илы от фоновых донных отложений отличаются преобладанием SiO_2 , невысоким содержанием органических веществ, отсутствием серы; их состав довольно стабилен в пространстве. В техногенных илах доля кремния резко снижается (в среднем около 40-55%, иногда снижалась до 26-35%), заметно возрастает практический содержание всех других компонентов, стабильно присутствуют высокие концентрации серы; резко увеличивается содержание органических веществ. Химический состав илов, различаясь от состава коренного аллювия, уже менее выдержан в пространстве. Это наблюдается даже в пределах одного створа наблюдения (табл.41).

Очень интенсивно техногенные илы развиты в р.Инсар в зоне влияния г.Саранска (Мордовия). Если фоновые участки русла выстланы типичным речным аллювием, представляющим собой разновидности песков с обилием более крупного материала и присутствием незначительных количеств глинистых частиц, то в зоне загрязнения, фиксируемой до устья, русло р.Инсар практически полностью сложено техногенными илами мощностью, как правило, до I-I,2 м, в отдельных случаях до 2,5-3 м. Расчеты показали, что в русле р.Инсар на участке от города до устья (протяженностью в 70 км) аккумулировалось примерно 0,5 млн.м³ илов. По своему гранулометрическому и химическому составу илы резко отличаются от природного аллювия. Так, довольно четко прослеживается тенденция к увеличению доли более тонких частиц, прежде всего грубого алеврита и грубой глины. Это, в частности, находит отражение в своеобразном распределении доли физической глины (рис.13). Как видим, на участке реки выше города ее доля в среднем составляет около 17%, при входе реки в пределы города увеличивается до 25-30%. По мере удаления вниз по течению вплоть до устья отмечается снижение доли глинистых частиц, причем на отдельных участках

Таблица 43. Химический состав (%) техногенных илов
р.Пахры в зоне влияния г.Подольска

Компонент	Фон	Техногенный ил ниже города	
		2 км	9 км
SiO ₂	78,5	63,71	69,7
TiO ₂	0,47	0,39	0,22
Al ₂ O ₃	4,58	8,65	7,43
Fe ₂ O ₃ +FeO	2,68	3,93	2,94
MnO	0,07	0,02	0,03
MgO	1,27	0,66	0,5
CaO	3,17	6,09	5,73
Na ₂ O	0,71	0,69	0,57
K ₂ O	1,61	1,63	1,12
P ₂ O ₅	0,27	0,59	0,39
H ₂ O	0,82	0,96	0,44
H ₂ O ⁺	2,88	3,72	2,62
Фтор	0,2	0,21	0,2
CO ₂	2,06	3,19	1,82
S общая	0,04	0,09	0,06
ШПП	2,07	6,78	4,2
С органический	1,2	4,27	1,97

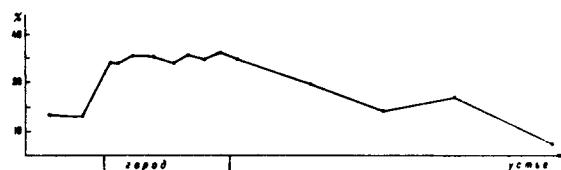


Рис. I3. Распределение физической глины
в техногенных илах р.Инсар в зоне влияния г.Саранска

стках в составе илов преобладают либо средние пески, либо грубый алеврит.

В техногенных илах по сравнению с фоновыми отложениями резко

Таблица 44. Химический состав (%) техногенных илов
р.Инсар

Компонент	Фон	Техногенный ил		
		Центр города	Ниже очистных сооружений	50 км ниже города
SiO ₂	83,63	61,07	55,61	53,42
TiO ₂	0,33	0,53	0,6	0,57
Al ₂ O ₃	5,22	9,1	13,25	10,16
Fe ₂ O ₃	2,03	3,51	6,02	4,75
FeO	0,57	1,94	2,51	2,16
MnO	0,078	0,05	0,057	0,097
CaO	0,78	2,04	1,88	9,43
MgO	0,37	1,21	1,05	1
Na ₂ O	0,56	0,84	0,87	0,97
K ₂ O	1,05	1,68	2,1	1,89
P ₂ O ₅	0,19	0,59	0,4	0,49
H ₂ O	1,37	2,72	1,17	2,4
ШПП	3,66	13,52	13,5	14,31
S общая	<0,1	0,42	0,74	0,28
CO ₂	0,5	0,66	0,88	0,86

снижается доля кремния и заметно возрастает содержание практических всех других компонентов, резко увеличивается количество органических веществ, стабильно присутствуют значимые содержания серы. Несмотря на то, что химический состав илов, резко отличаясь от состава коренного аллювия, заметно менее стабилен в пространстве, геохимическое своеобразие илов выдерживается на значительных расстояниях (табл.44).

Таким образом, интенсификация процессов антропогенного литогенеза приводит к формированию нового типа геологических образований – техногенной фации руслового аллювия, то есть техногенных илов. Именно илы являются ареной развития техногенных потоков рассеяния многих поллютантов, в том числе ртути.

Обычно потоки рассеяния химических элементов в донных отложениях описываются преимущественно в воде линейных объектов. Это обусловлено существующей технологией опробования русловых наносов – маршрутная съемка с отбором единичной пробы верхнего слоя отложений у уреза воды. Во многих случаях это оправдано и достаточно эффективно. Однако получаемые при этом данные не позволяют в должной мере оценить масштабы, протяженность и интенсивность загрязнения водотоков, а также выявить структурно-морфологические особенности зон загрязнения. В то же время, в экологии речную систему принято рассматривать как трехмерную структуру, в которой значение имеют изменения факторов среди и соответствующих ее параметров по течению водотока, поперек русла и по вертикали. Сказанное полностью относится и к толще донных отложений (техногенных илов), обладающих объемными параметрами. Естественно, что техногенные потоки тоже характеризуются не только протяженностью, но и реальной шириной и вертикальной мощностью. Именно поэтому нами при изучении техногенных потоков рассеяния поллютантов в илах кроме "стандартного" маршрутного литохимического опробования широко используется новый прием – так называемый метод поперечного створового опробования русла реки.

Суть этого приема, до настоящего времени практически не использующегося при аналогичных работах, заключается в следующем. Поперек русла реки закладывается гидрологический профиль (створ), на котором выполняются детальные промеры глубин. Одновременно проводится морфологическое описание литологии выстилающих русло донных отложений. Это позволяет получить своеобразный поперечный разрез русла реки. Затем специальным пробоотборником с лодки (перемещающейся по тросу, закрепленным поперек русла, что позволяет четко фиксировать точку опробования) проводится отбор донных отложений (точкам опробования на створе). Количества последних определяется шириной русла, его литологической структурой и гидродинамикой водотока. На каждой вертикали отбирается колонка донных отложений – для техногенных илов, основных носителей ртути, на максимальную их мощность (в отдельных случаях – до 3,5 м), а для собственно руслового аллювия (разновидности песков) – до 20–40 см. Как правило, каждая такая колонка (преимущественно для илов) состоит из нескольких проб, отбираемых по слоям (0–20 см, 20–40 см, 40–60 см и т.д.) до коренного аллювия, который

по возможности также опробовался). Таким образом, например при мощности илов в 3 м, отбирается до 15 проб на одной вертикали. В отдельных случаях отбираемые слои могут быть более мощными (до 30,40 или 60 см).

Кроме того, вблизи каждого створа (в интервале 100–150 м выше и ниже по течению) дополнительно отбираются пробы донных отложений на характерных участках русла. Особенно тщательно опробуются заливы, затонины, побочни, прирусовые отмели, участки интенсивного развития водной растительности, то есть те места, где реально можно было ожидать аккумулирование илов.

При всей своей чрезвычайной трудоемкости такое опробование позволяет выявить трехмерную структуру зон загрязнения, формирующихся в русле водотока, практически исключить вероятность ошибки, возникающей при отборе единичной пробы у уреза воды (что, как правило, широко практикуется при оценках степени загрязнения), и объективно оценить уровень загрязнения реки.

В частности, по указанной технологии осуществлялось опробование техногенных илов в р.Нуре. Всего на отрезке реки от Самаркандского водохранилища до п.Самарка (протяженностью около 100–105 км) было заложено 34 таких створа, позволивших в итоге реально оценить интенсивность и масштабы техногенного загрязнения, а также выявить особенности пространственного распределения ртути в илах. Нам представляется интересным и принципиальным рассмотреть полученные результаты более подробно.

Как уже отмечалось, основными концентратами ртути в р. Нуре являются техногенные илы, в которых фиксируются ее контрастные и протяженные потоки рассеяния. Практически весь отрезок реки от города Темиртау до п.Самарка характеризуется ярко выраженным и чрезвычайно контрастным техногенным потоками этого металла в илах, которые стабильны по протяженности, площади русла и в толще самих отложений (рис.14). Интенсивность техногенного воздействия подтверждается и тем, что техногенные аномалии достаточно контрастно проявились не только в илах, но и в песчаных разновидностях отложений.

Анализ геоморфологических особенностей русла реки, характера распределения ртути в русловом аллювии, а также самих илов по площади русла позволяет выделить в структуре фиксируемого потока рассеяния ртути ряд участков с характерным лишь для них распределением ртути: I – русло реки от плотины Самаркандского водохранилища до устья Главной канавы сточных вод; 2 – Главная канава сточных

вод; 3 - от устья канавы до с.Гагаринское; 4 - от с.Гагаринское до п.Ростовка; 5 - от п.Ростовка до Интумакского водохранилища; 6 - зона Интумакского водохранилища; 7 - от указанного водохранилища до строящегося Самарского водохранилища; 8 - ниже п.Самарка.

Литохимическое опробование, выполненное на участке реки от плотины Самаркандского водохранилища до устья Главной канавы (участок I), выявило наличие в русле значительных по площади зон скопления техногенных илов, максимальная мощность которых достигает 1,2 м (рис.15). Характерной особенностью русла на данном участке является ярко выраженная пестрота литологического состава выстилающих его отложений. Наблюдается незакономерное чередование песчано-гравийно-галечной массы, разнозернистых песков, илистых песков, техногенного ила. Это связано с чрезвычайно нестабильным гидродинамическим режимом водотока, обусловленного периодическими попусками воды из водохранилища и поступлением поверхностного стока с городской территории. Поступление загрязненных вод из водохранилища и поверхностного стока (дождевого и талого) - основная причина формирования техногенных аномалий ртути. Ее концентрации в илах в среднем в 170 раз выше фона; Кс в отдельных точках достигает 2273 (табл.45). Обращают на себя внимание и достаточно высокие концентрации ртути в песчаных разновидностях аллювия, что, по-видимому, связано с сорбцией ртути на крупных фракциях и наличием илестого наполнителя в песках. Существующая пестрота литологии руслообразующих пород обуславливает и очень высокую вариабельность распределения ртути по площади русла (коэффициент вариации для донных отложений в целом составляет около 330%). Однако, несмотря на это общий уровень загрязнения достаточно высок, о чем свидетельствует и тот факт, что на этом 4-км отрезке русла во всей массе илов и в 0-20 см слое песков присутствует 690 кг ртути.

Главная канава сточных вод - основной поставщик ртути в реку Нуру в прошлые годы и один из основных в настоящее время - практически на всем протяжении заполнена техногенными илами. Их мощность в нижней ее части, даже несмотря на сильное течение, достигает в отдельных местах 1,8 м. Уровни содержания ртути в более чем 50% проб находятся в пределах экстремально высоких значений (100-600 мг/кг), превышая фоновый уровень в тысячи раз (табл.46). Как правило, верхние слои (до 20-30 см) донных отложений стабильно характеризуются содержаниями ртути в 100-200 мг/кг на всем протяжении канавы, редко достигая 300-600 мг/кг. Более низкие уровни (7-40 мг/кг) чаще встречаются в слое 30-60 см, а книзу концентрации рту-

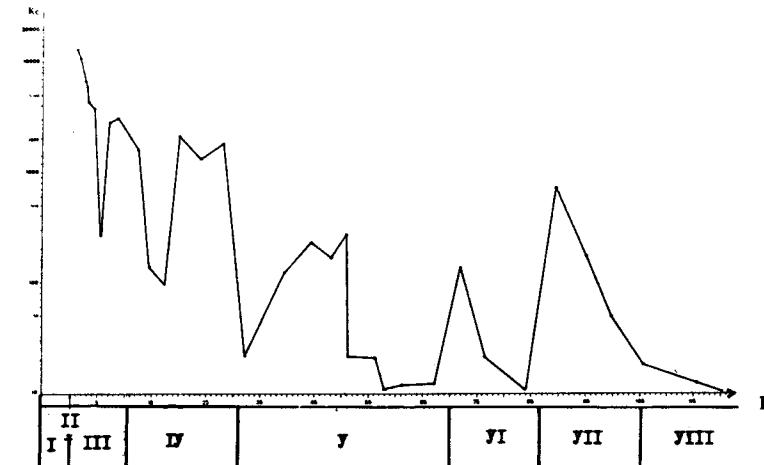


Рис. 14. Ртуть в техногенных илах р. Нуры.
I-VIII - выделяемые участки (см. в тексте)

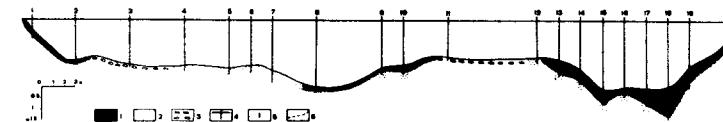


Рис. 15. Поперечный разрез русла р. Нуры на участке I
1 - техногенные илы, 2 - пески, 3 - песчано-гравийно-галечные отложения, 4 - вертикали опробования, 5 - номер вертикали, 6 - нижняя граница илов

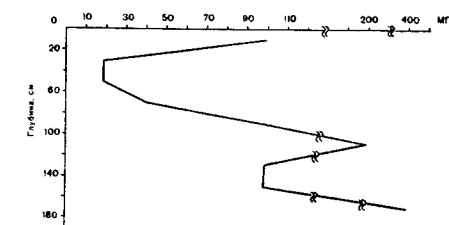


Рис. 16. Вертикальное распределение ртути в техногенных илах Главной канавы сточных вод

Таблица 45. Параметры распределения ртути в донных отложениях р.Нуры на участке выше Главной канавы стоков

Параметр	Техногенные илы	Пески	Донные отложения в целом
Среднее, мг/кг	7,5	1,0	6,8
Пределы, мг/кг	0,5-100	0,3-4	0,3-100
K_c (средний)	170	23	155
K_c (пределы)	II-2273	7-91	7-2273
Доля отложений от площади русла в створе наблюдения, %	48	52	100
Максимальная мощность илов, см	120	-	-
Количество ртути ^I , кг	540	150	690

^I Здесь и далее для илов с учетом всей их массы, для песков - в верхнем 0-20 см слое; фоновый уровень ртути = 0,044 мг/кг.

ти, достаточно резко и незакономерно варьируя, возрастают до 300-600 мг/кг (рис.16). Безусловно, более резкое концентрирование ртути в нижних слоях илов обусловлено тем, что их образование приходилось на тот период, когда сброс ртути в водоток был особенно велик (то есть по всей видимости, в 1960-70-е годы).

Участок реки от Главной канавы до с.Гагаринского, протяженностью 9-10 км, отличается максимальным уровнем загрязнения русла ртутью (участок 3). Одновременно это и зона наиболее интенсивного отложения техногенных илов (табл.47, рис.17). Так, илы выстилают от 44% (ярко выраженный перекат) до 98% площади русла. В среднем на участке около 78% площади русла заполнено техногенными илами. Их максимальная мощность колеблется от 60 см до 340 см, составляя в среднем для участка около 184 см. Полученные данные показывают, что средние концентрации ртути в илах на разных створах изменяются от 100 до 560 мг/кг ($K_c = 2272-12726!$); максимальные уровни достигают значений в 2000-3000 мг/кг, то есть 0,2-0,3%. Интенсивность загрязнения настолько велика, что даже в песчаных разновидностях донных отложений фиксируются чрезвычайно контрастные аномалии ртути (табл.47). По мере удаления от источника при общем высоком уро-

Таблица 46. Параметры распределения ртути в донных отложениях Главной канавы сточных вод

Параметр	Техногенные илы
Среднее, мг/кг	103
Пределы, мг/кг	7-600
K_c (средний)	2341
K_c (пределы)	159-13636
Максимальная мощность илов, см	180
Количество ртути ^I , кг	1180

^I При средней мощности илов в 50 см.

вне и на фоне незакономерной вариации прослеживается тенденция к определенному снижению концентраций как в илах, так и в песках (табл.47, рис.14). Ориентировочно запасы ртути, накопившиеся в донных отложениях на данном участке реки, оцениваются примерно в 84 тонны, причем подавляющая ее часть связана с техногенными илами.

Если мощность илов составляет не более 40-60 см, то пространственное распределение ртути в толще отложений достаточно однородное. При более значительных их мощностях (более 1-1,5 м) вертикальное распределение может быть самым разнообразным. Так, очень часто максимальные уровни (до 1000-2000 мг/кг) могут фиксироваться в слое 60-90 см (рис.18). В других случаях может отмечаться постепенное убывание концентраций ртути от слоя 0-50 см книзу, либо наоборот - резкое увеличение в нижних горизонтах илов. По всей видимости, фиксируемая неоднородность вертикального (как и площадного) распределения ртути в толще илов отражает достаточно сложный процесс их отложения в русле реки, сопровождающийся постоянным переотложением, различными диагенетическими процессами и изменениями и т.д. С точки зрения потенциального воздействия илов на водную fazу особую опасность представляет практически повсеместная значительная обогащенность их верхней, наиболее активной части, ртутью, поскольку это не исключает не только выделение растворенных форм ртути в водную толщу при различных физико-химических изменениях, но и при механическом воздействии водного потока на подстилающие русловые отложения. Здесь следует особо отметить, что уровень загрязнения данного участка р.Нуры по своим количественным характеристикам на один-два порядка превышает известные в мире критические

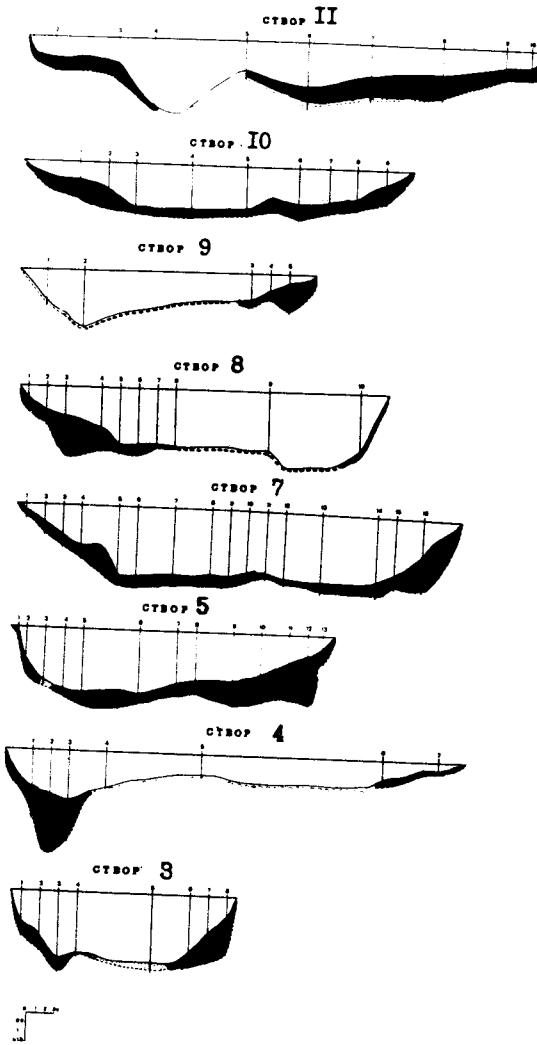


Рис. I7. Поперечные разрезы русла р. Нуры на участке З.

Параметры распределения пути в лесных отложениях реки Куря на участке 3 (от Глазной излучиной струйных гор по с. Тополево-Бору). Таблица 47.

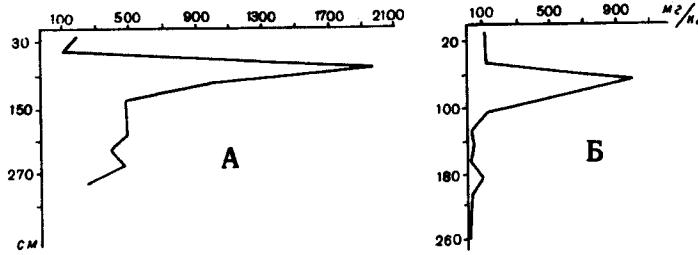


Рис. 18. Распределение ртути в техногенных илах на створе 4 (А) и на створе 5 (Б).

экологические ситуации, связанные с воздействием ртути и описанные в литературе.

В общей структуре руслоформирующих отложений на участке 4 (от с.Гагаринского до п.Ростовка) техногенные илы занимают уже заметно меньшую долю, нежели на предыдущем (табл.48, рис.19). Однако следует отметить, что некоторые створы опробования (№ 14,18) были заложены на типичных перекатах, выстланных грубыми песчаными отложениями. В то же время, техногенные аномалии ртути проявились достаточно резко как в илах, так и в песках. Так, даже на удалении от основного источника загрязнения в 20-30 км в донных отложениях фиксируются экстремально высокие уровни этого металла (до 100-200 мг/кг), причем на значительных участках русла. Более того, на данном отрезке реки широко развиты довольно крупные затонины, заполненные мощной (до 1,5 м) толщей техногенных илов. В частности, в районе створа 14 (рис.19), в пределах которого развиты в основном песчаные отложения, а содержания ртути заметно понижены, в одной из таких затонин фиксировались очень высокие концентрации ртути, особенно в верхних 50 см (рис.20).

Заметное, в отдельных случаях преобладающее участие типичных русловых песчаных отложений (хотя и включавших илистый наполнитель) в строении и ярко выраженная литологическая пестрота русла способствуют резкому возрастанию площадной неоднородности в распределении ртути, что подтверждается высокими значениями коэффициентов вариации (табл.48). Еще более резко выражена вертикальная неодн-

Таблица 48. Параметры распределения ртути в донных отложениях реки Курь на участке 4 (с.Гагаринское - п.Ростовка)

Створ № (расстояние от Главной канавы сточных вод, км)	Содержание ртути, мг/кг (в скобках №)					Максимальная мощность отложений, см	Доля илов от грунтов в донных отложениях, %	Количество грунтов в донных отложениях, кт
	среднее	пределы	пески	пределы	среднее для донных вариации в целом			
I2 (12,5)	65 (1477)	3-200 (68-4545)	I (23)	0,5-1,5 (12-34)	62 (1409)	129	240	71
I3 (14,5)	6,1 (133)	0,6-15 (14-341)	0,5 (12)	0,3-0,6 (7-14)	3,0 (68)	298	60	32
I4 (17,6)	4,1 (93)	1,5-7 (34-159)	0,5 (12)	0,3-0,7 (7-16)	1,7 (39)	216	20	15
I5 (20,6)	100 (2272)	80-120 (1818-2727)	0,8 (18)	0,7-4,0 (7-91)	46 (1045)	106	120	64
I6 (23,8)	54 (1227)	15-100 (341-2272)	1,5 (341)	0,5-100 (12-3272)	50 (1136)	87	120	26
I7 (28,8)	82 (1863)	25-200 (568-4545)	0,46 (II)	0,3-1,8 (7-41)	41 (932)	314	90	30
I8 (31,9)	1 (23)	0,9-1,5 (20-II)	0,5 (12)	0,4-0,6 (10-I4)	0,7 (16)	22	40	42
В целом для всего участка	44,6 (1014)	0,6-200 (14-4545)	2,7 (61)	0,3-100 (7-2272)	29,2 (664)	167	98,6	42840 (42,8 т)

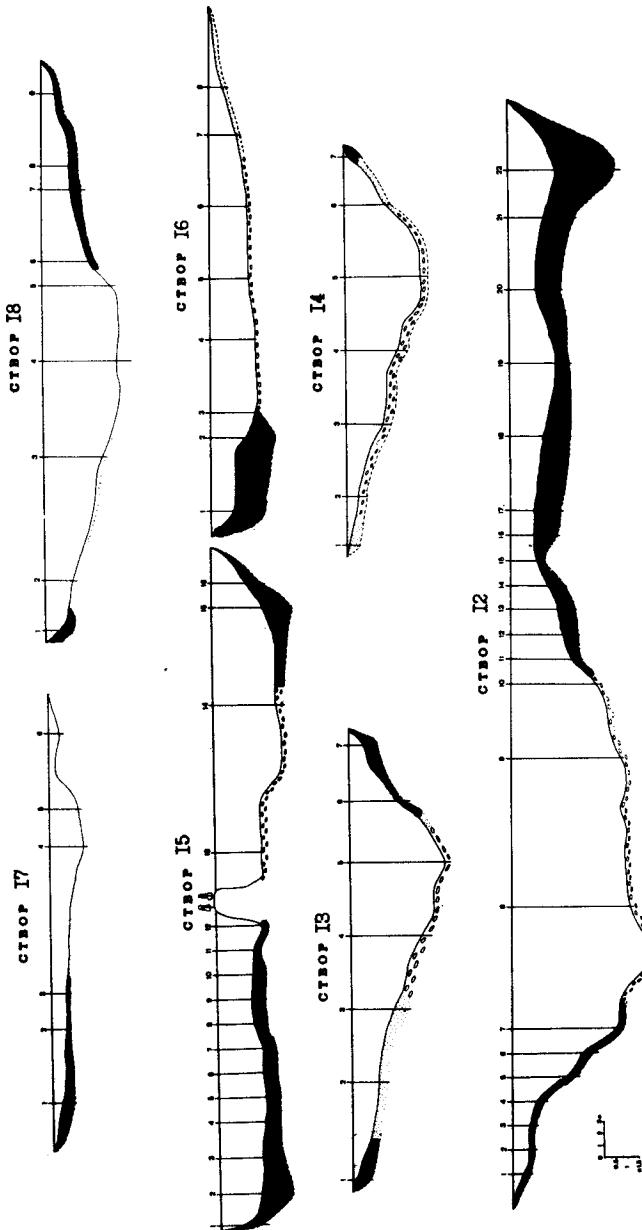


Рис.19. Поперечные разрезы русла р.Нуры на участке 4.

Рис. 20. Распределение ртути в техногенных илах в районе створа I4.

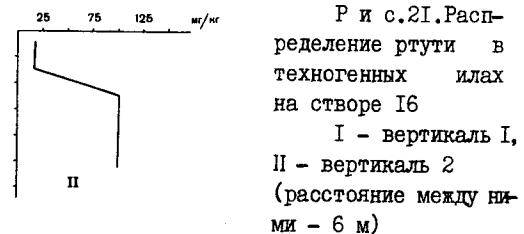
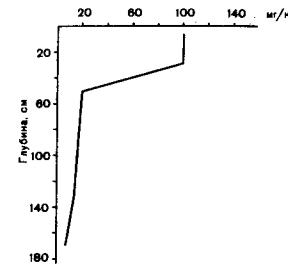


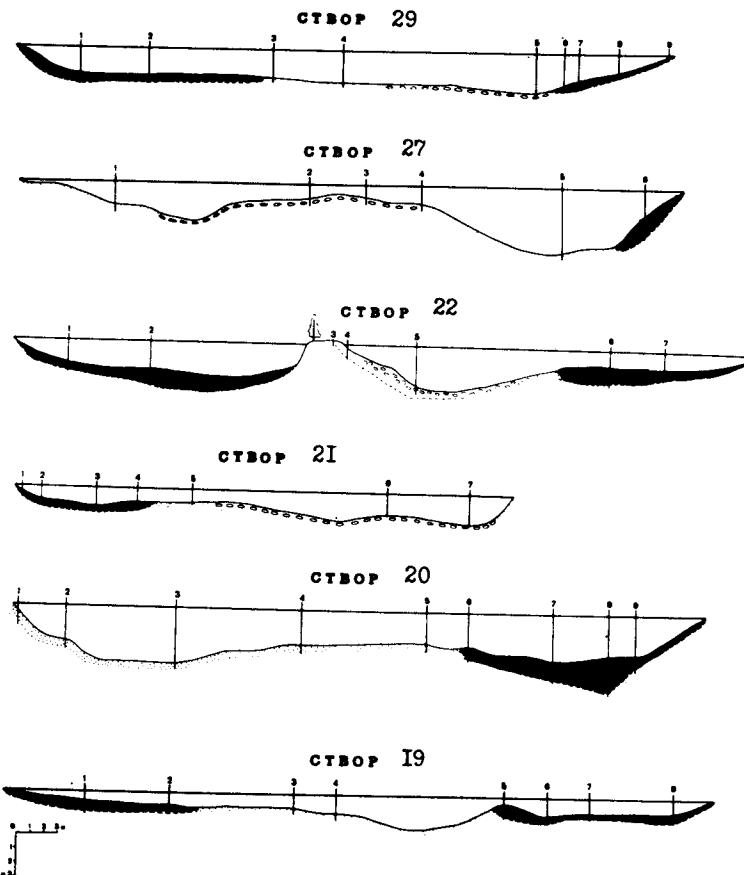
Рис.21. Распределение ртути в техногенных илах на створе I6
I - вертикаль I,
II - вертикаль 2
(расстояние между ними - 6 м)

родность, когда даже в пределах одного створа практически в соседних точках опробования отмечается принципиально разный характер распределения ртути в толще илов (рис.21). Однако, как показывает анализ, на данном участке реки фиксируется тенденция к более значимому обогащению верхних слоев, чем нижних. По крайней мере, такие участки русла преобладают по площади. Запасы ртути, накапливавшейся преимущественно в илах, на этом отрезке реки оцениваются примерно в 42,8 т. Вероятно, эта цифра может быть увеличена, если учесть, что существенное количество ее находится в илах, аккумулировавшихся в выше названных затонинах.

Участок 5 (от п.Ростовка до верховьев Интумакского водохранилища) по уровням содержания ртути четко разделяется на три характерные зоны, обусловленных особенностями руслового процесса в пределах каждой из них. Это неплохо фиксируется по осредненным данным распределения ртути и илов по руслу (рис.14). Вначале этого участка техногенные илы слагают существенную часть русла (табл.49, рис. 22, створы 19-22), отличаясь контрастными аномалиями ртути (в среднем в десятки и сотни раз выше фона). Следующая зона (створы 23-28) характеризуется явным преобладанием русловых эрозионных процессов, что способствует разубоживанию и выносу техногенного вещества и, соответственно, приводит к "затуханию" техногенных аном-

Т а б л и ца 49. Параметры распределения рути в донных отложений реки Нуры на участке 5 (п.Ростовка - Иткульское водохранилище)

Створ № (расстояние от главной канавы оточных вод, км)	Содержание рути, мг/кг (в скобках %)					Максимальная мощность ялов, см	Доля ялов от плющади русла, %	Количество отложений, кг
	среднее	Техногенные или предель	пески среднее	предель	Среднее для донных вариаций в целом			
Зона I								
19 (39,4)	57 (130)	1,5-200 (34-4545)	0,90 (20)	0,6-1,2 (14-27)	0,6 (1045)	213	59	4700
20 (44,5)	10,7 (243)	0,5-25 (12-56)	0,40 (9)	0,3-0,5 (7-12)	7,7 (175)	114	34	1000
21 (48,2)	7,5 (170)	1,5-20 (34-455)	0,48 (11)	-	5,2 (116)	210	80	180
22 (51,2)	13,2 (300)	0,9-40 (20-1010)	0,61 (14)	0,15-1 (3-24)	6,5 (147)	334	60	1080
Среднее	21,9 (498)	0,5-200 (12-4545)	0,60 (13,6)	0,15-1,2 (3-27)	16,4 (373)	218	49	6960
Зона 2								
23 (51,5)	1 (23)	0,7-1,1 (16-26)	0,93 (7,5)	0,08-1,5 (2-34)	0,05 (21)	15	20	4
24 (56,6)	1 (23)	0,25-2 (6-45)	0,33 (7,5)	0,25-0,48 (6-II)	0,58 (13)	7	10	4
25 (устье р.Шерубайкура)	1 (23)	0,37 (8)	0,37 (8)	0,27-0,48 (6-II)	0,68 (15)	73	30	25
26 (58)	0,5 (12)	0,4-0,6 (9-13)	0,40 (9)	0,29-0,45 (6-12)	0,41 (9)	8	20	9
27 (61,5)	0,6 (14)	0,4-1 (9-23)	0,14 (3)	0,1-0,2 (2-4)	0,34 (8)	88	60	15
28 (67,5)	0,6 (14)	0,3-3,5 (7-80)	1,1 (25)	0,17-1,4 (4-31)	1 (23)	130	40	24
Среднее	0,78 (18)	0,89-3,5 (6-80)	0,55 (12,5)	0,08-1,5 (2-34)	0,66 (15)	54	30	13
Зона 3								
29 (72,5)	2,5 (57)	0,48-5,5 (11-125)	1,6 (36)	1-5,5 (24-125)	2,3 (52)	59	60	270
В целом для участка	8,7 (198)	0,28-200 (6-4545)	0,66 (15)	0,08-5,5 (2-125)	6,5	103	54	7382 (7,4 τ)



Р и с.22. Поперечные разрезы русла р.Нуры на участке 5.

лии. Коэффициенты концентрации ртути составляют в среднем 16-25, причем в песчаных разновидностях аллювия они даже могут быть несильно выше. Последнее объясняется наличием в песках илистого на- сколько выше. Последнее объясняется наличием в песках илистого на- сколько выше. Последнее объясняется наличием в песках илистого на- сколько выше. Последнее объясняется наличием в песках илистого на-

всему руслу реки на рассматриваемом участке. В конце описываемого отрезка реки ее долина заметно расширяется, русло разбивается на две самостоятельные протоки, что отражается в интенсификации процессов аккумуляции переносимых наносов (створ 29). Для этой зоны характерно развитие широкой, болотистой поймы, сложенной с поверхности тонким илистым материалом с концентрациями ртути в среднем в 10-25 раз выше фона. В структуре донных отложений, выстилающих русло реки, заметно преобладают техногенные илы, достигающие мощности до 50-60 см. Заметно увеличены и уровни содержания ртути (табл.49). Общее количество ртути в донных отложениях реки на всем рассмотренном участке оценивается примерно в 7,4 т.

Следующий участок (№ 6) включает в себя Интумакское водохранилище. Верхняя его часть представляет собой сложную систему хаотичного чередующихся проток, отмелей и островов, сильно заросших различными растительностью. Здесь создаются благоприятные условия для аккумуляции переносимых рекой илистых наносов, причем на значительной площади территории. И действительно, большая часть отмелей и островов сложена с поверхности маломощными наилками и тонкими сильно илистыми песками, в которых фиксируются заметно повышенные концентрации ртути (табл.50). В нижней части водохранилища донные наносы в значительной мере формируются за счет сработки берегов и представляют собой хорошо отмытые пески с фоновыми уровнями ртути. Однако в маломощных наилках (до 5 см), отобранных на прибрежных отмелях, уровни ртути превышают фоновые в 3-10 раз, явно указывая на их техногенное происхождение (табл.50). Интумакское водохранилище, по всей видимости, является одним из главных "перехватчиков" транспортируемого рекой твердого взвешенного материала. Высокие уровни ртути, обнаруживаемые в илистых отложениях, указывают на существенную техногенную нагрузку на данный водоем. Это подтверждается и анализом сухих остатков отмерших планктонных водорослей с прибрежных отмелей, в которых фиксируются очень высокие (в 10-14 раз выше фона) уровни ртути, что указывает на активное биопоглощение этого металла планктонными организмами и не исключает вероятность процессов метилирования, одновременно создавая угрозу накопления ртути в пищевых цепях водохранилища. Общее количество ртути, накопившееся в

Таблица 50. Ртуть в донных отложениях Интумакского водохранилища, мг/кг

Место отбора проб	Литологическая разновидность	Среднее (Кс)	Пределы колебаний (Кс)
Верховая	Наилок	1,13 (26)	1-2 (23-26)
	Пески тонкие илистые	0,66 (15)	0,35-0,90 (8-20)
Нижняя часть	Наилок	0,32 (7)	0,15-0,40 (3-10)
	Пески тонкие	0,046 (1)	0,02-0,08 (0,5-2)
	Сухая корка из водорослей ^I	0,6 (12)	0,5-0,7 (10-14)

^I Фоновое содержание ртути = 0,05 мг/кг сухой массы.

шееся в донных наносах этого водоема ориентировочно может быть определено в 0,4-0,5 т.

Особенности распределения ртути в донных отложениях реки в пределах участка 7 (от Интумакского водохранилища до п. Самарка) наглядно свидетельствуют о масштабах загрязнения р. Нуры (табл.51, рис. 23). Данный отрезок реки обладает очень сложным геоморфологическим строением, отличающимся наличием многих проток, стариц, затонин, резких излучин. Все это способствует интенсивной аккумуляции переносимого "техногенного" материала. Встречаются участки русла, где дно более чем на 90% выстлано техногенным илом с содержаниями ртути в сотни раз выше фона (табл.51, рис.23, створ 30). Даже там, где русло практически полностью выстлано типичным речным аллювием, встречаются линзы и скопления илов, в которых концентрации ртути во много раз выше фона. Характерно, что и в песках ее содержания также могут быть велики (табл.51). При небольшой мощности илов (в среднем 20-30 см, реже 70-120 см) какой-либо видимой дифференциации концентраций ртути в них толще не прослеживается. В отдельных случаях может фиксироваться слабо выраженная тенденция к некоторому относительному обогащению ртутью слоя 20-40 см, реже 40-60 см. Количество ртути, содержащееся в отложениях на данном участке реки, может быть оценено очень приблизительно - примерно в 9,3 т. Однако более важен тот факт, что даже на таком значительном удалении от основного источника загрязнения контрастность техногенных аномалий по-прежнему очень велика, а содержание ртути в отдельных случаях,

Таблица 51. Параметры распределения ртути в донных отложениях р.Нуры на участке 7 'Интумакское водохранилище - п.Самарка)

Створ № (расстояние от Главной канавы сточных вод, км)	Содержание ртути, мг/кг (в скобках №)			Максимальная мощность язов, см	Доля язов от площа- грунта в долинах озера- ний, %
	среднее	пределы	Паски		
30 (90,5)	35 (795)	25-45 (56-1023)	0,4 (9)	-	34 (727)
31 (95,5)	7,9 (180)	3-20 (68-454)	0,63 (14)	0,35-1,2 (8-27)	2,9 (66)
32 (100,5)	2,5 (57)	2,0-3,5 (45-80)	1,2 (27)	0,29-3,5 (7-80)	1,2 (27)
33 (105,5)	0,8 (18)	0,25-1,5 (6-34)	0,05 (1,1)	0,04-0,06 (1-1,5)	0,47 (11)
В целом для всего участка	11,6 (26)	0,25-45 (6-1023)	0,57 (13)	0,04-3,5 (1-80)	9,6 (219)
					145

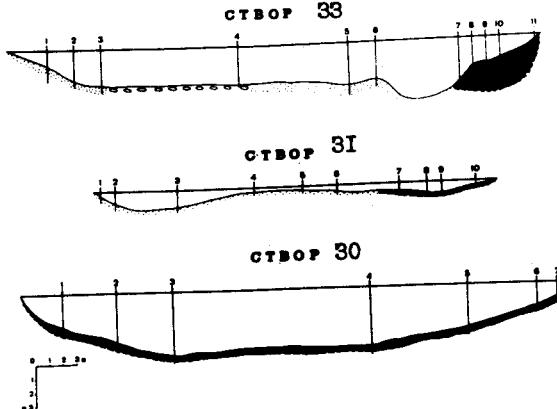


Рис. 23. Поперечные разрезы русла р.Нуры на участке 7. Усл. обозначения см.рис.15.

даже выше, нежели на участке реки перед Интумакским водохранилищем. По всей видимости, рассматриваемый отрезок русла представляет союй своеобразную геоморфологическую "ловушку" для значительной части транспортируемого рекой материала, обогащенного ртутью. Следует ожидать, что ниже по течению контрастность аномалий должна заметно снижаться, а в структуре донных наносов будут преобладать песчаные отложения.

Действительно, ниже п.Самарка русло реки в значительной степени сложено песчаными и песчано-гравийно-галечными отложениями с фоновыми концентрациями ртути. Лишь на прирусовых отмелях встречаются маломощные налески, в которых фиксируются слабоконтрастные аномалии ртути (табл.52). По мере удаления они постепенно "затухают", а уровни содержания ртути в илистых донных отложениях приближаются к фоновым.

Таким образом, результаты геохимического изучения донных отложений свидетельствуют о чрезвычайно сильном, экстремально высоком и экологически критическом уровне загрязнения водной системы р.Нуры ртутью. Зона влияния города прослеживается более чем на 100 км. Контрастность техногенных аномалий очень велика, а техногенные потоки ртути стабильны по протяженности, площади русла и в полтора раза превышают мощность самих отложений. Структурно-морфологические особенности по-

Таблица 52. Ртуть в илистых отложениях р.Нуры
на участке ниже п. Самарка

Место отбора проб	мг/кг (в скобках Кс)	
	Среднее	Пределы колебаний
с.Захаровка	0,15 (3,4)	0,03-0,2
п.Казгородок	0,10 (2,3)	0,05-0,2
п.Киевка	0,08 (2)	0,04-0,14
с.Черниговка	0,06 (1,4)	0,03-0,15
п.Энтузиаст	0,045 (1)	0,01-0,05
с.Рождественка	0,04 (1)	0,01-0,05
с.Сабынды	0,035 (1)	0,01-0,05
п.Кургальжинский	0,03 (1)	0,01-0,04

токов рассеяния определяются прежде всего мощностью источника загрязнения и во многом связаны с русловой дифференциацией наносов, что определяет неоднородную структуру техногенных аномалий в водотоке, то есть зон загрязнения, а также обуславливает тот факт, что в строении потоков рассеяния выделяется ряд участков с характерным лишь для них распределением элементов. Это подтверждается особенностями поведения ртути в техногенных илах в зонах влияния многих других источников загрязнения.

Так, рассмотрим морфологические особенности потоков рассеяния в пределах типичного равнинного урбокландшафта, представленного средним городом с многопрофильным характером производства и связанной с ним свалкой отходов (р.Пахра, г.Подольск, Шербинская свалка - Московская область). В отличие от ситуации в г.Темиртау, здесь не имеется мощного источника ртути. Как правило, ртуть либо используется незначительно в некоторых технологических процессах, либо входит в виде примесей в состав сырья, топлива и т.п. Результаты ликвидической съемки показывают следующее. В данном случае характер распределения ртути в техногенных илах р.Пахра всецело определяется либо типом воздействия, либо особенностями геоморфологического строения русла этой малой реки. Это позволяет выделить в водотоке ряд участков с характерным лишь для них распределением ртути (рис. 24, табл.53).

В пределах участка I (непромышленный пригород г.Подольска) формирование потоков рассеяния связано с влиянием поверхностного стока, поступающего из расположенного здесь поселка. В пределах участка II

Тонкая линия - фактическое распределение; жирная - по слаженным данным.

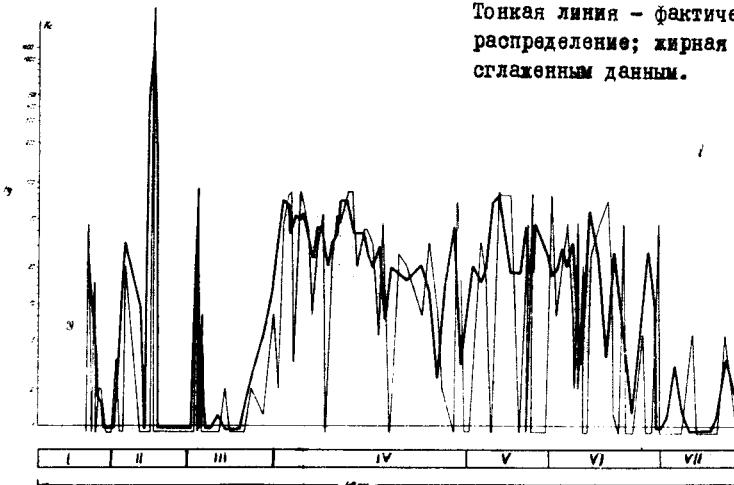


Рис. 24. Ртуть в техногенных илах р.Пахра
I-УП - выделяемые участки (см.текст и табл.53)

(новый непромышленный жилой район города) формирование потоков рассеяния обусловлено поступлением по ручью поверхностного стока, состав которого формируется в основном выбросами промышленных предприятий и автотранспорта. В пределах участка III (старая застройка с промышленными предприятиями) формирование потоков связано с влиянием поверхностного стока и сточных вод ряда предприятий (металлообработки и среднего машиностроения), поступающих в реку по ручью. В пределах участка IV, расположенного в промышленной зоне города (тяжелое машиностроение, металлообработка, аккумуляторное, кабельное, химико-металлургическое и другие виды производства), осуществляетсяброс основных объемов промышленных и бытовых вод города, также поступающих в реку по ручью. Участок V представляет собой геохимический барьер, обусловленный геоморфологическим строением русла - резкое выплаживание его продольного профиля, наличие островов и затонин, заметное сужение русла реки, что создает определенный подпор речных вод. В пределах зоны влияния крупной свалки бытовых и промышленных отходов (участок VI) ртуть поступает с поверхностным стоком по системе ручьев, а также при разгрузке загрязненных грунтовых вод. Распределение химических элементов в периферийной части потока (участок УП) связано с разубоживанием техноген-

Таблица 53. Ртуть в техногенных илах р.Пахры в зоне влияния г.Подольска

Участок	Параметр	
	Среднее значение Кс	Вариация, %
I	7	206
II	II	169
III	76	510
IV	29	91
У	58	66
VI	22	116
VII	3,5	298
Для всего потока в целом	34	560

Примечание. Фоновое значение ртути = 0,01 мг/кг; выделенные участки соответствуют аналогичным на рис.24.

Ртуть в пределах участка II характеризуется несколько более контрастными аномалиями в донных отложениях реки и таким же неравномерным распределением по потоку. Основное ее поступление связано с водами ручья, принимающего поверхностный сток с территории жилого района, загрязненной выбросами указанных выше заводов. Характерно, что в донных отложениях этого ручья коэффициенты концентрации ртути достигают значений 20–30.

Потоки рассеяния ртути в пределах участка III связаны с влиянием уже не только поверхностного стока, но и сточных вод промзоны механического и электромеханического заводов. Так, в донных отложениях ручья, по которому стоки дренируются в р.Пахру, Кс ртути достигают значений в 400 и более. В донных отложениях реки уровни содержания ртути при резко выраженной пространственной неоднородности заметно снижаются, хотя и достигают в отдельных точках высоких значений (Кс до 2200).

В целом протяженность аномалий в пределах рассмотренных трех участков невелика (несколько километров); содержание ртути резко

генного материала природным и с естественным затуханием аномалий.

Потоки рассеяния ртути в пределах участка I характеризуются в целом невысокими коэффициентами концентрации при резко выраженной неоднородности пространственного распределения. По всей видимости, формирование аномалий связано с поступлением поверхностного стока (талого и дождевого), состав которого обусловлен воздушными выпадениями от промышленной зоны механического и электромеханического заводов.

сходит до фона перед началом следующего участка.

Промышленный район города (участок IV) характеризуется достаточно высокими и главное стабильными в пространстве аномалиями ртути. Так, в отличие от предыдущих участков, в пределах которых содержание даже в соседних точках варьировало от высокоаномальных до фоновых, здесь аномалии ртути в целом очень стабильны, а вариация фиксируется в высоких областях аномальности. Это явно указывает на установленный режим загрязнения, обусловленного сравнительно продолжительным периодом воздействия и более значимым источником поставки поллютанта.

Отличительной особенностью следующего участка реки (участок V) является заметное возрастание интенсивности проявления техногенных аномалий ртути в илах. Как уже отмечалось, данный участок характеризуется условиями, способствующими аккумуляции переносимых взвешенных и донных наносов, то есть он является своеобразным геохимическим барьером. Характерно, что в пределах этого участка пространственное распределение ртути более однородное, нежели на всех других исследованных отрезках русла реки Пахры.

В пределах участка VI на поток рассеяния города как бы накладывается воздействие свалки отходов. Поэтому, несмотря на то, что значительная часть техногенного материала "перехватывается" предыдущим участком, интенсивность проявления техногенных аномалий достаточно велика (Кс в отдельных точках достигают значений в 50–70).

Непосредственно ниже свалки уровень содержания ртути, резко варьируя, постепенно снижается до фоновых. Общая протяженность изученного потока рассеяния ртути, связанного с воздействием города и свалки отходов, составляет более 40 км.

Итак, мы видим, что по степени контрастности накопления, особенностям изменения концентраций ртути в строении изученного потока выделяется ряд характерных участков, закономерно связанных со структурой урбандшафта и геоморфологическим строением русла. Характернейшая особенность пространственного распределения ртути проявляется в резко выраженной вариации, которая в зонах максимально-го воздействия заметно снижается, а при удалении от источника или при его незначительной мощности резко возрастает. Рассмотренный пример характеризует типичное распределение ртути в донных отложениях рек в зоне воздействия множества пространственно несовмещенных источников загрязнения, что в итоге и обуславливает достаточно сложную внутреннюю структуру формирующихся ее потоков рассеяния.

В случае одиночного источника поступление ртути (отдельный

завод, город) наиболее контрастно аномалии, как правило, проявляются либо в пределах городской застройки, либо непосредственно ниже источника, постепенно и закономерно снижаясь по мере удаления. Однако интенсивность концентрирования ртути может усиливаться при наличии геохимических барьеров в русле рек, обусловленных во многом особенностями геоморфологического строения долины и русла. В частности, большое значение имеет характер продольного профиля водотоков. Так, ручьи, выходящие на поймы рек, отличаются резким вы полаживанием профиля. Это приводит к изменению гидродинамических параметров водотоков и отражается в формировании на устьевых участках геохимических барьеров.

Приведенные примеры потоков рассеяния ртути в зоне влияния ряда объектов убедительно свидетельствуют о чрезвычайном, многократно более сильном загрязнении р. Нуры ртутью. Безусловно, что из всех описанных в литературе примеров, ситуация, сложившаяся в бассейне р. Нуры, является наиболее экстремальной.

Итак, рассмотренные материалы свидетельствуют о ведущей роли техногенных илов в распределении и концентрировании ртути в водных экосистемах городских агломераций. Потоки рассеяния ртути в илах в условиях воздействия городов характеризуются значительными размерами и высокими ее концентрациями. По контрастности аномалий и характеру изменений концентраций в строении потоков, как правило, достаточно четко проявляется связь с особенностями размещения источников загрязнения, их мощности и специфики, планировочной структуры городов, а также с литолого-геоморфологическим строением русла и долины и гидродинамическими параметрами водотоков. Все это в совокупности с существующей в реках естественной дифференциацией и накоплением речного материала приводит к ярко выраженной неоднородности техногенных аномалий в русле водотоков, проявляющейся в чередовании участков с различной степенью аномальности как в площадном, так и в вертикальном отношении. В критических ситуациях интенсивность концентрирования ртути в илах настолько велика, что это всецело может определять геохимический облик и экологию водной экосистемы в течение длительного периода времени. Единственным способом улучшения ситуации может быть только изъятие техногенных илов и прекращение сброса сточных вод. Естественно, что возникает проблема обезвреживания и утилизации илов. Следует отметить, что в отдельных случаях техногенные илы могут рассматриваться как вторичные источники различных полезных компонентов. Возможно даже, что правомочно ставить вопрос о техногенных илах как своеобразном типе

месторождений. Так, например, на 100-километровом участке русла р. Нуры общее количество ртути, концентрирующейся в илах, оценивается примерно в 150 т, причем около 130 т из них приходится на первые 30 км русла ниже города. По существующей классификации такое "скопление" ртути может быть отнесено к группе небольших месторождений.

Геохимические особенности накопления и формы нахождения ртути в техногенных илах

Вопросы, связанные с изучением механизма аккумуляции и поведения поллютантов в загрязненных донных отложениях, относятся к наименее разработанным в геохимии техногенных процессов. Это связано как с трудоемкостью подобных исследований, так и с отсутствием единых принципов и унифицированных методик изучения и, в частности, прямых методов наблюдения. Данные, получаемые при изучении форм нахождения металлов, носят в большинстве случаев ориентировочный характер. Однако, как показывает опыт, при эколого-геохимических исследованиях депонирующих сред наиболее принципиальное значение имеет выявление потенциальной геохимической и биогеохимической активности поллютанта. При рациональном выборе соответствующих аналитических методик это вполне достижимо. Гранулометрический анализ выполнялся в водной среде без использования "жестких" реагентов. При изучении физико-химических форм нахождения ртути использовался не плохо зарекомендовавший себя фазовый анализ. Для отделения иловых вод использовалось центрифугирование образца илов, которое позволяет отделить наименее связанную в осадке часть воды, то есть ту часть, которая находится в тесном взаимодействии с природными слоями воды и может легко попадать в движущийся водный поток.

Факторы, определяющие накопление и распределение ртути в донных отложениях. В природных условиях механизм накопления и характер распределения ртути в донных отложениях может определяться множеством факторов. Темпы сорбции ртути зависят как от физико-химических характеристик донных отложений, так и от условий водной среды. В натуральных и экспериментальных условиях показана хорошая соосаждаемость ртути с гидроксидами железа и марганца, с алевритами и особенно с глинистым материалом [23]. Наиболее интенсивная адсорбция ртути отмечалась в донных отложениях с высоким (до 10%) содержанием органических веществ [19]. Практически всегда фиксируется четкая взаимосвязь между содержанием органического уг-

лерода в донных отложениях и количеством поглощенной ртути. Детальные исследования, выполненные С.Рамамурти с соавторами [19], показали, что в общем случае интенсивность сорбции ртути донными отложениями коррелировала с такими факторами, как содержание органических веществ > ионообменная способность катионов > размеры частиц, тогда как константа связывания изменялась в ряду: содержание органических веществ > размеры частиц > ионообменная способность катионов. Определенный вклад, как отмечает Т.А.Джексон (1978), в процесс поглощения ртути донными отложениями вносят сульфид-ионы. Связывание ртути в донных отложениях может резко меняться по интенсивности в зависимости от типа химической связи при сорбции, а также при осаждении с железомарганцевыми оксидами и вхождении в кристаллические решетки минералов. Поглощение ртути донными отложениями в значительной степени зависит и от таких параметров водной среды, как pH, Eh, содержание хлорид-ионов, различных хелатирующих агентов. Например, установлено, что с ростом концентрации хлорид-ионов адсорбция неорганических соединений ртути имеет тенденцию к уменьшению, что подтверждается результатами исследования соосаждения Hg^{2+} на гидроксидах железа в отсутствии и в присутствии галогенид-ионов [13]. Естественно, что в условиях загрязнения, особенно сильного, роль и значимость тех или иных названных выше процессов в механизме связывания и накопления ртути в донных отложениях могут быть самыми разнообразными [45]. Возможно, что даже следует ожидать и принципиальные различия в интенсивности проявления тех или иных процессов выведения ртути из раствора вод в условиях техногенеза. Здесь следует отметить следующее. В связи с ультрамалыми концентрациями ртути в растворе фоновых вод многие из выше названных, в первую очередь сорбционные, процессов вряд ли могут протекать с достаточной интенсивностью и быть ответственными за большую часть концентрирующейся в отложениях ртути. Поэтому в фоновых отложениях ртуть концентрируется не только за счет сорбции из водного раствора, а скорее всего в результате осаждения взвешенного вещества (гидравлического выпадания грубых частиц, коагуляции и осаждения тонких частиц и т.п.). В данном случае характер ее концентрирования и распределения будет во многом зависеть от геохимических характеристик материнских, то есть аллювийформирующих пород. В условиях загрязнения при заметно высоких содержаниях ртути в растворе речных вод интенсивность ее адсорбции различными агентами может быть достаточно значима. Однако заметно возрастет и роль взвешенных веществ в ее поставке в техногенные илы. В настоящее време-

мя существует две противоположные точки зрения на переход находящейся в донных отложениях ртути в водную среду, в той или иной мере подкрепленные фактическими данными. Так, имеется утверждение, что для соединений ртути характерна очень высокая прочность связывания донными отложениями, настолько сильная, что десорбция практически отсутствует [13]. В то же время, значительный массив данных, в том числе экспериментальных, свидетельствует о переходе ртути из донных отложений в водную толщу и биоту [19]. В принципе, данная проблема сводится к оценке загрязненных донных отложений как вторичного источника поступления поллютантов. Для реальной оценки происходящих явлений необходимо детальное исследование концентрирования, распределения и форм нахождения поллютанта в техногенных илах. Выше мы отметили чрезвычайно высокую концентрацию ртути в техногенных илах, что уже само по себе определяет их значимость как вторичного источника загрязнения водной массы. Рассмотрим дальнейшие особенности распределения и закрепления ртути в толще илов.

Распределение ртути в гранулометрическом спектре донных отложений. В табл.54 приведены данные о распределении ртути в различных гранулометрических фракциях техногенных илов и фоновых осадков. Результаты по фоновым осадкам подтверждают хорошо известный факт - закономерное увеличение абсолютных концентраций ртути от грубых к более тонким фракциям (в десятки раз). Основной концентрирователь ртути в фоновых аллювиальных отложениях - фракция глины. Основным же носителем является фракция среднего песка, с которой связано в среднем до 40-50% валового содержания ртути в фоновых отложениях. Это обусловлено, в первую очередь, ее высокой долей в общем балансе гранулометрических фракций. Заметное количество ртути (до 25-30%) связано с глинистой фракцией. Это в большей степени обусловлено высокими абсолютными концентрациями металла в данной фракции. Таким образом, понятия "фракция - концентрирователь" и "фракция - носитель" для фоновых отложений не совпадают. Это свидетельствует о том, что при геохимических оценках следует изучать не только валовое содержание ртути во всей массе речных отложений, но и выяснять фракцию - носитель и фракцию - концентрирователь.

В условиях загрязнения техногенные аномалии ртути в илах проявились за счет резкого увеличения ее содержаний во всех рассматриваемых фракциях и практически на всем изученном отрезке русла р.Куры (табл.54). Однако характер распределения этого металла в гранулометрическом спектре техногенных илов принципиально иной, чем в фоновых отложениях. Прежде всего, характерным является тот факт,

54. Распределение гутти в различных гранулометрических фракциях ложных стомах Р. Нурк Таслипа

Горизонт, см	Горизонт, мкг/кг	Грубообернестый песок		Крупный песок		Средний песок		Мелкий песок		Тонкий песок		Алеврит		Глина									
		2-1 мм		1-0,5 мм		0,5-0,25 мм		0,25-0,1 мм		0,1-0,063мм		0,063-0,04 мм		$Z_{0,04 \text{ mm}}$									
		X	Kx	X	Kx	X	Kx	X	Kx	X	Kx	X	Kx	X	%								
Расстояние от Ильиной стены, м	3	2-20	616	100	0,16	0,4	600	0,97	3,02	1000	1,62	90,10	100	0,16	1,26	100	0,16	0,61	100	0,16	1,96		
	20-40	479	700	2,09	5,42	500	1,04	3,23	3000	2,08	2,22	400	0,84	4,34	300	0,63	7,95	500	1,04	82,83	400	0,84	18,29
	40-60	508	300	0,59	1,48	600	1,18	3,54	600	1,18	56,90	600	1,18	5,32	300	0,52	1,53	400	0,79	7,90	7,90	0,79	7,90
	60-80	302	300	0,99	0,69	100	0,33	0,23	500	1,65	28,11	500	1,65	31,35	300	0,99	20,79	200	0,66	9,32	100	0,33	8,78
	100-120	630	1800	2,98	1,67	1000	1,59	1,11	1000	1,59	1,11	1000	1,59	1,11	500	0,75	500	79,2	6,1	200	0,32	4,22	
	120-140	306	100	0,33	1,86	300	0,38	2,94	300	0,98	3,43	300	12,98	12,94	300	0,98	36,66	300	0,79	48,18	400	1,31	23,36
9	40-60	47	-	-	-	300	1,07	3,64	10	0,21	5,71	20	0,48	13,47	100	2,14	17,92	100	2,14	11,34	100	2,14	49
	80-100	56	-	-	-	4	0,07	0,58	3	0,05	1,35	42	0,76	23,71	50	0,90	10,88	60	1,08	5,5	200	3,60	56,98
	120-140	111	-	-	-	1,2	0,11	2,43	0,5	0,05	1,14	3	0,28	9,0	20	1,84	22,26	42	3,86	5,41	100	9,20	55,80
	32	20-60	1,3	-	-	1,2	0,33	8,65	0,45	0,35	11,02	7,75	0,58	19,01	1,4	1,08	8,90	1,2	0,93	5,02	5	3,88	47,29
105	20-40	3,32	-	-	4	1,02	2,20	1,3	0,33	10,26	3,5	0,87	20,87	1,3	1,57	7,88	5	1,57	7,88	8	2,04	46,12	
	90-120	0,37	-	-	0,35	0,95	2,50	0,28	0,76	27,92	0,29	0,87	20,22	0,9	0,83	43,11	1	2,16	1	2,7	18,1	1,1	
0,088	0,070	0,111	0,073	0,031	0,35	0,20	0,22	0,12	0,36	41,18	0,26	2,84	5,40	0,50	5,68	2,84	0,46	5,23	1,57	0,8	9,09	28,17	

При мечани: X – абсолютная концентрация ртути во фракции (отношени $X : \text{вал}$); K_X – удельная концентрация ртути во фракции; α – коэффициент, определяющий концентрацию ртути в фракции (коэффициент α).

что вблизи основного источника поступления стоков (то есть в зоне максимального загрязнения) основными концентраторами ртути являются, как правило, более грубые фракции отложений. Особенно четко это различие между фоновыми донными отложениями и техногенными илами фиксируется при расчете различных соотношений (рис.25). Графики, приведенные на рис.25 (А, Б и В), убедительно подтверждают значимость более грубых фракций как концентраторов ртути. Характерно, что и контрастность проявления техногенных аномалий для более грубых фракций выражена резче (рис.25, Г).

Сложный характер распределения ртути в гранулометрическом спектре техногенных илов отмечался нами и в ближних зонах влияния ряда других источников загрязнения. Так, в техногенных илах р.Пахры в зоне влияния г.Подольска при сравнительно незначительных аномалиях ртути их контрастность наиболее резко проявлялась во фракции крупного песка (табл.55). Аналогичное распределение отмечалось и в техногенных илах р.Инсар в зоне влияния г.Саранска. В обоих случаях в фоновых отложениях фиксировалось закономерное увеличение абсолютных концентраций ртути от грубых фракций к более тонким, тогда как в условиях загрязнения эта закономерность либо нарушалась, либо проявлялась не столь явно.

Такое своеобразие в распределении ртути, казалось бы противоречащее известным фактам, может быть объяснено особенностями структурно-агрегатного состава техногенных илов. В частности, в естественном состоянии на крупных частичках техногенного ила при исследованиях под бинокуляром наблюдалось присутствие очень тонких илисто-коллоидных частиц, возможно являющихся следствием сорбционных процессов. Не исключено, что эти тонкие частицы, резко обогащенные ртутью, и дают отмеченный эффект. Как отмечалось выше, гранулометрический анализ (правильнее было бы говорить о структурно-агрегатном анализе) осуществлялся так, чтобы не было резкого воздействия на образец в целом, поскольку ставилась цель выяснить реальную структуру техногенных илов. Кроме того, часть более крупных частиц техногенных илов может формироваться при процессах коагуляции и флоккуляции, столь характерных для ближних зон воздействия источников загрязнения. Ведущая роль этих процессов отмечалась для зон смешанных сточных и речных вод на других объектах [6]. Это способствует образованию более крупных взвешенных частиц, обогащенных ртутью. Последующая седиментация этих частиц приводит к отмеченному эффекту. Следует напомнить, что верхние слои техногенных илов представляют собой сильно насыщенную суспензию, состоящую

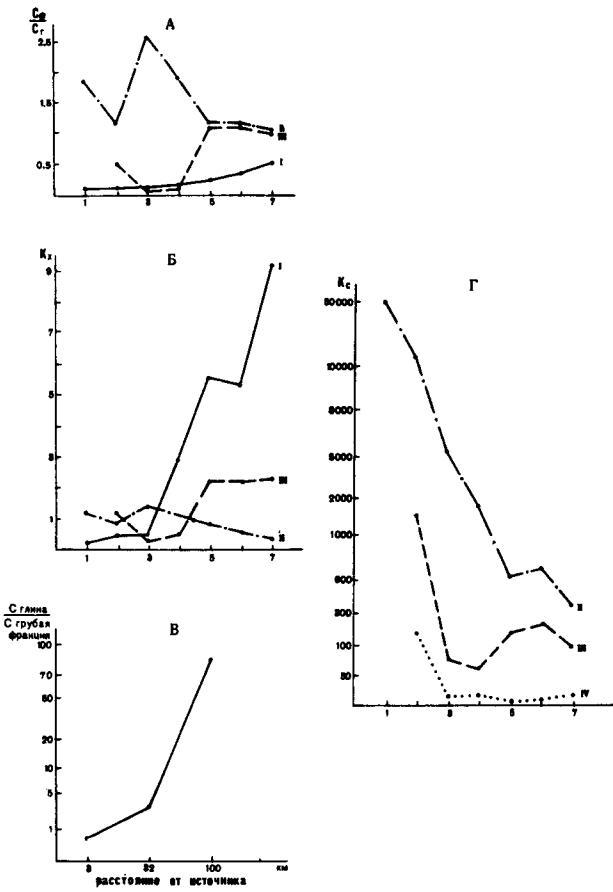


Рис. 25. Особенности распределения ртути в гранулометрическом спектре донных отложений.

I - фон, II - Главная канава сточных вод, III - р. Нура в 9 км ниже, IV - р. Нура в 32 км ниже канавы; I-7 - фракции, мм: I - 2-I, 2 - I-0,5; 3 - 0,5-0,25; 4 - 0,25-0,1; 5 - 0,1-0,063; 6 - 0,063-0,04; 7 - менее 0,04; А - $\text{C}_{\text{г}}$ - абсолютная концентрация в конкретной фракции, Сг - абсолютная концентрация в фракции глины, Б - $K_{\text{г}}$ - отношение абсолютного содержания во фракции к валовому; В - Сг.ф. - содержание ртути в глинистом песке; Г - степень аномальности (K_c) абсолютных концентраций ртути в разных фракциях относительно фонового содержания в соответствующей фракции

Таблица 55. Распределение ртути в гранулометрическом спектре техногенных илов р. Нуры (Моноуская область)

Место опробования	Вел. mg/kg	Фракции, мм						mg/kg	Kc
		1-0,25	0,25-0,1	0,1-0,01	0,01-0,006	< 0,005			
Выше города	0,04	0,009	0,009	0,05	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Центр города	0,09	0,150	0,020	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Ниже города	0,17	0,083	9,2	0,040	4,4	0,26	5,2	0,22	1,1
									1,1

П р и м е ч а н и е. mg/kg - абсолютная концентрация во фракции; Kc - коэффициент концентрации относительно содержания во фракции фоновых отложений.

в значительной массе из таких частиц, образующихся в результате коагуляции и флоккуляции.

Возможно также, что при различных технологических процессах, а также при очистке сточных вод происходит обогащение более грубых частиц, прежде всего за счет сорбции, коагуляции, флоккуляции. Эти частицы, обладающие большей гидравлической крупностью, осаждаются в первую очередь именно вблизи источников загрязнения.

Следует отметить, что доля таких фракций (особенно грубоэрозионного и крупного песка) в общей массе техногенных илов незначительна (в среднем 6%), поэтому общее количество связанный с ними ртути невелико (первые проценты от вала). Доля фракций среднего, мелкого и тонкого песка уже более существенна и, как правило, именно они являются основными носителями ртути на ближайших от источника загрязнения участках русла.

При удалении от источника поставки отмечается не только снижение валовых содержаний ртути, но и изменение в характере ее распределения в гранулометрическом спектре илов (табл.54, рис.25). Роль основных концентраторов переходит к более тонким фракциям – алевритам и глинам, причем последние по сути являются и основными (наряду с мелким и тонким песками) носителями ртути. По всей видимости, это связано с определенной дифференциацией русловых наносов и более дальней миграцией тонких частиц – явление хорошо известное и детально описанное в русловой геоморфологии и гидрологии. Еще более резче отмеченная тенденция проявляется в периферической части прослеженного потока рассеяния. В то же время, интересно отметить, что во фракции грубого песка по всему потоку фиксируются достаточно контрастные техногенные аномалии. В общем случае, анализ данных табл.54 и рис.25 показывает, что по мере удаления от источника загрязнения характер и особенности распределения ртути в илах как бы приближаются к фоновым параметрам.

Формы нахождения ртути в техногенных илах. Формы химических элементов, концентрирующихся в донных отложениях водных объектов, достаточно разнообразны. В общем виде можно выделить подвижные, геохимически активные и неподвижные, прочносвязанные формы. Если часть элемента, связанная с подвижными формами, может трансформироваться при изменении условий среды, то прочносвязанная часть остается в значительной мере практически неизменной. Очень важно, что для биологической пищевой цепи, в основном доступны подвижные формы химических элементов. Естественно, что и значимость донных отложений как источников вторичного загрязнения определяется наличием геохимически активных форм поллютантов.

Установление форм нахождения ртути в современных гипергенных (техногенных) образованиях – одна из важнейших задач техногенной геохимии ртути. Сложность ее решения заключена в разнообразии форм нахождения ртути в зоне гипергенеза и значительным числом различных физико-химических процессов, участвующих в их образовании. При изучении форм нахождения ртути в техногенных илах, как уже отмечалось, использовался фазовый химический анализ (табл.56); в основу которого была положена схема Н.И.Разенковой и П.С.Самойловой [23]. Естественно, что при указанном последовательном извлечении различных соединений ртути геохимическая интерпретация результатов анализа носит, в какой-то степени, условный характер. Однако, как мы отмечали, при массовых исследованиях получаемый материал достаточно объективно отражает реальное соотношение форм нахождения с позиций их геохимической активности, что является наиболее важным при экогеохимической оценке ситуации.

В табл.57 приведены результаты изучения форм нахождения ртути в пробах илов, отобранных из разных частей техногенного потока рассеяния – головной, средней и периферийной. При общем чрезвычайно высоком концентрировании ртути в техногенных илах аномалии в них проявились за счет увеличения содержаний во всех выделяемых формах, однако контрастность концентрирования (степень аномальности) различна. Наиболее резко техногенные аномалии проявились в оксидной форме (Кс от 345 до 11931), не менее резко они фиксируются в прочносвязанной (до 1614) и элементарной (до 3182) формах нахождения. Степень концентрирования ртути, связанной с сульфатной формой, невелика (Кс в среднем 2-3). Выделение сульфатной формы наиболее всего условно в связи с относительно высокой ошибкой фазового анализа и незначительным количеством выхода данной фракции в ходе анализа. По-видимому, данные соединения ртути, объединяемые нами в эту форму (сульфатные, легкорастворимые ртутьорганические и др.), являясь малоустойчивыми играют несущественную роль в общем балансе форм нахождения ртути. Однако, следует отметить, что несмотря на незначительную долю в общем балансе, они по абсолютным концентрациям в несколько раз превышают валовые фоновые уровни в донных отложениях. Более того, по мере удаления от источника загрязнения отмечается тенденция к росту как их абсолютных концентраций, так и относительного содержания, что явно указывает на идущие в илах процессы трансформации более устойчивых форм в легкоподвижные.

Оксидные формы ртути, являющиеся в целом малоустойчивыми

Таблица 56. Схема фазового химического анализа илов

Последовательная обработка растворителей	Условное название форм нахождения	Геохимическая интерпретация форм нахождения	Геохимическое поведение
0,1Н HCl	Сульфатная	Сульфат ртути, легкорастворимые органические соединения, хлорид ртути (II)	Неустойчива, легкоподвижна
6Н HCl	Оксидная	Окислы, гидрооксиды, оксихлориды ртути; ртуть, связанная с оксидами и гидрооксидами железа, возможны сорбированные формы	Малоустойчива, подвижна
HNO ₃	Элементарная концентрированная	Ртуть металлическая (атомарная)	Относительно подвижна
Остеклок	Прочносвязанная	По всей видимости, представлена сульфидными соединениями, а также хлоридом ртути (I)	Стабильна, но есть данные о их нестабильности, в частности возможно окисление сульфидов при наличии целого ряда окислительных агентов

Таблица 57. Формы нахождения ртути в техногенных илах р.Куры

Место отбора проб	Горизонт, см	Вел, мг/кг	Сульфатная, %	Оксидная, %	Элементарная, мг/кг	% Прочносвязанная	мг/кг	%
1,5 км ниже Главной канавы сточных вод	0-20	21	0,063	0,3	15,2	72	4,8	23
	20-40	72	0,075	0,1	20,7	29	27,7	39
	40-60	280	0,7	0,3	180	64	15	5,4
	60-80	169	0,145	0,1	62,8	37	35,3	84,3
	80-100	117	4,5	3,9	46,7	40	31	21
	100-120	62	0,038	0,06	15,6	25	25,5	71
	120-140	690	0,16	0,08	470	68	130	19
	140-160	310	0,1	0,03	210	68	33	10,6
	160-180	680	0,2	0,03	525	72	140	21
	180-200	340	0,1	0,03	250	73	37	11
200-220	70	0,184	0,3	36,1	52	12,7	18	20,6
	220-240	35	0,02	0,06	26	74	9	25
	240-260	230	0,1	0,04	150	65	9,6	4,2
	260-280	32	0,08	0,3	24	75	3	9,4
	280-300	72,26	0,15	0,67	14,2	64	1,6	7,2
	30-60	18,7	0,12	0,64	15	80	1,5	8
	0-30	20,1	0,35	1,7	13,1	65,2	1,8	9
	30-60	22,2	0,42	1,9	16	72	3,1	14
	0-30	60,0	1,4	2,3	40	66,7	6	10
	30-60	29,2	0,7	0,24	17,5	60	4,5	15,4
90 км ниже Главной канавы сточных вод							7,2	24,7

П р и м е ч а н и е: мг/кг - абсолютная концентрация; % - доля фракции от зева; валовое фоновое содержание ртути в илах = 0,044 мг/кг.

особенно формы, связанные (адсорбированные и соосажденные) с оксидами и гидрооксидами железа и марганца, преобладают в общем балансе форм, составляя в среднем в ближней зоне ~ 58%. Однако фиксируется достаточно выраженная неоднородность распределения как относительных (от 25% до 75%), так и абсолютных (от 15,2 до 525 мг/кг) содержаний данной формы в разрезе илов (табл. 57). По мере удаления от источника загрязнения как в средней, так и в периферической части потока рассеяния отмечается определенное относительное увеличение (в среднем до 70% и 63% соответственно) доли оксидных форм, резко преобладающих над другими формами.

Элементарная форма (представленная металлической или атомарной ртутью) в ближней зоне воздействия составляет в среднем около 19% валового содержания. В разрезе илов ее доля, как и абсолютные уровни, также незакономерно варьируют. По мере удаления от города как абсолютные содержания, так и относительная доля элементарной ртути в общем балансе форм заметно снижаются. В частности, доля данной формы в средней и периферийной части потока рассеяния составляют в среднем соответственно около 10 и 13%, что является логическим следствием различных процессов трансформации соединений ртути.

Прочносвязанные формы, представленные, по всей видимости, сульфидными соединениями ртути, а также каломельной ртутью, в среднем составляют для разных зон потока 19–22%. Как и в случае с другими формами нахождения фиксируются незакономерные изменения как относительного, так и абсолютного содержания в разрезе техногенных илов.

Необходимо отметить, что в общем случае фиксируется довольно неплохая схожесть в структуре баланса форм нахождения ртути в техногенных илах и взвесях (рис. 26). Это свидетельствует о ведущей роли, особенно в прошлые годы, взвешенных веществ в формировании контрастных литохимических потоков рассеяния ртути в донных отложениях. Наблюдаемые различия являются, естественно, следствием трансформационных процессов, происходящих как в илах, так и во взвеси.

Итак, значительная часть техногенной составляющей ртути в илах накапливается в относительно подвижных формах. По мере удаления от источника загрязнения отмечается снижение как валовых содер-жаний, так и концентраций различных форм ртути. Отмечается достаточно выраженное закономерное изменение в соотношении различных форм вниз по потоку, проявляющееся в определенном, порой значимом

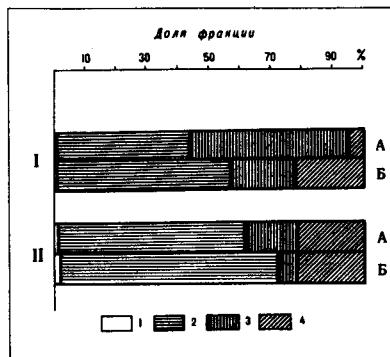


Рис. 26. Соотношение форм нахождения ртути во взвеси (А) и техногенных илах (Б).

I – Главная камара сточных вод, II – р. Нура, 16 км ниже.
1 – сульфатная, 2 – оксидная, 3 – элементарная, 4 – прочносвязанная

увеличении относительной доли оксидных форм, в меньшей степени сульфатных, а также в снижении доли металлической ртути. Это указывает на геохимическую трансформацию форм в процессе миграции, которая сопровождается ее выделением в водную массу.

Доля прочносвязанных форм, как правило, не превышает 25–30%. В целом коэффициенты подвижности (соотношение подвижных и прочносвязанных форм) для всей массы илов достаточно велико. К тому же валовые содержания ртути в техногенных илах настолько велики, что даже более низкий уровень подвижных форм будет определять экотоксикологическую опасность техногенных илов.

Ртуть в иловых водах. Результаты исследования распределения ртути в иловых водах показали их заметную обогащенность этим металлом, причем его концентрации стабильно выше, нежели в речных водах (табл. 58). По всей видимости, в пределах слоя на границе вода/иля существует постоянный градиент концентрации растворенных форм ртути, направленный из отложений в воду. При этом фиксируется прямая зависимость уровня содержания ртути в иловой воде от ее концентрации в илах.

Таблица 58. Ртуть в техногенных илах, иловых и поверхностных водах р. Нуры

Место отбора проб	Вода, мкг/л		Илы, мг/кг
	иловая	поверхностная	
I, 5 км ниже города	4,9	4,0	500
9 км ниже города	2,7	1,1	100
17 км ниже города	2,6	1,9	78
31 км ниже города	0,65	0,5	33

Техногенные илы – вторичный источник поступления ртути. Разнообразный характер концентрирования ртути в гранулометрических фракциях и одновременное присутствие нескольких ее соединений в техногенных илах обусловлено условиями формирования последних, периодической сменой гидрохимических условий и общей окислительной обстановки, а также естественным ходом развития русловых процессов. Ртуть, входящая в состав растворимых соединений, прежде всего связанных с сульфатными и оксидными формами, является геохимически активной и может интенсивно включаться в миграцию. Присутствие в илах элементарной ртути также вполне закономерно, поскольку ртуть способна восстанавливаться до элементарного состояния из многих ее соединений. Имеющиеся данные свидетельствуют о вероятности достаточно активной трансформации металлической ртути в водной среде, главным образом в результате окислительно-восстановительных реакций [23]. Окислению металлической ртути в значительной мере способствует присутствие в водной среде органических веществ, что обычно характерно для загрязненных водных объектов. Сульфидные соединения ртути, отличаясь высокой стабильностью, могут постепенно окисляться под действием ряда окислительных агентов. В частности, в присутствии кислорода нерастворимый сульфид ртути может окисляться в растворимые соли – сульфит и сульфат ртути, что приводит к ионизации металла и его последующему участию в различных химических реакциях [24]. В целом можно утверждать, что результаты изучения особенностей распределения и форм нахождения ртути в техногенных илах указывают на потенциальную значимость последних как источника вторичного загрязнения вод и биоты.

Многочисленные литературные данные указывают на то, что важнейшим механизмом, определяющим роль и значимость донных отложений в круговороте ртути в водных объектах, являются происходящие в них процессы ее метилирования, способствующие активному включению этого металла в пищевые цепи водных экосистем. Детальные работы, выполненные в 1960-х годах на озерах Швеции, позволили Йенсану и Йернелову (1972) обосновать так называемую гипотезу о локальном круговороте ртути. Несмотря на то, что ключевые моменты этого круговорота остаются неясными, решающая роль процессов метилирования может считаться доказанной. Мы не будем подробно останавливаться на рассмотрении данного вопроса, поскольку по нему имеется значительное количество информации. Отметим лишь тот факт, что основная масса литературных данных посвящена рассмотрению круговорота ртути в относительно замкнутых водных системах (озерах). Многочисленные

исследования распределения метилртути в донных отложениях как в природных, так и в лабораторных условиях показали, что, как правило, только менее 1% общей ртути является органической. По данным Г.Ф.Вознесенского и соавторов (1983), доля органических соединений ртути в илах р.Нуры составляет не более 0,04% от валового содержания. Однако важно учитывать тот факт, что попытки определить темпы метилирования и уровень содержания метилртути в донных отложениях позволяют оценить ее концентрацию лишь в данный конкретный момент, а не истинные темпы синтеза этих соединений. Хорошо известно, что они подвергаются постоянной и интенсивной микробиологической деградации, трансформации и восстановлению до свободной ртути с последующим выделением в воду, атмосферу и поглощением биотой. Поэтому фиксируемые невысокие относительные уровни указанных соединений не могут свидетельствовать о незначительности их экотоксикологического эффекта. Этот факт часто забывается при различных оценках. Более того, во-первых, даже при относительном содержании органических форм ртути в техногенных илах в пределах 0,01–0,04%, абсолютные количества ртути, связанные с этой формой, могут достигать колоссальных значений и многократно превышать фоновые валовые уровни этого металла. Во-вторых, интенсивность поступления ртути в водную fazу и биоту может быть обусловлена и наличием целого ряда естественных факторов и процессов, существующих и протекающих в водотоке.

Одним из факторов, способствующих переходу ртути в воду, является изменение гидродинамических условий. Так, при увеличении скорости течения (а также в результате деятельности бентосных организмов) происходит взмучивание верхнего слоя илов, их переход во взвешенное состояние и в итоге более тесный контакт с водой, что может приводить к десорбции ртути. Кроме того, возможен и переход из иловых вод, заключенных в объеме взмученных осадков. Преимущественная связь ртути с тонкими частицами техногенных илов на большей части изученного участка реки свидетельствует о ее высокой потенциальной миграционной способности. Эти отложения гидродинамически достаточно подвижны, особенно в паводки, половодья, при попусках воды из водохранилищ, при механическом воздействии на них. Все это способствует их взмучиванию, перемещению по руслу и интенсифицирует процессы выделения ртути в водную fazу. Кроме того, хорошо известно, что в речном потоке постоянно происходит обмен частицами между дном и основной толщой водного потока. Повышенная мутность природной воды увеличивает способность потока переносить и более

крупные, обогащенные ртутью, частицы, которые могут перемещаться также качением и сальтацией. Изменения вязкости воды за счет появления даже незначительного положительного градиента температуры, что характерно для загрязненных участков рек вследствие поступления более теплых сточных вод (особенно в холодное время), может также приводить к увеличению транспортирующей способности реки. В итоге, все эти процессы, существующие реально, будут способствовать распространению загрязненных наносов вниз по реке и выделению ртути в водную толщу, а также ее поступлению с орошающими водами и при разливах на пойменные территории.

Хорошо известно, что в восстановительных условиях и при $\text{pH} = 6-8$ происходит активное восстановление гидроксидов железа и марганца с образованием соединений этих элементов низкой валентности, обладающих гораздо более высокой миграционной способностью. Одновременно в раствор переходят и связанные с ними формы ртути. Этот процесс особенно может активизироваться при взмучивании. Напомним, что при гидрохимических исследованиях на отдельных участках русла реки фиксировалось одновременное повышение содержаний растворенных форм железа, марганца и ртути.

Вне гидродинамического фактора миграционный поток ртути из донных отложений в воду определяется в значительной мере концентрационной диффузией. Молекулярная диффузия растворенных соединений многих элементов является универсальным процессом их удаления из отложений в воду, существует практически в любом водоеме и поддерживается за счет градиента концентрации веществ вблизи границы вода - дно. Для большинства компонентов этот градиент постоянно направлен из отложений в воду. Наличие такого градиента фиксируется даже в природных водоемах при незначительных уровнях ртути в отложениях и водах. Это, в частности, наблюдалось нами в натурных условиях для широкой группы химических элементов, в том числе и для ртути.

Нельзя исключить также определенное влияние на удаление ртути из донных отложений и процессов газовыделения, которые в реке, особенно в ближней зоне воздействия, могут быть значимыми из-за высокого содержания органических веществ в илах. При анаэробных условиях в иле образуются и из него выделяются некоторые газы (CO_2 , H_2S и др.). Выделение химических элементов в водную фазу может осуществляться также при деструкции органического вещества, находящегося на непрерывно обновляющейся поверхности речного дна; при конвективном переносе; ртуть может вовлекаться в круговорот при

случайном попадании в организм гидробионтов с частичками ила, при поедании ила и т.п.

Водная растительность в течение вегетационного периода активно извлекает ртуть из донных отложений. Осенью, после отмирания макрофитов, часть этой ртути возвращается в донные отложения с продуктами распада, часть выделяется в воду. Кроме того, в период вегетации в воду может поступать определенное количество соединений ртути с приживленными выделениями высшей водной растительности. Такие данные, в частности, известны для тростника.

Итак, приводимые данные указывают на то, что в прогнозе чрезвычайно интенсивно загрязненные илы будут являться мощным источником загрязнения водной экосистемы ртутью.

3. Фитогеохимическая индикация загрязнения водотоков ртутью

Характерной особенностью ртути является стабильность к биоаккумуляции, что приводит к ее концентрированию в живых организмах и накоплению на более высоких трофических уровнях пищевых цепей водных экосистем. При этом наблюдается прямая зависимость между интенсивностью поглощения поллютанта и уровнем его содержания в водной среде.

В табл. 59 приведены данные об интенсивности концентрирования ртути различными видами водных растений, произрастающих в р. Нури. Как следует из данных, в условиях чрезвычайно сильного загрязнения в растениях фиксируются очень высокие уровни накопления ртути (коэффициенты концентрации относительно фона достигают 420). Ртуть интенсивно концентрируется как погруженными гидрофитами (урть, роголистник), так и свободно плавающими. Для прикрепленных растений не исключена возможность извлечения ртути не только из воды, но и из техногенных илов (где преобладают ее подвижные формы) и иловых вод (отличающихся повышенными ее концентрациями). Высокие концентрации ртути в ряске указывают на активное поглощение этого металла непосредственно из воды, свидетельствуя о стабильном сильном загрязнении водной массы реки. Все растения отбирались на участках наилучшего скопления техногенных илов, то есть в условиях замедленного водообмена (заливы, затоны и т.п.). Практически во всех случаях фиксируется прямая зависимость уровня накопления ртути в гидрофитах от ее содержания в техногенных илах, причем не только для прикрепленных, но и для свободно плавающих (табл. 59). В

Таблица 59. Накопление ртути в водных растениях р.Нуры

Место отбора проб (расстояние от места сброса стоков, км)	Растение	мг/кг сухой массы	Кс отно- сительно фона	Ртуть в техно- генных илях, мг/кг
1,5	Урутъ	19,7	394	100
4	Роголистник погруженный	11,5	230	850
8	Ряска малая	0,49	9,8	4
18	Роголистник погруженный	1,4	28	100
30	Ряска малая	21	420	200
43	Роголистник погруженный	0,34	6,8	25
Фоновый участок реки	Среднее для всех растений в целом	0,05	-	0,044

последнем случае более высокие концентрации ртути в ряске наблюдались на значительном удалении от места сброса сточных вод; хотя, если считать сточные воды основным источником ртути, логичнее было бы ожидать обратное. Однако в рассматриваемом примере дальний участок опробования отмечался значительно более высокими концентрациями ртути в техногенных илах (соответственно для дальнего и ближнего участков 200 и 4 мг/кг). Специальные исследования показали, что именно на этом участке реки в ее водах постоянно фиксируются высокие уровни растворенной ртути, которые могут быть связаны с ее поступлением из илов. Приводимые данные свидетельствуют о том, что илы являются источником вторичного поступления ртути в водную фазу и биоту. Значение илов для поступления ртути в прикрепленные растения может быть определяющим. По данным С.И.Козловой [5], основной транспорт ртути в прикрепленных макрофатах идет через проводящие органы, а поглощение из воды менее значительно.

Рассматривая особенности накопления ртути в пресноводных растениях, многие авторы отмечают, что темпы ее абсорбции зависят от их вида, хотя какой-либо четкой корреляции не выявлено. Не известно также, какое количество ртути поступает в растительные клетки, собирается на их поверхности, связывается с метаболитами. Так, по некоторым данным у водорослей ведущая роль в накоплении этого ме-

тала принадлежит адсорбции на поверхности клеток [5]. По другим – непосредственное аккумулирование ртути внутренними частями клеток [19]. Имеются сведения о накоплении в пресноводных растениях метилированных соединений ртути. Однако, если между уровнем содержания ртути в водной среде и концентрацией в биоте фиксируется прямая связь, то между содержанием в растениях общей ртути и метилртути прямой зависимости не обнаружено. Так, уровень метилртути в растениях из водоемов ртутных биогеохимических провинций лишь в 2 раза превышает содержание метилртути в водорослях из природных водотоков контрольных районов (Брмаков и др., 1991). Тем не менее, как отмечают авторы, эффект кумуляции метилртути организмами выражен достаточно четко, и одновременно высказывают вполне справедливое предположение о том, что в пресноводных водоемах в трансформации ртути существенную роль играют прибрежные растения и, возможно, планктон. Интересно отметить, что, исходя из приводимых авторами данных, в фоновых водных растениях относительная доля метилртути может быть значительно выше, нежели в аномальных условиях. Однако, естественно, абсолютные концентрации метилртути в аномальных зонах многократно выше, нежели в фоновых районах. По данным ИПГ Госкомгидромета в водорослях р.Нуры вблизи источника загрязнения при общем содержании ртути в 37,8 мг/кг сухой массы доля органических форм составляла 6,2%. Хорошо известные работы канадских исследователей на р.Оттава ниже г.Оттава показали, что доля органических соединений ртути от общего содержания составляет в донных отложениях ~1%, во взвешенном веществе ~29%, в бентосных беспозвоночных ~29%, в высших растениях ~20%, в рыбах до 82% [19].

Остановимся еще на одном способе связывания ртути водными растениями. Так, на поверхности растений (листьях, стеблях) в водотоках практически всегда фиксируется адсорбция (точнее прилипание) взвешенных в воде твердых частиц. Нами было изучено распределение ртути в такой взвеси, условно названной "фитовзвесью", в р.Инсар в зоне влияния г.Саранска (табл.60). Как видим, фитовзвесь в отличие от других компонентов характеризуется максимальными абсолютными концентрациями ртути. Показательно, что и контрастность проявления в ней техногенных аномалий намного резче, нежели в других компонентах. Безусловно, что изучение фитовзвеси имеет определенное методическое значение, поскольку во многих случаях указанный прием может быть более эффективным и информативным при выделении аномалий, чем исследование других объектов. Экологическая и токсикологическая значимость такого "нахождения" ртути еще требует своего изучения.

Таблица 60. Уровни содержания ртути в различных компонентах р.Инсар в зоне влияния г.Саранска

Место отбора проб	Фитовзвесь		Растения		Техногенные и/or взвешенная ртуть		Растворенная ртуть		Кс
	МГ/КГ	Кс	МГ/КГ	Кс	МД/КГ	Кс	МКГ/Л	Кс	
Выше города	0,03	-	0,05	-	0,02	-	0,08	-	0,05
Устье ручья, дренирующего крупную промзону	15	500	0,3	6	4,8	240	0,41	5	0,10
В 1 км ниже устья ручья	5	167	0,2	4	0,9	45	0,25	3	0,05
В 40 км ниже устья	1	33	0,1	2	0,05	2,5	0,08	1	0,05

Примечание: Кс рассчитывался относительно содержания выше города.

Водные растения могут играть, по всей видимости, активную роль в трансформации ртути, аккумулированной в донных отложениях. Очень интересные факты были получены американскими исследователями Дж. Кожуховским и Д.Джонсоном (1978), изучавших состав газов, выделяемых тростником в результате его жизнедеятельности. Эксперименты проводились на двух участках ручья в зоне влияния загрязняющих окружающую среду (прежде всего грунты) ртутью промышленных предприятий. Было установлено, что в зонах загрязнения через устьица растений выделяется заметно больше паров ртути, чем на незаграженной местности. Так, тростник на одном из загрязненных участков выделяет в атмосферу в четыре, а на другом - в двенадцать раз больше ртути, нежели тростник с контрольных участков. Объем выделяемых паров ртути находился в прямой зависимости от степени загрязнения грунтов.

В настоящее время имеется довольно обширная информация по уровням концентрации ртути в водных растениях, свидетельствующая о том, что в зонах загрязнения ее концентрации могут достигать очень высоких значений (табл.61). Однако из приводимых в таблице данных только уровни содержания ртути в макрофитах из р.Белая соотносятся с аналогичными в р.Нуре, что вполне закономерно (наличие мощного "рутного" источника загрязнения).

Таким образом, водные растения являются эффективными индикаторами загрязнения водных систем ртутью и позволяют оценить роль донных отложений в поставке поллютанта в водную массу. Уровни содержания ртути в гидрофитах в условиях сильного загрязнения могут в сотни раз превышать фоновые концентрации. Определенное количество ртути в растениях находится в метилированных соединениях. Ртуть может также связываться с растениями в виде так называемой "фитовзвеси". В общем случае приведенные материалы указывают на реальную возможность участия водных растений в трансформации и круговороте ртути в водных экосистемах, в определенных случаях являясь начальным звеном включения этого поллютанта в пищевые цепи. В свою очередь, после отмирания водоросли могут являться источниками вторичного загрязнения воды ртутью и оказывать заметное влияние на химический состав донных отложений.

4. Ртуть в водоемах

Проблема геохимии ртути в водоемах, расположенных в городских агломерациях, занимает особое место в ряду экологических проблем, обусловленных воздействием данного металла. Это, с одной стороны,

связано с природными характеристиками водных объектов (замедленный водообмен и вероятность существования местного (локального) круговорота ртути с активным ее включением в водные пищевые цепи).

Именно для водоемов известны случаи интенсивного развития процессов метилирования ртути, что создает прямую угрозу для биоты и человека. Широко известная гипотеза шведских исследователей С.Йенсена и А.Йернелова о локальном круговороте ртути, показавших, что в природных условиях может происходить трансформация соединений ртути до метилированных форм с последующим их накоплением в биоте, была разработана для условий озер. Детальный анализ круговорота ртути в природных пресноводных озерах был выполнен М.Вертою (Verta, 1984), который обобщил имеющиеся по данному вопросу материалы. Так, по мнению многих исследователей наиболее важным фактором, влияющим на содержание ртути в биоте, является образование именно метилртути, которое происходит в верхних слоях донных отложений. Как известно, обнаружено два биохимических пути метилирования ртути: анаэробный и аэробный. Анаэробный путь заключается в метилировании неорганической ртути соединениями метилкобаламина, продуцируемыми метаногенными бактериями в среде со слабовосстановительными условиями. Данный процесс протекает без участия ферментов и является строго анаэробным. Аэробный путь заключается в том, что метилртуть, связываемая гомоцистеином, подвергается метилированию при процессах, которые приводят к образованию метионина в клетках бактерий, то есть происходит образование комплекса метилртути-гомоцистеин. В водах с достаточной степенью насыщения кислородом возможен как аэробный, так и анаэробный путь метилирования. Считается, что способность осуществлять метилирование ртути присуща многим видам микроорганизмов. В принципе, условия, которые способствуют росту бактерий, стимулируют и метилирование ртути. Обычно самая высокая степень метилирования отмечается в верхних слоях донных отложений и во взвесях, обогащенных органическим веществом. М.Верта выделяет две группы основных факторов, определяющих уровень содержания метилртути в биоте пресноводных водоемов. Это, во-вторых, уровень содержания ртути в компонентах водной среды; во-вторых, факторы окружающей среды (температура, параметры воды, микробиологическая активность, размер, возраст и пол особей, метаболические различия и т.п.). На основании изучения 35 лесных озер Финляндии было установлено, что содержание метилртути в рыбе (шуге) хорошо коррелировало с параметрами качества воды (например, с содержанием аллохтонного органического вещества), а не с pH воды и

трофическим уровнем озера. Этот факт отмечен также и для ряда водохранилищ Финляндии. Существует указание на то, что гуминовые вещества почв увеличивают растворимость ртути в воде. Более того, было установлено, что гуминовые и фульвокислоты, поступающие из почв, могут метилировать неорганическую ртуть небиологическим путем до монометилртути. В 1983 г. рядом исследователей была выдвинута гипотеза, суть которой сводилась к следующему: в полигуминовых озерах взвешенные и растворенные гуминовые вещества оказывают сильное влияние на цикл ртути; они выступают как носители ртути и источники энергии для гетеротрофных бактерий и зоопланктона; в результате разрушения гуминовых веществ бактериями образуется монометилртуть.

Согласно этой гипотезе в полигуминовых озерах процессы метилирования ртути наиболее активнее происходят в толще воды, нежели в донных отложениях. В озерах с "чистой" водой процессы метилирования активнее идут в донных отложениях. Однако, как предполагает М.Верта, не исключена возможность метилирования ртути непосредственно в почвах, то есть до поступления в водоем.

В нормальном пресноводном озере более 90% ртути, способной метилироваться и входящей в пищевую цепь, находится в верхнем 5-см слое донных отложений и только 1% присутствует в рыbach. Образование диметилртути в рыбах протекает очень медленно, и период ее полуыведения для рыб в сильно загрязненных условиях составляет около 2-х лет. Как правило, метилртуть прочно связывается с тканями рыб. В условиях замкнутости озерных систем метилртуть накапливается в популяциях рыб.

По хорошо известным данным шведских ученых количество валовой ртути, присутствующей в природных водных экосистемах и ежегодно превращающейся в метилртуть, составляет не более 0,1%. Поскольку все-таки в большинстве озер активность бактерий в водной массе ниже, нежели в поверхностных слоях донных отложений, то и интенсивность метилирования непосредственно в воде заметно меньше (0,01-0,1% в год). М.Верта выдвигается гипотеза, объясняющая роль биоты в цикле ртути в озерах, а также влияние рыболовства на этот цикл. Суть гипотезы сводится к следующему: метилртуть циклирует в биоте озера, то есть когда рыба погибает, то метилртуть, содержащаяся в ней, в конечном счете аккумулируется в биоте. Чем менее интенсивно ведется рыбный лов в озере, тем более важна роль биологического цикла в восстановлении общего количества метилртути и уровня ее содержания в биоте. В соответствии с этой гипотезой содержание

Таблица 61. Уровни содержания общей ртути (в мг/кг сухой массы) в некоторых пресноводных растениях

Вид растений	Среднее (пределы колебаний)	Место обитания	Источник загрязнения	Литературный источник
Сосудистые растения	0,07 (0,02-0,14)	Озеро в Финляндии	Целлюлозно-суммажные фабрики	Мур, Рамадури. [19]
Сосудистые растения	0,18 (0,03-0,43)	Река Рур (ФРГ)	Различная промышленность	Мур, Рамадури [19]
Фитопланктон	0,21 (0,03-0,72)	Озеро в Финляндии	Целлюлозно-бумажные фабрики	"
Бентосные диатомеи	0,6 (0,5-0,8)	Река Неккар (ФРГ)	Различная промышленность	"
Бентосные водоросли Прикрепленные погруженные растения	до 9 (0,34-19,7)	р. Ачано (Япония) р. Нура, Казахстан	Ангольдельфинное производство	Данные автора
Раска малая	(0,49-21)	р. Нура,	"	"
Рогоз широколистен- ный (листья)	(0,15-0,30)	р. Инсаар, Мордовия	Различная промыш- ленность	"
Тростник обыкновенный	(0,07-0,18)	р. Пахра, Московская обл.	Ртутные геохимиче- ские аномалии	Ермаков и др., 1991
Прибрежные водные растения	до 1,42 (0,004-0,006)	Средняя Азия, район ртутных месторождений Пруды Европейской части РСФСР	Отсутствует	"
Макрофиты	(3-40)	р. Белая и р. Ашкекар	г. Стерлитамак	Красников и др. [5]
Раска	(0,23-0,36)	р. Дунай (Устве)	"	Козлова "
Прикрепленные макро- фиты	(0,12-0,49)			

метилртути в озерах, где не ведется интенсивный лов рыбы, будет выше, нежели в аналогичных озерах, но с активным рыболовством. Это в какой-то степени может объяснить наличие высокого содержания метилртути в удаленных от техногенных источников озерах.

С другой стороны, в условиях города водоемы активно используются для местного водоснабжения, для целей рекреации и рыболовства, одновременно являясь приемниками поверхностного стока (дожевого, талого, поливочно-моечного) с урбанизированных территорий. Определенное количество поллютантов поступает на их поверхность в составе атмосферных выпадений. Кроме того, в них могут сбрасываться и так называемые нормативно-чистые сточные воды, которые, как свидетельствует опыт, не всегда являются таковыми. Все это в итоге может привести к определенным негативным последствиям, которые могут резко обостриться в тех городах, где имеются значимые источники ртути. Рассмотрим некоторые аспекты данной проблемы на примере Самаркандинского водохранилища, входящего в сложную водохозяйственную систему р. Нуры.

В настоящее время в водохранилище (кроме поверхностного стока и атмосферных выпадений) поступают значительные количества так называемых нормативно-чистых сточных вод промышленных предприятий г. Темиртау (табл.62). Считается, что в сточных водах ГРЭС и металлургического комбината ртуть не содержится, а в стоках ПО "Карбид" ее уровни не превышают значений 0,07-0,1 мкг/л (то есть с ними в водохранилище поступает в среднем около 5 кг ртути в год). Сброс указанных выше нормативно-чистых вод в водохранилище осуществляется по специальным сточным канавам-арыкам.

Проведенные исследования показали следующее. В водах сточных арыков ПО "Карбид" стабильно фиксируются очень высокие концентрации растворенных (выше ПДК) и взвешенных форм ртути (табл.63). Для сточных вод цехов по производству каучука и дивинила характерно преобладание растворенных форм, а для вод цехов по производству карбида кальция - взвешенных. Интересно, что во взвеси из первого арька преобладала ртуть, связанная с оксидными формами, а из второго - с прочносвязанными, что вполне закономерно и отражает специфику производства. Контрастные аномалии ртути фиксируются и в донных отложениях (техногенных илах) сточных арыков ПО "Карбид" (табл.64). Характерно, что в донных отложениях арька, принимающего стоки цеха по производству карбида кальция, уровень концентрирования ртути много выше (преобладания в водах взвешенных форм), нежели в другом арьке. Расчеты показывают, что только со сточными во-

Таблица 62. Сточные воды промышленных предприятий г. Темиртау, поступающие в Самаркандское водохранилище

Предприятие	Характеристика сброса	Характеристика сточных вод	Объем, м ³ /год
КарГРЭС-I Карметкомбинат ПО "Карбид"	Объединенный	Нормативно-чистые	99,7 млн.
	Объединенный с ТЭЦ-2	"	510 млн.
	Локальный юго-восточный	"	8,5 млн.
	Сортопрокатное производство	"	3,7 млн.
	Производство карбida кальция	"	39 млн.
	Производство каучука и дивинила	"	18,6 млн
	Итого:		678,5 млн

Таблица 63. Ртуть в воде сточных арыков, принимающих нормативно-чистые воды ПО "Карбид", мкг/л

Производство	Ф о р м а		В а л	Доля взвешенной, %	Абсолютная концентрация во взвеси, мг/кг
	Растворенная	Взвешенная			
Каучука и дивинила	0,70(8,8)	0,28(4,7)	0,98(7)	29	35,5(4,4)
Карбida кальция	0,45(5,7)	1,05(I7,6)	I,5	70	88,2(II)

Примечание: Приведены средние данные за 6-дневный период опробования; в скобках значения Кс.

Таблица 64. Ртуть в донных отложениях сточных арыков ПО "Карбид", мг/кг

Производство	Пределы колебаний	Среднее	Коэффициент вариации, %	Кс относительно фона (средний)	Кс максимальный
Каучука и дивинила	I-15	4,77	72	I08	34I
Карбida кальция	7-500	I25,7	I09	2857	II365

Примечание. В арыки поступает поверхностный сток с территории завода, опробовался верхний слой отложений - 50 см.

Таблица 65. Ртуть в воде сточных арыков, принимающих нормативно-чистые воды Карметкомбината и литейно-механического завода, мкг/л

Завод	Растворенная	Взвешенная	Вал	Доля взвешенных, % форм	Абсолютная концентрация во взвеси, мг/кг
КМК	0,46(5,8)	0,24(4)	0,7(5)	34	15,2(I,9)
ЛМЗ	0,58(7,3)	0,42(I6,7)	I,00(7,I)	42	13,5(I,7)

Примечание. Приведены средние данные за 5-дневный период опробования; в скобках значения Кс.

Таблица 66. Ртуть в донных отложениях сточных арыков КМК и ЛМЗ, мг/кг

Арык	Пределы колебаний	Среднее	Коэффициент вариации, %	Кс относительно фона (средний)	Кс максимальный
КМК-I	0,4-0,6	0,49	I2	I1	I3,6
КМК-II	0,03-0,55	0,30	57	6,8	I2,5
ЛМЗ	0,3-0,5	0,42	I4	9,6	II,4

дами, сбрасываемых по этим аркам, в водохранилище в среднем ежегодно поступает порядка 80 кг ртути.

Достаточно высоки уровни содержания ртути, обнаруженные в водах сточных арков КМК и ЛМЗ (табл.65). Уровень ртути в донных отложениях заметно ниже, нежели в предыдущем случае (табл.66). Однако, как правило, сточные арки КМК представляют собой бетонированные лотокообразные каналы с очень сильным течением воды, в которых практически не происходит аккумуляции илов, то есть весь материал выносится в водохранилище. Контрастность техногенных аномалий во взвешенных формах проявлена за счет очень высокой мутности воды. В то же время, учитывая сказанное, а также большие объемы сбрасываемых сточных вод, можно предположить, что так называемые нормативно-чистые воды являются существенным источником ртути. Так, расчеты показали, что с ними в водохранилище поступает около 370 кг ртути в год.

Данные по содержанию ртути в стоках ГРЭС отсутствуют. Однако, даже если предположить, что валовые концентрации ртути в них находятся в пределах фоновых (что мало вероятно, в реальности они могут быть значительно выше), то с этими водами в водохранилище может поступать от 50 кг до 200 кг ртути ежегодно.

Таким образом, в настоящее время со всеми целенаправленно сбрасываемыми сточными водами в данный водоем ежегодно поступает порядка 500–700 кг ртути. Безусловно, определенное ее количество добавляется с атмосферными выпадениями непосредственно на зеркало водохранилища, а также с талым и дождевым стоком с чрезвычайно интенсивно загрязненной ртутью территории города, то есть приводимые цифры являются ориентировочными и фиксируют, по всей видимости, минимальную "ртутную" нагрузку на водный объект.

Высокая техногенная нагрузка на водохранилище подтверждается данными о распределении ртути в его водах (табл.67). Как видим, растворенные формы отличаются практически постоянным превышением уровня ПДК и значительным – фон. В отдельные дни существенная часть ртути была связана со взвешенными формами, что указывает на интенсивное ее биологическое поглощение, поскольку взвесь представлена главным образом планктонными организмами. Это не исключает активного включения ртути в пищевые водные цепи и представляет прямую угрозу человеку.

Достаточно интенсивное загрязнение водной массы водохранилища привело к тому, что в колодцах и скважинах, расположенных в

Таблица 67. Ртуть в воде Самаркандского водохранилища
(центральная часть акватории)

Параметр	мкг/л			Доля взвешенных форм, %	Абсолютная концентрация взвеси,	Мутность, мг/л
	Растворенная	Взвешенная	Вал			
Среднее	0,756	0,176	0,929	18,6	9,52	16,8
Предельы	0,460–1,021	0,080–0,461	0,681–1,261	9–37	4–17	6–43
Кс – средний	9,5	2,9	6,6	–	1,2	–
Кс – максимальный	12,8	7,7	9	–	2,1	–

Примечание. Приведены данные за 10-дневный период наблюдения в летнюю межень.

средственной близости от береговой линии, в результате естественной фильтрации резко увеличились концентрации ртути (находясь в пределах от 0,15 до 0,80 мкг/л, то есть в отдельных случаях превышали ПДК).

Таким образом, водоемы в условиях техногенного воздействия являются своеобразными "аккумуляторами" поступающей в окружающую среду ртути. Это, кстати, хорошо было видно на примере рассмотренного выше Интумакского водохранилища. С другой стороны они могут при определенных условиях выступать в роли "вторичных источников" поступления ртути в нижележащие части водной системы, причем в силу понятных причин ртуть из таких водоемов может мигрировать уже в более высокотоксичных соединениях. Интенсивное загрязнение водоемов, расположенных в пределах городских агломераций, может привести к полному их изъятию из какого-либо водопользования, а специфика биогеохимического круговорота ртути создать условия, представляющие реальную угрозу для населения. Безусловно, необходимо детальное изучение локального круговорота ртути не только в природных водоемах, но и в водоемах, испытывающих интенсивное техногенное воздействие.

РТУТЬ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ПРИГОРОДНЫХ ЗОН

Пригородные зоны - это территории, окружающие город и находящиеся с ним в тесной функциональной взаимосвязи. Значительная их часть используется, прежде всего в качестве сельскохозяйственных угодий, а также для дачных и садовых поселений и под рекреации. Естественно, что в зонах влияния промышленных городов эти территории испытывают существенное техногенное воздействие, что во многом определяет интенсивность их геохимического преобразования, т.е. качество окружающей среды.

В общем случае основное поступление ртути в агроландшафты в связи с воздействием городов может быть связано с: 1) выбросами, т.е. с влиянием промышленных выбросов в атмосферу и выпадением на поверхность почв и растения; 2) твердыми отходами, т.е. при использовании в качестве удобрений и мелиорантов различных видов отходов, "поставляемых" городом, а также при их захоронении и складировании в пределах пригородных зон; 3) стоками, в первую очередь при использовании загрязненных поверхностных вод для водной мелиорации, а также для других целей.

I. Ртуть в орошаемых агроландшафтах

В последние годы активно развивается, особенно в пригородных зонах промышленных городов, орошенное земледелие и овощеводство, в том числе с использованием вод местного стока. Это вызывает необходимость изучения геохимических особенностей орошаемых агроландшафтов, поскольку водные объекты, используемые для забора воды, во многих районах интенсивно загрязняются промышленными и бытовыми стоками. Таким образом, существует вероятность поступления поллютантов в почву и, соответственно, в сельскохозяйственную продукцию. Уже имеются сведения о негативных последствиях, связанных с использованием загрязненных вод для орошения сельскохозяйственных угодий. Так, в Японии выявлено специфическое заболевание людей ("итай-итай"), вызванное отравлением кадмием и проявляющееся в нарушениях различных функций организма в результате остеомаляции. В данном случае загрязненные воды использовались для заливки рисовых полей. Особым случаем является загрязнение пойм при разливах рек, что отмечено для земель, расположенных в нижнем течении Рейна, где

содержания ртути в верхнем слое почв достигают 5-10 мг/кг, а также в долине реки Гарц в Германии. Материалы Ю.Е.Саэта и соавторов [6] показывают, что на пойме реки ниже промышленного города в результате использования речных вод для орошения формируется полизлементная геохимическая аномалия тяжелых металлов, включающая и ртуть. Принципиальным является тот факт, что для загрязненных почв фиксируется высокий уровень содержания подвижных, усвоемых растениями форм нахождения химических элементов. Это привело к заметному накоплению ряда тяжелых металлов в сельскохозяйственной продукции. В некоторых районах Армении, как отмечают К.В.Григорян и А.Ш. Галстян, фиксируется загрязнение почв и растений в результате использования загрязненных речных вод для орошения. Устойчивость подобного загрязнения может быть очень велика. В частности, В.В.Ермаковым с соавторами (1991) в древних орошаемых сероземах поймы р. Сок (Джая Ферганы) были обнаружены концентрации ртути до 0,51-1,6 мг/кг при фоновых в 0,07-0,17.

Таким образом, приводимые факты показывают, что по своей значимости данная проблема достаточно серьезна. Все это требует более пристального внимания к геохимическим последствиям загрязнения орошаемых агроландшафтов и оценки происходящих явлений на примере наиболее критических ситуаций. Приводимые ниже данные о распределении ртути в орошаемых агроландшафтах поймы р.Нуры свидетельствуют о том, что длительное и интенсивное использование загрязненных поверхностных вод для орошения может привести к катастрофическим последствиям.

Увлажненность атмосферными осадками в бассейне реки Нуры невелика. Режим этих осадков также неблагоприятен, так как большая часть их выпадает в теплый период, когда величина испарения особенно велика. Большая часть выпадающих осадков испаряется и запасы влаги в корнеобитаемых слоях почвы незначительны. Этим и вызвано интенсивное развитие орошения, особенно на землях, прилегающих к каналу Иртыш-Караганда и к долине р.Нуры. Значительная часть орошаемых угодий расположена по р.Нуре ниже г. Темиртау. Площадь их постоянно увеличивается, составляя на сегодня около 24% всей площади орошаемых в Карагандинской области земель. Вдоль реки Нуры ниже города Темиртау в пределах только Карагандинской области расположены угодья и населенные пункты 22 хозяйств. Основным способом орошения, применяемым в этих хозяйствах, является дождевание с помощью поливальных машин "Фрегат", "Волжанка", "Кубань". Вода из р.Нуры подается либо по трубопроводам, либо по различным сооружениям.

ниям - каналам, лоткам и трубам. В вегетационный период (конец мая - начало сентября) прибрежные совхозы забирают на орошение до 60-70 млн. м³ воды.

Для выявления изменений в состоянии агроландшафтов поймы р. Нуры был выполнен комплекс исследований по изучению распределения ртути в почвах и сельскохозяйственных растениях в пределах хозяйств, расположенных в долине реки выше (местный фон) и ниже (ゾна загрязнения) г. Темиртау. Исследования проводились на эталонных площадках размером 50x50 м, заложенных на полях с различными культурами и расположенных в зонах активного орошения речными водами. На площадках было отобрано по 25 проб верхнего (пахотного) слоя почв и по 15-20 проб соответствующих видов сельскохозяйственной продукции. Изучено также вертикальное распределение ртути в профиле почв с детальным опробованием (по 5 см) до глубины 1,5 м.

Как известно, при орошении часть поливных вод перехватывается глубокими корнями растений; часть дополнительно испаряется из подпочвенных горизонтов, подтягивается к поверхности силами капиллярного поднятия, конденсируется, образуя подвешенные горизонты влаги; часть погружается в более глубокие слои, смыкаясь с кровлей грунтовых вод [8;10]. Влага, проникающая в почвенные агрегаты, вытесняет свободный и сорбированный воздух, а взвешенные вещества, содержащиеся в поливной воде, осаждаются на поверхности почвы, причем тонкие, коллоидные частицы могут проникать в более глубокие горизонты почв. Газовый режим почв резко меняется. Фиксируется, в частности, снижение кислорода в слое 0-40 см с 20% до 8-17%, а содержание CO₂ увеличивается с 0,3-0,5% до 1,5-2 и даже до 4%.

Постоянное чередование нагревания-охлаждения, осушения-промачивания, промерзания-оттаивания обуславливает физическое выветривание минералов, входящих в состав почв. Отмечается разрушение структуры поверхностного слоя почвы. Почвенные частицы перемещаются гравитационным потоком вертикальной фильтрации и локально накапливаются на повторяющейся при каждом поливе глубине промачивания, где постоянно создается уплотненный малопроницаемый горизонт, расположенный, как правило, на глубине 40-60 см (т.е. в пределах карбонатного горизонта каштановых почв). Этому способствует также обработка почв тяжелыми машинами. При орошении заметно интенсифицируются процессы выветривания, гидролиз, реакции поглощения, вытеснения и обмена катионов. Происходит накопление солей и вторичное засоление почв. В составе гумуса начинают преобладать фульвокислоты. При поливах резко возрастает щелочность, pH увеличивается

в момент полива на 0,5-2 интервала (напомним, что pH нормальных каштановых почв, как правило, находится в пределах 7,2-7,5, увеличиваясь до 8 в нижних горизонтах). Определенные изменения фиксируются и в валовом химическом составе верхнего горизонта почв, причем для аномальных почв они выражены более значимо. Однако, если по валовому химическому составу орошаемые фоновые и аномальные почвы разнятся все-таки незначительно, то по уровням и характеру накопления ртути - резко принципиально.

В табл.68 приведены данные о распределении ртути в верхнем слое орошаемых почв фоновых участков. Как видим, уровни содержания данного металла в фоновых почвах сравнительно невелики и незначительно отличаются от концентраций в природных разновидностях каштановых и лугово-каштановых почв, превышая их в среднем в 2 раза. Подобное увеличение содержаний может быть, во-первых, связано с дальним влиянием промышленных выбросов предприятий г. Темиртау и п. Актау, расположенных в 20-30 км от исследуемых агроплощадок. Во-вторых, не исключена вероятность наличия остаточных количеств ртути в результате применения в данном районе ртутьсодержащего ядохимиката (гранозана). В-третьих, хорошо известно, что накопление ртути в почвах прямо связано с уровнем содержания органических веществ [9], т.е. даже естественные почвы, обогащенные органикой, будут отличаться повышенными концентрациями ртути. А как установлено, пахотные горизонты орошаемых почв характеризуются увеличенным содержанием органики. В то же время, слабоповышенные уровни этого поллютанта в почвах неорошаемого пастбища могут указывать на некоторое преобладание аэрогенного поступления.

Таким образом, уровни содержания ртути в почвах орошаемых агроландшафтов, расположенных на пойме р. Нуры выше Самаркандинского водохранилища, лишь незначительно превышают природные концентрации. Выявленные превышения не связаны с используемыми для полива речными водами и практически не приводят к поступлению этого поллютанта в сельскохозяйственную продукцию.

Принципиально иная ситуация наблюдается в агроландшафтах, расположенных на пойме р. Нуры ниже г. Темиртау и орошаемых загрязненными речными водами. Как следует из данных, приведенных в табл.69, в пределах всех изученных площадок фиксируются достаточно контрастные аномалии ртути. Уровни ее содержания в аномальных почвах превышают концентрации в естественных почвах в 40-60 раз, а в фоновых орошаемых - в 10-20 раз, причем максимальные значения коэффициентов концентрации достигают соответственно 90-100 и 30-35. Таким

Таблица 68. Ртуть в верхнем слое орошаемых сельскохозяйственных почв в пределах фоновых участков, мг/кг

Выращиваемая культура	Среднее	Пределы колебаний	Коэффициент вариации, %
Свекла кормовая	0,054	0,04-0,08	17
Кукуруза на силос	0,046	0,03-0,07	35
Морковь	0,052	0,04-0,08	25
Картофель	0,026	0,01-0,05	58
Овес (кормовой)	0,032	0,02-0,04	47
Смородина	0,034	0,02-0,06	41
Яблоневый сад	0,023	0,01-0,03	39
Генеральное среднее	0,038	0,01-0,08	44
Неорошающееся пастбище	0,025	0,015-0,040	38

Примечание. Во всех растениях ртуть не обнаружена (менее 0,05 мг/кг сухой массы)

образом, орошение почв загрязненными речными водами привело к заметному накоплению в их верхнем горизонте значительных количеств ртути. В то же время, исходя из данных об уровнях содержания ртути в речных водах и илах как в настоящее время, так и в прошлом, следовало бы ожидать более контрастное накопление этого металла и в пахотных почвах. Более того, сравнение содержаний ртути в верхнем горизонте орошаемых почв с данными по распределению ртути в верхнем слое почв участков естественной степи, расположенных в пределах поймы р.Нуры, но не подверженных явному затоплению и орошению (т.е. для них основное значение имеет атмосферное поступление - в составе промышленных выбросов, при улетучивании из орошаемых почв, при дегазации из речной воды и т.п.), показало, что интенсивность накопления этого элемента в первом случае в среднем лишь в 2-3 раза выше, нежели во втором, хотя орошаемые почвы подвергались в течение длительного времени воздействию сильно загрязненных речных вод. Однако эти противоречия находят объяснение и связаны с характером водного режима и физико-химическими особенностями орошаемых почв и, соответственно, с поведением ртути в почвенном профиле.

Во-первых, хорошо известно, что при прочих равных условиях в пахотных горизонтах почв уровня содержания химических элементов

Таблица 69. Ртуть в верхнем слое почв сельскохозяйственных угодий, орошаемых загрязненными водами р.Нуры, мг/кг

Площадка, с/х культура	Пределы колебаний, мг/кг	Среднее, мг/кг	Коэффициент вариации, %	Кс относительно фона в сельскохозяйственных почвах	Кс относительно фона в естественных почвах
I, морковь семенная	0,300-0,600	0,440	17,5	II,6	44
2, "	0,250-0,450	0,335	47	8,8	33,5
3, кукуруза на силос	0,30-0,60	0,46	22	I2,I	46
4, "	0,50-0,90	0,590	23	I5,5	59
5, овес	0,20-0,50	0,375	31	9,9	37,5
6, "	0,12-0,80	0,362	55	9,5	36,2
7, смородина	0,45-0,60	0,545	10	I4,3	54,5
8, вишня	0,40-0,60	0,485	12	I2,8	48,5
9, смородина	0,30-0,90	0,56	37	I4,7	56
10, яблоня	0,30-0,30	0,448	34	II,8	44,8
II, смородина	-	0,500	-	I3,2	50
I2, картофель	0,40-0,50	0,480	7,7	I2,6	48
I3, "	0,10-0,30	0,385	60	9,6	36,5
I4, "	0,10-0,90	0,33	70	8,7	33
I5, капуста	0,40-0,90	0,592	33	I5,8	59,2
I6, помидоры	0,25-1,0	0,400	53	I0,5	40
I7, огурцы	0,15-0,45	0,320	32	8,4	32
I8, картофель	0,20-0,50	0,420	27	II,I	42
I9, яблоневый сад	0,25-0,70	0,525	28	I3,8	52,5
I0, морковь семенная	0,60-0,90	0,78	13	20,5	78
I1, морковь	0,40-0,90	0,615	25	I6,2	61,5
I2, картофель	0,30-0,90	0,690	28	I8,2	69
I3, вишневый сад	0,60-0,90	0,79	15	20,8	79
I4, огурцы	0,40-0,90	0,640	21	I6,8	64
I5, капуста	0,40-0,90	0,610	28	I6,I	61
I6, кукуруза на силос	0,40-0,90	0,585	23	I4,9	56,5
I7, овес	0,50-0,90	0,670	24	I7,6	67
I8, лук	0,10-0,45	0,275	48	7,2	27,5
I9, свекла	0,10-0,50	0,38	8	I0	38
I0, помидоры	0,10-0,40	0,175	52	4,6	17,5
I1, девственная степь	0,05-0,3	0,15	80	4	15

Примечание: площадки расположены на право- и левобережной пойме реки Нуры на участке долины от г. Темиртау до пос. Ростовка.

в среднем в 2–4 раза ниже, чем в непахотных. Это может быть обусловлено не только регулярным искусственным перемешиванием почвы (вариации концентраций ртути в пахотных горизонтах заметно слабее, нежели в верхнем слое природных почв), но и с более интенсивным выносом в составе поверхностного стока (особенно при развитии ирригационной эрозии), с инфильтрующимися водами, при ветровой эрозии (выдувание тонких частиц, обогащенных ртутью), а также с отчуждением определенных количеств с урожаем.

Во-вторых, не менее хорошо известно и установлено специальными исследованиями, что ртуть из верхних горизонтов почв теряется в виде паров. Особенно ее потери возрастают с повышением температуры и щелочности почв [9]. Напомним, что при поливах фиксируется заметное возрастание щелочности орошаемых каштановых почв, а это может способствовать улетучиванию определенной части поступающей в почву ртути. В жаркую погоду этот процесс может интенсифицироваться как в период полива, так и после. Это, в частности, подтверждается прямыми наблюдениями. Так, замеры содержания паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха над орошаемой почвой показали, что их концентрация может достигать 110–130 нг/м³ (т.е. 0,3–0,4 ПДК!).

В-третьих, наличие гравитационного потока вертикальной фильтрации способствует миграции ртути в нижележащие слои почв и ее контрастному накоплению, вероятнее всего, в пределах характерного для орошаемых каштановых почв уплотненного горизонта, обладающего повышенной илистостью и более высокой емкостью поглощения. По всей видимости, в орошаемых почвах создаются специфические условия, способствующие более активной миграции ртути из пахотного слоя вниз по профилю и последующего ее накопления в уплотненном горизонте. В частности, хорошо известно, что ртуть активно связывается с фульвокислотами, образуя фульватные комплексы при pH от 6 до 10 [9]. В присутствии фульвокислот резко возрастает растворимость водного оксида ртути, отмечается десорбция ее соединений из твердых частиц. Таким образом, появление повышенных количеств фульвокислот в составе гумуса, что характерно для данных почв, приведет к росту подвижности ртути и ее миграции с инфильтрующимися водами. Не исключена вероятность нисходящей миграции ртути и в составе коллоидных частиц, участвующих в формировании карбонатного горизонта каштановых и лугово-каштановых почв.

Высказанные соображения подтверждаются данными о фактическом распределении ртути в профиле орошаемых почв (рис.27). Как видим,

в двух удаленных друг от друга разрезах (расстояние между ними – 5 км) наблюдается довольно сходное вертикальное распределение ртути с ярко выраженным максимумом ее концентраций в слое 25–55 см, где они достигают 20 мг/кг (т.е. примерно в 10 раз выше ПДК). Этот горизонт, представленный каштановым суглинком, бесструктурным, очень плотным, и отвечает уплотненному слою, формирующемуся в поливных почвах. Ниже уровня 55–80 см содержания ртути резко снижаются, хотя и значительно превышают фоновые концентрации (Kс = 80 в слое 60–65 см; в слое 110–125 см Kс = 20–25). Характерно, что даже в условиях чрезвычайно интенсивного накопления ртути по всему профилю почв в указанном горизонте также фиксируются заметные максимумы ртути (рис.28). В данном случае вода на полив отводится непосредственно из канавы; не исключена также возможность периодического затопления в паводки и при аварийных сбросах. В фоновых естественных почвах подобная закономерность не установлена. Это подтверждает многочисленные данные о том, что концентрация ртути в верхнем слое почв выше, чем в подпочвенных горизонтах [2;9]. Выше было показано, что при аэрогенном поступлении ртути ее подавляющая часть также концентрируется в верхнем горизонте как культурных, так и естественных почв. А в условиях орошения характер распределения ртути резко меняется. Отметим, что для фоновых орошаемых почв также просматривается, хотя и очень слабо, тенденция к повышенному концентрированию ртути в указанном горизонте, что вполне закономерно.

Установленный факт имеет также и важное методическое значение. При проведении прикладных исследований в пределах таких ландшафтов необходимо опробовать не только верхний почвенный горизонт, чем, как правило, ограничиваются, а выяснить характер вертикального распределения поллютантов в профиле почв.

Уровень накопления ртути в почвах зависит не только от интенсивности загрязнения речных вод, но и от продолжительности периода полива. Так, интересная закономерность в распределении ртути была установлена в почвах дачных участков, расположенных на правом склонном берегу р.Нуры вблизи г.Темиртау (табл.70). Четко фиксируется зависимость роста концентраций ртути в верхнем слое почв от продолжительности периода орошения, т.е. от времени применения поливного режима (рис.29). Характерно, что в почвах, орошаемых более длительный период, ртуть отличается более однородным характером площадного распределения, на что указывает заметное снижение значений коэффициентов вариации (табл.70). Таким образом, фиксируется ярко

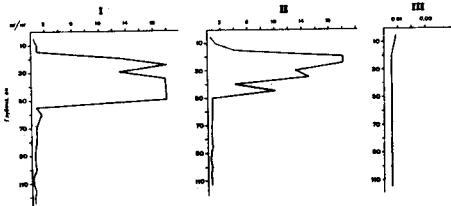


Рис. 27. Распределение ртути в профиле орошаемых почв.
I и II - загрязненные почвы, III - фон

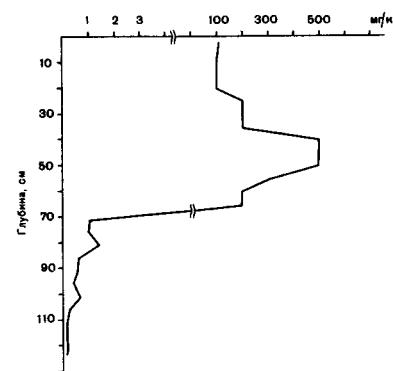


Рис. 28. Распределение ртути в шурфе, заложенном у русла Главной канавы сточных вод

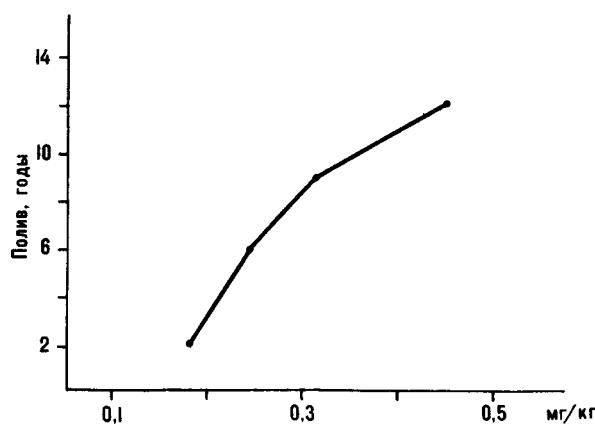


Рис. 29. Интенсивность накопления ртути в верхнем слое почв в зависимости от продолжительности периода полива загрязненными водами.

выраженная тенденция к увеличению содержаний ртути в верхнем слое почв с увеличением продолжительности периода орошения. Более низкие уровни ртути в почвах дачных участков в сравнении с почвами госхозяйств объясняются внесением заметных количеств привозных грунтов с фоновыми концентрациями ртути.

Таблица 70. Ртуть в верхнем слое почв дачных участков, орошенных водами р. Нуры, мг/кг

Площадка, выращиваемая культура, продолжительность периода орошения	Пределы колебаний	Среднее	Коэффициент вариации, %	Kс
1, овощи, 2 года	0,12-0,30	0,18	48	18
2, овощи, 6 лет	0,15-0,40	0,24	40	24
3, овощи, 9 лет	0,25-0,41	0,31	26	31
4, овощи, 12 лет	0,42-0,46	0,45	16	45

Таким образом, загрязнение, связанное с орошением речными водами, прослеживается практически на всю глубину почвенного профилля, что не исключает возможность проникновения ртути в грунтовые воды. Наличие на небольшой глубине (достигаемой корнями многих растений и глубокой вспашкой) горизонта с экстремально высокими уровнями ртути свидетельствует о вероятности ее поглощения в значительных количествах сельскохозяйственными растениями.

Вопросам биологического поглощения тяжелых металлов из почв посвящена обширная литература, в которой в экспериментальных и естественных условиях установлена возможность активного поступления ртути в растения при ее повышенных уровнях в почвенном покрове. Однако сейчас не вполне ясно, какие процессы наиболее важны в круговороте этого металла в окружающей среде. В частности, с одной стороны имеются многочисленные факты, свидетельствующие об интенсивном поглощении ртути корневой и подземной системами и переносе в самом растении. В то же время, рядом исследователей сообщалось, что уровень концентраций ртути в растениях в условиях ее аномального содержания в почвах слабо коррелирует с уровнями этого металла в последних и что дополнительное ее потребление ничтожно мало [9]. Мы не будем касаться механизмов поступления ртути в растение и ее распределения в нем, поскольку для нас важен конечный результат - накопление токсиканта в сельскохозяйственной продукции. В данном случае, безусловно, можно согласиться с утверждением В.Б. Ильина

(1985) о том, что в среде с высокой концентрацией любого химического элемента его избыточное поступление в растение неизбежно. В общем случае величина поглощения одного и того же элемента может колебаться в широких пределах в зависимости от вида растения, характера развития его корневой системы, форм нахождения и уровня содержания химического элемента в почве, характера его распределения по разрезу и подвижности в почве. Естественно, что состояние перечисленных факторов может быть весьма разнообразным, что создает множество возможных вариантов условий, при которых растение способно поглощать поллютант из почвы. В то же время многочисленные исследования позволяют считать установленным, что во многих случаях скорость поступления вещества в растения определяется количеством ионов, приходящих в контакт с поглощающей поверхностью корней за единицу времени. Как было показано еще С.А.Барбером (1966), это количество зависит от интенсивности трех процессов: 1) роста корней, в процессе которого они приходят в контакт со всеми новыми количествами ионов; 2) конвективного переноса ионов к поверхности корней потоком влаги, создающимся в результате всасывания воды корнями; 3) диффузии ионов к поверхности корней по градиенту концентрации. В рассматриваемых условиях достаточно активно растения могут поглощать пары ртути непосредственно из воздуха, концентрации которых над орошаемыми почвами (и, по-видимому, в почвенном воздухе), как показано, достаточно велики. Активному и, по-видимому, достаточно интенсивному поглощению ртути способствует и тот факт, что при экстремально высоких валовых концентрациях подавляющая ее часть накапливается в почвах в подвижных, биогеохимически активных и доступных для растений формах (табл.71). Здесь следует отметить, что ртуть в почву поступает, во-первых, в растворенных формах с оросительными водами; во-вторых, во взвешенных формах с речными взвесями. Возможно, что формирование контрастных аномалий ртути в почвах во многом обусловлено поступлением обогащенной этим металлом взвеси. В настоящее время имеются указания на то, что даже в условиях почв могут достаточно интенсивно протекать процессы метилирования как в результате биотических, так и абиотических факторов [33]. Это еще более увеличивает вероятность поступления ртути в растения. Хорошо известно, что короткоцепные алкилированные соединения ртути, в особенности ее метилированные соединения, проявляют высокую способность к биоаккумуляции. Однако на сегодняшний день, вопросы, связанные с изучением накопления метилртути в растениях, изучены слабо. В частности, имеется не так уж много данных о

концентрировании указанных соединений в сельскохозяйственной продукции. Некоторые из них свидетельствуют о чрезвычайно интенсивном накоплении органических соединений ртути в съедобных частях растений [4;9;34], другие указывают на отсутствие [36].

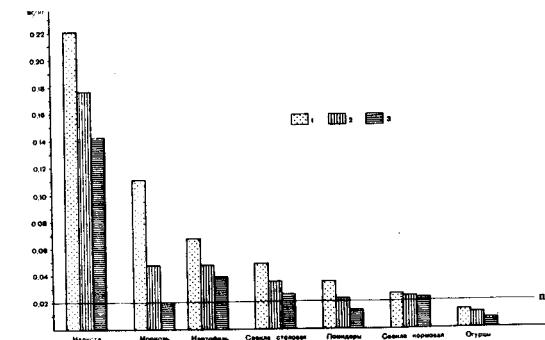
Таблица 71. Формы нахождения ртути в орошаемых почвах (горизонт 20–25 см)

Вал, мг/кг	Сульфатная		Оксидная		Элементарная		Прочносвязанная		Км
	мг/кг	% от вала	мг/кг	% от вала	мг/кг	% от вала	мг/кг	% от вала	
12	0,23	1,92	5,6	46,7	2,5	20,83	3,67	30,55	2,3

П р и м е ч а н и е. Км – коэффициент мобильности.

Применение глубокой вспашки, рыхление, как отмечалось, способствует постоянному поступлению обогащенных ртутью почвенных частиц из уплотненного горизонта в пахотный.

В табл.72 приведены данные о концентрации и интенсивности накопления ртути в основных видах сельскохозяйственной продукции, выращиваемой на загрязненных почвах поймы р.Нуры. Они убедительно свидетельствуют о значительном накоплении ртути в съедобных частях растений. Практически во всех видах фиксируются ее уровни, во много раз превышающие фон и стабильно превышающие установленные ПДК.



Р и с. 30. Ртуть в съедобной части сельскохозяйственных растений в зоне орошения загрязненными речными водами, мг/кг влажной массы.

1 – максимальные концентрации, 2 – средние, 3 – минимальные

Таблица 72. Ртуть в некоторых видах сельскохозяйственной продукции с участков, орошаемых загрязненными водами реки Нуры

Площадка, с/х культура	Среднее, мг/кг сухой массы	Пределы колебаний, мг/кг сухой массы	Коэффициент относительного фона	Коэффициент относительного уровня, рекомендованного ВОС	Среднее, мг/кг влажной массы	Пределы колебаний, мг/кг влажной массы	Превышение ПДК, в скобках - пределы колебаний
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
19. яблоки	0,24	0,08-0,7	24	4,8	0,03	0,01-0,09	3 (1-9)
20. морковь, семена	0,23	0,11-0,49	23	4,6	-	-	-
20. морковь, корнеплод	0,39	0,17-0,88	68	7,8	0,047	0,02-0,11	2,3 (1-5,3)
21. морковь, корнеплод	0,35	0,14-0,75	61	7	0,042	0,017-0,09	2,1 (0,9-4,5)
21. морковь, ботва	0,43	0,17-0,78	-	8,6	-	-	-
22. картофель, клубни	0,20	0,16-0,28	20	4	0,048	0,038-0,067	2,4 (1,9-3,4)
23. вишня, листья	0,74	0,35-1,2	74	14,8	-	-	-
24. огурцы, неочищенные плоды	0,21	0,12-0,26	-	4,2	0,011	0,006-0,013	0,6 (0,3-0,7)
26. капуста, листья	1,76	1,42-2,2	270	35,2	0,176	0,142-0,220	8,8 (7-11)
29. свекла кормовая, корнеплод	0,25	0,18-0,34	37	5	0,036	0,025-0,048	1,8 (1,3-2,4)
29. свекла кормовая, ботва	0,66	0,23-1,3	-	13,2	-	-	-
30. помидоры, плоды	0,26	0,16-0,42	84	5,2	0,021	0,013-0,034	1,1 (0,6-1,7)

П р и м е ч а н и е: в качестве фона приняты значения для соответствующих культур согласно обобщению

А.Кобата-Пендиас и Х.Пендиас [9]; ВОС допускает содержание ртути в сухом растительном продукте не более 0,05 мг/кг; ПДК в СССР: овощи - 0,02 мг/кг, фрукты - 0,01 мг/кг влажной массы; прочерк - данные отсутствуют.

Даже минимальные концентрации, наблюдаемые в растениях, в большинстве случаев также превышают уровень ПДК (рис.30). Наиболее контрастно накапливает ртуть капуста (от 7 до 11 ПДК), а наименее - плоды огурцов (от 0,3 до 0,7 ПДК). Очень высокие уровни содержания этого металла фиксируются в яблоках (1-9 ПДК). Значительное количество поллютанта может концентрироваться в несъедобных частях растений. Например, в ботве свеклы кормовой и столовой его содержания были соответственно примерно в 7 и 12 раз выше, нежели в корнеплодах. Это явно указывает на активное перемещение ртути в различных тканях растений и хорошо соотносится с известными литературными данными [9]. В частности, установлено, что ртуть перемещается у яблонь - из листьев в яблоки, у риса - из листьев в зерна, а у пшеницы и гороха - даже из посевного материала. С экотоксикологической точки зрения приведенные факты очень важны, поскольку конечной тканью, депонирующей ртуть, являются, как правило, съедобные части растений. Более того, увеличенные содержания ртути в ботве свеклы по сравнению с корнеплодами указывает на вероят-

Таблица 73. Накопление ртути в свекле столовой, выращиваемой на дачных участках

Исследуемая часть	Среднее, мг/кг сухой массы		Пределы колебаний, мг/кг сухой массы		Коэффициент относительного фона	
	I	II	I	II	I	II
Корнеплод	0,10	0,17	0,08-0,12	0,16-0,18	14,7	25
Ботва	1,25	2,00	1-1-1,4	1,8-2,1	125	200

Окончание табл.78

Исследуемая часть	Среднее, мг/кг влажной массы		Пределы колебаний мг/кг влажной массы		Превышение ПДК, среднее (пределы колебаний)	
	I	II	I	II	I	II
Корнеплод	0,014	0,024	0,011-0,017	0,022-0,025	0,7(0,5-0,9)	1,2(1,1-1,3)
Ботва	-	-	-	-	-	-

П р и м е ч а н и е. В качестве фона принято значение для корнеплодов 0,0068 мг/кг (Кобата-Пендиас, Пендиас, 1989), для ботвы - 0,01 мг/кг - среднее в с/х продукции (Глазовский, 1982); 1 - участок, поливаемый 2 года (в почве содержится в среднем 0,18 мг/кг ртути); 2 - участок, поливаемый 12 лет (в почве содержится в среднем 0,45 мг/кг ртути).

ность еще более высокого ее концентрирования в съедобных частях этого растения.

При экстремально высоких запасах ртути в агропочвах поймы р.Нуры трудно установить какую-либо зависимость интенсивности ее концентрирования в растениях от уровня содержания в почвах. По-видимому, значительные массы этого металла, присутствующие в почвах, обеспечивают вероятность чрезвычайно высокого накопления ртути в различных частях растений. Результаты по дачным участкам свидетельствуют о зависимости степени накопления ртути растениями от ее содержаний в почвах (табл.73).

Очень интенсивно ртуть концентрируется также и в различных видах кормовых культур (табл.74), причем во всех случаях ее уровни заметно превышали как фоновые содержания, так и рекомендованный максимально допустимый уровень в кормах для сельскохозяйственных растений. Таким образом, существует явная возможность попадания ртути в организм животных и, соответственно, в продукты животноводства.

Итак, длительное, продолжающееся и сейчас использование загрязненных речных вод для орошения обусловило чрезвычайно сильное загрязнение ртутью пригородных, прежде всего пойменных, ландшафтов на достаточно значительной площасти. Это приводит к чрезвычайно важным экологическим и санитарно-гигиеническим последствиям.

Во-первых, мы являемся свидетелями формирования своеобразного типа агроирригационных "ртутных" ландшафтов, специфической особенностью которых является чрезвычайно высокая концентрация очень токсичной ртути в основных их компонентах - атмосфере, почвах, водах, биоте. Это приводит к формированию качественно нового биогеохимического облика этих ландшафтов, к резкому изменению их внутренней структуры и направления геохимических и биологических процессов. Естественно, в данном случае происходят и многие другие изменения, характерные для ландшафтов орошаемого земледелия [12]. Некоторые из них были отмечены выше. Имеющиеся у нас данные свидетельствуют также о поступлении в пойменные орошаемые ландшафты целого ряда других химических элементов и соединений; в том числе высокотоксичных. Однако доминирующее значение, определяющее геохимический облик исследованных территорий, имеет чрезвычайно высокое поступление в них ртути.

Во-вторых, в настоящее время в пределах агроирригационных "ртутных" ландшафтов производится сельскохозяйственная продукция, не отвечающая по своим экологическим и гигиеническим параметрам

Таблица 74. Ртуть в некоторых кормовых растениях с участков полей, орошаемых загрязненными водами р.Нуры

Площадка, растения	Среднее, МГ/КГ сухой массы	Пределы колебаний, МГ/КГ сухой массы	Кс относительно фона (в скобках - пределы колебаний)	Кс относительно временного максимума допустимого уровня в кормах для сельскохозяйственных животных
27, овес кормовой, укос	0,57	0,20-0,89	57 (20-89)	5,7 (2-8,9)
28, ячмень, укос	0,43	0,30-0,59	7,4 (5,2-10,2)	4,3 (3-5,9)
28 а, травы кормовые, укос	0,65	0,24-1,10	11,2 (4,1-19)	6,5 (2,4-11)
26, кукуруза на сilage, укос	0,65	0,43-0,76	11,2 (7,4-13,1)	6,5 (4,3-7,6)

Причины и е. Фон для люцерны - 0,039 мг/кг [9]; для остальных видов в качестве фона принято среднее содержание ртути в природной растительности по данным В.В.Брмакова и др., равное 0,058 мг/кг (1991); временный максимум допустимый уровень ртути в кормах - 0,1 мг/кг.

существующим требованиям. Это не исключает вероятность активного включения высокотоксичной ртути в пищевую цепь и представляет реальную угрозу для человека.

В-третьих, известно, что урожайность картофеля и овощных культур в хозяйствах, расположенных на пойме р.Нуры ниже г.Темиртау, в последние годы заметно ниже (в среднем в 1,5 раза), чем в соседних районах, где территории орошается незагрязненными водами. Имеются утверждения о том, что это "связано с некоторым влиянием ухудшения метеорологических условий и ... с активным вовлечением в сельскохозяйственный оборот новых орошаемых земель, отсутствием опыта и квалифицированных кадров поливальщиков на вновь осваиваемых землях" [8]. Однако логичнее предположить, что это в большей степени связано с негативным воздействием ртутного загрязнения. Хорошо известно, что ртуть нарушает в растениях различные метаболические процессы (тормозит фотосинтез, ингибирует поглощение питательных веществ и т.п.), приводит к задержке роста растений и развития корней и, как следствие, к снижению урожайности.

В-четвертых, на орошаемых угодьях создается и прямая опасность для сельскохозяйственных рабочих, прежде всего вследствие высоких концентраций паров ртути в приземном слое атмосферного воздуха. Кроме того, не исключена возможность переноса ртути с частичками почвы на обувь и одежду рабочих в жилые помещения.

2. Ртуть в пригородных ландшафтах в связи с воздействием отходов и выбросов

Многочисленные данные свидетельствуют о присутствии в повышенных концентрациях ртути во многих видах отходов, образующихся в пределах города [2,6,50]. Вывоз и складирование отходов в пределах лесопарковых зон городов создает заметную нагрузку на их окружающую среду. Как правило, захороненные отходы находятся в зоне окисления, что способствует рассеиванию ртути и других поллютантов в различных природных средах. В поверхностном стоке с территорий свалок, отвалов, терриконов, в донных отложениях водотоков и водоемов, дренирующих места складирования и захоронения отходов, в грунтовых водах и атмосферном воздухе, в почвах в окрестностях свалок постоянно фиксируются повышенные содержания ртути.

В последние годы отмечается рост использования бытовых и промышленных отходов в качестве удобрений и мелиорантов. Это связано как с довольно высокой удоборительной ценностью многих из них, так

и с желанием утилизировать их. Масштабы применения отходов в сельском хозяйстве не так велики, однако экологическая оценка значимости этого явления достаточно важна, поскольку практически во всех видах используемых отходов содержатся значимые, порою очень высокие концентрации тех или иных поллютантов. Так, в нашей стране ежегодно образуется порядка 5-6 млн.т осадков городских сточных вод. Большая часть их захороняется на свалках, идет в отвалы и т.п. Около 10% осадков перерабатывается и используется как удобрение в сельском хозяйстве. Естественно, что как в первом, так и во втором случае содержащиеся в них загрязняющие вещества попадают в окружающую среду, поскольку в большинстве своем эти осадки очень сильно загрязнены многими химическими элементами [6]. Уровни содержания ртути в осадках промышленных городов могут многократно превышать кларковые значения (табл.25). Как видим, выделяется по крайней мере три группы городов: малопромышленные города с содержанием ртути в осадках сточных вод примерно до 1 мг/кг; промышленные города - 1-10 мг/кг, и "ртутные" города (в данном случае г.Клин, производство термометров) с чрезвычайно высоким содержанием ртути в осадках сточных вод. Специальные исследования показали, что при внесении в почву осадков сточных вод промышленных городов в ней по сравнению с контролем в 13-250 раз увеличивалось содержание ртути [6], что не исключает вероятности ее попадания в пищевую цепь.

Одним из способов утилизации бытовых отходов является производство из них компостных удобрений, которые могут включать ртуть в содержаниях 2-7,5 мг/кг, т.е. в сотни раз выше кларка [6]. В почвах хозяйств, использующих компосты, накапливалось в среднем в 10-75 раз больше ртути, нежели ее содержалось в фоновых почвах, причем особенно интенсивно ртуть концентрировалась в случае применения компоста как биотоплива в теплицах.

Промышленные отходы (фосфогипс, шлаки металлургии, зола угольных электростанций, отходы целлюлозо-бумажных комбинатов, фосфорных и ряда других производств) применяются в сельском хозяйстве пока в незначительном масштабе. Имеющиеся единичные данные свидетельствуют о том, что во многих из этих отходов также концентрируется ртуть.

Техногенные геохимические преобразования пригородных зон и их загрязнение ртутью могут быть связаны с воздействием промышленных выбросов в атмосферу и выпадений на поверхность почв и растений. Как отмечалось выше, в зоне влияния крупных источников ртути в наземных экосистемах формируются значительные по площади поля рассеивания этого металла - до 30-70 км и более в радиусе. В общем

Таблица 75. Ртуть в осадках городских сточных вод
(по данным А.И.Ачкасова)

Город	Среднее, мг/кг	Коэффициент концентрации относительно клярка	Город	Среднее, мг/кг	Коэффициент концентрации относительно клярка
Москва	1,3-1,8	16-22	Подольск	0,2	2,4
Раменское	0,03	0,4	Наро-Фоминск	0,1	1,2
Бронницы	0,8	9,6	Воскресенск	0,3	3,6
Апрелевка	3,6	44	Сергиев Посад	2,8	34
Коломна	10	120	Истра	0,1	1,2
Электросталь	0,1	1,2	Клин	220	2650
Павлов	0,2	2,4	Домодедово	0,2	2,4
Посад			Зарайск	0,4	4,8
Шатура	0,2	2,4	Саранск ^I	4	48
Серпухов	0,4	4,8			
Орехово-Зуево	2,4	29			

I Собственные данные.

случае это приводит к сравнительно незначительному увеличению содержаний ртути в различных компонентах экосистем. Однако в отдельных случаях могут фиксироваться достаточно контрастные аномалии в почвах и растениях. В частности, в окрестностях г. Темиртау в пределах многих рекреационных зон и на пастбищах, удаленных от города на 6-10 км, уровни содержания ртути в почвах достигали 0,3-0,7 мг/кг, что в десятки раз выше фона. Это привело к контрастному наложению ртути в яблоках (до II ПДК) в ряде мест. Кроме того, повышенные содержания ртути в почвах и растениях пастбищ могут способствовать ее поступлению в организм сельскохозяйственных животных.

Таким образом, преобразования окружающей среды, вызванные разнообразными причинами, приводят к формированию в пределах природных ландшафтов экологически опасных техногенных аномалий ртути. В отдельных случаях интенсивность загрязнения может достигать экстремальных значений и представлять реальную угрозу населению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ртуть обладает уникальными экогеохимическими и экотоксикологическими свойствами, обусловленных ее вездесущностью, разнообразием форм нахождения и спецификой их трансформации в природных условиях, высокой геохимической подвижностью и повышенной возможностью биопереноса в окружающей среде, а также широким и разносторонним спектром негативных воздействий на живые организмы.

Распределение ртути и ее соединений в окружающей среде связано с деятельностью широкой группы природных и техногенных источников. Существующий глобальный круговорот ртути в большей степени определяется ее поступлением из природных источников. Техногенные источники являются наиболее важными с позиций локального загрязнения ландшафтов. В последние десятилетия интенсивность поставки ртути в окружающую среду техногенными источниками заметно возрастает. Это связано не только с ее потерями при добычи, производстве и использовании в различных областях промышленности. Ртуть является типоморфным элементом практически любых техногенных геохимических аномалий, формирующихся в антропогенных ландшафтах, поскольку поступает в окружающую среду с выбросами, стоками и отходами самых разнообразных производств. Типоморфность ртути особенно ярко проявляется в условиях промышленных городов. Практически все города характеризуются присутствием аномальных количеств ртути в различных компонентах окружающей среды. При этом, в случае наличия специфического ("ртутного") источника поступления этого металла в атмосфере и наземных экосистемах города формируются его контрастные аномалии и значительные по площади ореолы рассеяния, отличающиеся разнообразием пространственной структуры и всецело определяющих качество городской среды. Образование ореолов рассеяния ртути в депонирующих средах в условиях промышленного города во многом связано с ее поступлением в составе пылевых выбросов. Сложные цепи миграции этого поллютанта, формирующиеся в связи с распределением в городах самых различных отходов, в итоге неизбежно приводят к его поступлению в организм человека. В промышленных городах существуют многочисленные группы населения, постоянно испытывающие воздействие ртути.

Принципиально важным является тот факт, что производственная деятельность обуславливает поступление значительных коли-

честв ртути не только в атмосферу и наземные экосистемы, но и в водные объекты. Это приводит к формированию в последних контрастных и протяженных техногенных потоков рассеяния ртути и ее соединений во всех компонентах водной среды. В условиях загрязнения особенности распределения и поведения ртути в водной массе определяются сложным взаимодействием техногенных и природных факторов, что находит отражение не только в росте ее общих концентраций, но и в принципиально ином как количественном, так и качественном соотношении основных форм миграции. При общем преобладании растворенных форм фиксируется резкое возрастание доли взвешенных форм миграции, играющих ведущую роль в формировании техногенных потоков рассеяния ртути в донных отложениях, прежде всего в техногенных илах. Имеющиеся материалы позволяют рассматривать техногенные илы как новый генетический тип современных аллювиальных отложений, формирование которых обусловлено интенсификацией процессов антропогенного литогенеза. Потоки рассеяния ртути в техногенных илах характеризуются значительными размерами и высокими ее концентрациями. По контрастности аномалий и характеру изменений концентраций и форм нахождений в строении потоков четко проявляется связь с особенностями размещения источников загрязнения, их мощности и специфики, планировочной структурой городов, а также с литогеоморфологическим строением русла и долины и гидродинамическими параметрами водотоков. Все это в совокупности с существующей в реках естественной дифференциацией и накоплением речного материала приводит к ярко выраженной неоднородности техногенных аномалий в русле водотоков. В критических ситуациях интенсивность концентрирования ртути в илах настолько велика, что это всецело может определять геохимический облик и экологию водной системы в течение длительного периода времени и полностью исключить водный объект из любого хозяйственного использования. Концентрации ртути могут достигать таких уровней, что становится возможным ее вторичное извлечение из илов, т.е. техногенные илы могут рассматриваться как своеобразный тип осадочных (техногенных) месторождений.

Имеющиеся материалы свидетельствуют об интенсивном поглощении ртути всеми видами гидробионтов, особенно растениями. Это указывает на их участие в трансформации и круговороте ртути в водных системах, а также на их активную роль во включении этого поллютанта в пищевые цепи. В свою очередь, после отмирания растения могут являться источником вторичного загрязнения воды ртутью и оказывать заметное влияние на химический состав донных отложений.

Водоемы (озера и водохранилища) в условиях техногенного воздействия являются своеобразными "аккумуляторами" поступающей в окружающую среду ртути, одновременно во многом определяя качество вод нижележащих участков речной сети. Специфика биогеохимического круговорота ртути в условиях замедленного водообмена может создать условия, представляющие реальную угрозу для человека (в результате синтеза органических соединений ртути и их быстрого и активного включения в водные пищевые цепи).

Чрезвычайно интенсивное загрязнение поверхностных водных систем и пойменных ландшафтов приводит к проникновению ртути в грунтовые и подземные воды, использующиеся для питьевого водоснабжения.

Ртуть, "продуцируемая" городом, активно рассеивается в пригородных ландшафтах, прежде всего на сельскохозяйственных территориях. Использование загрязненных речных вод для орошения приводит к чрезвычайно сильному загрязнению пойменных земель. В экстремальных ситуациях могут формироваться своеобразные "ртутные" агроирригационные ландшафты, спецификой которых является чрезвычайно высокие содержания очень токсичной ртути во всех компонентах окружающей среды.

Рост урбанизации, являющийся характерной чертой современности, сопровождается возникновением целого ряда проблем глобальной значимости. Одним из важнейших компонентов сложных городских проблем является загрязнение окружающей среды токсичными веществами. От своевременности, эффективности и оправданности решения данной проблемы во многом зависит дальнейшее развитие городов и, соответственно, благосостояние населения. Интенсивность загрязнения окружающей среды ртутью может быть настолько велика, что приводит к катастрофическим последствиям. События в Японии в районе залива Минамата и в Ниигате - самое страшное и хотелось бы надеяться что последнее предупреждение человечеству в связи с загрязнением природной среды ртутью. Однако, к сожалению, полученные нами данные (по бассейну реки Нуры) указывают на вероятность существования целого ряда мест, в которых состояние окружающей среды, обусловленное воздействием ртути, достигло своего критического положения. Необходима разработка и осуществление специальных программ на национальном и глобальном уровнях, направленных прежде всего на предупреждение, а также на выявление, оценку и ликвидацию последствий загрязнения окружающей среды ртутью.

Л и т е р а т у р а

1. Авессаломова И.А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1987.
2. Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976.
3. Боброва Л.В., Кондрашова О.В., Федорчук Н.В. Экономика геологоразведочных работ на ртуть, сурьму и висмут. М.: Недра, 1990.
4. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV группы. Л.: Химия, 1988.
5. Всесоюзный симпозиум "Ртуть в реках и водоемах" (Тезисы докладов). Новосибирск, 1990.
6. Геохимия окружающей среды. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. М.: Недра, 1990.
7. Герлах С.А. Загрязнение морей. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
8. Грин Г.Б., Демин А.П., Федоров Б.Г. Канал Иртыш-Караганда. М.: Наука, 1987.
9. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989.
10. Костюковский В.И. Динамика ландшафтов Центрального Казахстана при водохозяйственном освоении. М.: Наука, 1988.
11. Котлов Ф.В. Антропогенные геологические процессы и явления на территории города. М.: Наука, 1977.
12. Куракова Л.И. Антропогенные ландшафты. М.: Изд-во Московского ун-та, 1976.
13. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
14. Металлогенез и геохимия угленосных и сланцеводержащих толщ СССР. Клер В.Р., Ненахова В.Ф., Сапрыкин Ф.Я. и др. М.: Наука, 1988.
15. Металлы. Гигиенические аспекты оценки и оздоровления окружающей среды. М.: НИИГПЗ, 1983.
16. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. Авицын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А. и др. М.: Медицина, 1991.
17. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. М.: Минздрав СССР, 1987.
18. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. М.: Медицина, 1985.
19. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987.
20. Мусина Б.А. Санитарный режим р.Нуры в связи с загрязнением

ее промышленными сточными водами. Состояние и задачи охраны природы Центрального Казахстана. Караганда, 1966.

21. Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование. М.:Наука, 1986.
22. Охманович В.Ф. Водные ресурсы Карагандинско-Темиртауской агломерации и их использование. Вопросы географии Казахстана, вып. 14, 1968.
23. Разенкова Н.И., Самойлова Ю.С. Ртуть в зоне окисления. М.: Недра, 1975.
24. Ртуть. Критерии санитарно-гигиенического состояния окружающей среды. Женева: изд. ВОЗ, 1979.
25. Руководство по контролю качества питьевой воды, том.2. Женева: изд. ВОЗ, 1987.
26. Сауков А.А. Геохимия. М.: Наука, 1975.
27. Свойства элементов: справочник. М.: Металлургия, 1986.
28. Справочник по профессиональной патологии. М.:Медицина,1981.
29. Федорчук В.П., Минцер Э.Ф. Геологический справочник по ртути, сурье, висмуту. М.: Недра, 1990.
30. Фортескоу Дж. Геохимия окружающей среды. М.:Прогресс,1985.
31. Химия окружающей среды. М.: Химия, 1982.
32. Шанцер Е.В. Некоторые общие вопросы учения о генетических типах отложений. Труды ГИН АН СССР, вып. 350. М.: Наука, 1980.
33. Adriano D.C. Metals in the Terrestrial Environment. -Springer.Verlag: Berlin etc., 1984.
34. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements. - Acad.Press Inc., London, 1979.
35. Cammarota V.A. Mercury // Mineral facts and problems. Bureau of Mines, Washington, D.C., 1975.
36. Changing Metals Cycles and Human Health (ed.J.O.Nriagu). - Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer-Verlag, 1984.
37. D'Itri F.M. The environmental mercury problem. -CRC Press, 1972.
38. Ferrara R. et al. Mercury levels in Rain and Air and the Subsequent Washout Mechanism in a Central Italian Region // Atmospheric Environm., 1986, 20, N 1.
39. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic Environment. - Springer-Verlag, Berlin etc., 1979.
40. Lodenius M., Tulisala E. Environmental Mercury Contamination Around a Chlor. Alkali Plant. - Bull. environm. Contam. Toxicol., 1984, 32, N 4.

41. Marshall E. The "Lost" Mercury at Oak Ridge // Science, 1983, 222, N 4606.
42. Mercury contamination in man and his environment. - Vienna, 1972.
43. Pohl K.D., Esser R. Quecksilver in Hausmull und Klarschlamm. // Umweltmagazin, 1986, 16, N 4.
44. Saha J.G., McKinlay K.S. Use of Mercury in Agriculture and its Relationship to Environmental Pollution // Anal. aspects mercury and other heavy metals Environ., 1975.
45. Salomons W., Förstner V. Metals in the Hydrocycle. - Springer-Verlag, Berlin etc., 1984.
46. Siegel S.M., Siegel B.Z. First estimate of annual mercury flux of the Kilanea main vent. // Nature, 1984, 309, N 5964.
47. Suckcharoen S., Lodentus M. Reduction of mercury pollution in the vicinity of a caustic soda plant in Thailand. // Water, Air and Soil Pollution, 1980, 13, N 2.
48. Suzuki T. et al Elemental contamination on Japanese women's hair from historical samples. - Sci., Total Environ., 1984, 39, N 1-2.
49. Umweltverschmutzung durch Zahnnarztpraxen. - VDI-Nachr., 1985, 39, N 34.
50. Watson Jr.W.D. Economic Considerations in controlling mercury pollution // The biogeochemistry of mercury in the environment. - Amsterdam, 1979.

О ГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	8
Г л а в а 1. ПРОИЗВОДСТВО, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПОСТУПЛЕНИЕ РТУТИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	7
1. Краткая характеристика основных свойств ртути	7
2. Распространенность ртути в окружающей среде ...	10
3. Производство и использование ртути	20
4. Поступление ртути в окружающую среду	28
Г л а в а 2. РТУТЬ В АТМОСФЕРЕ И НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ГОРОДА	89
1. Техногенные аномалии и ореолы рассеяния ртути	89
2. Гигиенические аспекты загрязнения городской среды ртутью	59
Г л а в а 3. РТУТЬ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ ГОРДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ	64
1. Особенности поступления и распределения ртути в водах рек урбанизированных районов	67
2. Ртуть в техногенных илах	81
Литохимические особенности техногенных илов	84
Потоки рассеяния ртути в техногенных илах	92
Геохимические особенности накопления и формы нахождения ртути в техногенных илах	115
3. Фитогеохимическая индикация загрязнения водотоков ртутью	181
4. Ртуть в водоемах	185
Г л а в а 4. РТУТЬ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ПРИГОРОДНЫХ ЗОН	144
1. Ртуть в орошаемых агроландшафтах	144
2. Ртуть в пригородных ландшафтах в связи с воздействием отходов и выбросов	160
З а к л ю ч е н и е	168
Л и т е р а т у р а	166

Замеченные опечатки

# стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
27	8 св.	дегазации	дегазация
36	2 св.	может	могут
45	1 сн.	Указанные экст-	Указанные экстремальные
			содержания при расчете
			средних значений не учи-
			тывались, однако....
49	16 св.	СЗЗ	СЗЗ (санитарно-защитная
			зона)
71	14 сн.	превышает	превышают
92	3 св.	в воде	в виде
129	1 сн.	природной	придонной
131	15 св.	стабильность	способность

Е.П. Янин
РУТЬ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

Утверждено к печати Институтом минералогии,
геохимии и кристаллохимии редких элементов

Редакторы: Т.И.Нефелова, Е.А.Третяк. Автор обложки: С.К.Уоков

Подписано к печати 20 июля 1992 г.
Уч.-изд.л. 10,5. формат 60x90 I/16. Тираж 300.
Цена договорная. Заказ 10-92.

Ротапринт ИМГРЭ

41