

## ГИДРОГЕОХИМИЯ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ

В.А. Кирюхин, Л.П. Норова

Санкт-Петербургский государственный горный университет  
E-mail: LarisaNorova@rambler.ru

*Рассмотрены основные предпосылки и сложившаяся ситуация загрязнения различных природных сред, таких как атмосфера, зона аэрации, грунтовые воды и другие, имеющих огромное влияние на здоровье и нормальную жизнедеятельность населения больших мегаполисов. Проведен обзор и анализ гидрогеохимии природных сред, позволяющий провести типизацию гидрогеохимических обстановок городов.*

### **Ключевые слова:**

*Загрязнение, природные среды, атмосфера, поверхностный сток, зона аэрации, грунтовые воды, биогенная обстановка.*

### **Key words:**

*Pollution, natural environment, atmosphere, surface flow, aeration zone, ground waters, biogenic conditions.*

Люди для того, чтобы полнее пользоваться плодами цивилизации, объединяются, концентрируются, строят города, отвоёвывая у природы многие тысячи квадратных километров. Большинство городов увеличивают свою территорию каждые 5 лет на 10...20 % за счет примыкающих земель, превращая их в селитебные. Прогнозы демографов не утешительные. В ближайшие несколько сотен лет площадь городов будет составлять примерно 1/3 суши. Уже сейчас многие мегаполисы (а их число приближается к 100) занимают территории более 1000...3000 км<sup>2</sup>.

Население многих из них достигает 10–25 млн человек, а по прогнозу тех же демографов уже через 100 лет население наиболее крупных мегаполисов может насчитывать 100–150 млн. чел. Уже в настоящее время город представляет собой своеобразный остров с наложенными техногенными полями: электромагнитным, радиоактивным, тепловым, вибрационным, акустическим, гравитационным и др. Более 50...60 % территории городов занимают жилые кварталы, промышленные зоны, дорожные сети и другие инженерные сооружения. Соотношение деградированных и обладающих средовосстанавливающими функциями территорий городов явно устанавливается в пользу первых. Мало того, геофизические и геохимические аномалии распространены не только в пределах города, но и уходят далеко за его пределы. Так, например, атмосферное загрязнение на восток от г. Москвы распространяется на 70...100 км. Депрессионные воронки от забора артезианских вод имеют радиус 100...200 км. Тепловое загрязнение, нарушение режима выпадения осадков наблюдается на расстоянии 90...100 км, а угнетение лесных массивов — на 30...40 км [1].

Плотность населения в городах весьма велика. Она варьирует, например, от 0,62 тыс. чел. на км<sup>2</sup> в Пекине до 8,4 тыс. чел. на км<sup>2</sup> в Москве. Жизнедеятельность каждого жителя города сопровождается образованием как твердых бытовых отходов от 100 до 400 кг в год, так и жидких стоков объемом десятки м<sup>3</sup> в год [2]. Мусор и жидкие стоки отводятся, преимущественно, за пределы города

— на мусороперерабатывающие предприятия, свалки, отстойники и очистные сооружения, соответственно. Это означает, что территория загрязнения, связанная с городскими агломерациями, значительно больше той территории, которую занимает сам город.

Вместе с тем, всем понятно, что очистить город от загрязнения невозможно, поскольку он функционирует и изначально обречен на создание определенного уровня загрязнения окружающей среды по сравнению с естественным фоновым. В этом активно участвуют не только население, но и промышленные предприятия, тепловые электростанции, автотранспорт и многие другие передвижные и стационарные источники загрязнения.

Техногенное воздействие ощущается во всех средах, с которыми соприкасается город: атмосфере, наземной гидросфере, а также в верхних частях литосферы, биосферы и подземной гидросферы.

**Атмосфера.** Формирование химического состава подземных вод в условиях города начинается в атмосфере. Над городом постоянно висит облако пыли, дыма, аэрозолей и взвесей, которые являются ядрами конденсации для выпадающих атмосферных осадков. Вместе с атмосферными водами на квадратный километр городской территории выпадает до 400 т загрязняющих веществ в год. Их происхождение весьма разнообразно. В дыхании города принимают участие люди, промышленные предприятия, энергетические установки, транспорт. Сложный характер носит движение воздушных масс в городе. Поэтому химический состав загрязняющих веществ весьма разнообразен. Он является многокомпонентным, часть из которых оказываются вредными. Содержание некоторых из них в десятки, иногда в сотни раз превышает ПДК. Учитывая, что количество выбросов в атмосферу увеличивается каждые 10 лет вдвое, следует ожидать дальнейшего ухудшения состояния атмосферы над городами.

В городской атмосфере часто накапливаются летучие оксиды (серы, азота, углерода), являющиеся продуктами горения органических соединений. Растворение этих оксидов приводит к появлению

серной, азотной и др. кислот и снижению величины рН до 4, а в некоторых случаях даже до 2, т. е. возникают кислотные дожди. Зона распространения загрязненных атмосферных осадков обуславливается характером гидрометеорологических процессов, достигая размеров порядка сотен километров [3]. Кислотные дожди разрушительно действуют на растительность, флору и фауну поверхностных вод, инженерные сооружения, увеличивает кислотность почв и грунтовых вод.

Агрессивное воздействие кислотных осадков может снизить буферная карбонатная система. В гумидных условиях концентрация  $\text{HCO}_3^-$  не превышает нескольких десятков мг/л в озерных, речных, почвенных и грунтовых водах. Этого количества гидрокарбонат-иона не достаточно для нейтрализации кислых вод атмосферного генезиса. Поэтому при контакте с ними поверхностные и подземные воды теряют некоторое количество иона  $\text{HCO}_3^-$  и заметно снижают величину рН. В аридной зоне концентрация гидрокарбонат-иона в поверхностных и подземных водах достигает сотен мг/л. Этого количества достаточно для нейтрализации кислых атмосферных вод [4].

Важную роль в формировании поверхностного загрязнения почв и грунтовых вод играет снежный покров, который является аккумулятором выпадающих из атмосферы веществ. Поэтому наибольшим загрязнением отличаются талые снеговые воды, которые концентрируют различные химические соединения, выпадающие в зимний период, и химические реагенты, используемые для борьбы с гололедом.

Наиболее близкие к природным условия формирования подземных вод наблюдаются на участках в пределах крупных зеленых массивов (парки, сады, сельскохозяйственные земли и др.), но доля этих площадей в пределах города обычно не велика (около 10...15 %). Кроме того, на этих площадях в той или иной мере сказывается техногенное влияние города – его дыхание, кислые дожди. Атмосферные осадки, промывая дымную пылевую пелену, висящую над городом, делают на некоторое время небо чистым и прозрачным. Они захватывают до 90 % веществ, загрязняющих атмосферу, и, в зависимости от интенсивности коммунально-промышленных выбросов, могут иметь минерализацию больше фона окружающей местности (десятки и сотни мг/л). Их состав, преимущественно, гидрокарбонатно-сульфатный или сульфатно-гидрокарбонатный. В Санкт-Петербурге, например, минерализация грунтовых вод на этих участках несколько повышена – 0,3...0,5 г/л при ведущей роли сульфатной составляющей. Фоновая минерализация грунтовых вод за пределами города значительно меньше – 0,1...0,3 г/л при гидрокарбонатно-магниево-кальциевом составе.

**Поверхностный сток.** Большинство городских агломераций располагаются по берегам рек, озер и водохранилищ, которые испытывают от своих соседей значительную техногенную нагрузку. Вме-

сте с тем, эти воды нередко после очистки используются для водоснабжения (Москва, Санкт-Петербург, Ростов, Челябинск и др.). Чаще всего поверхностные воды загрязнены нефтепродуктами.

Реки служат естественными дренами водоносных систем города. В тоже время значительные территории городов могут затопляться в периоды весенних паводков. Так, например, весной 2010 г. вышли из берегов река Висла в районе Варшавы, река Лена в районе г. Якутска и во многих других регионах. Ущерб от наводнения весной 2010 г. в Китае оценивается в 2 млрд USD.

Подъем уровня воды в реках происходит не только в результате весенних и летних дождевых паводков, но и также в результате сгонно-нагонных явлений, как это наблюдается на р. Неве. В результате образуются довольно обширные зоны подпора грунтовых вод, подтопление жилых зданий и других сооружений. Соответственно, эти явления сказываются и на изменении режима подземных вод и их химического состава.

Увеличение скорости движения и напора вод во время речных паводков имеет и положительное значение, поскольку в это время мощный водный поток смывает загрязненные донные отложения, накопившиеся в меженный период.

**Зона аэрации.** Особых подходов в пределах городских агломераций заслуживает зона аэрации. Разрез зоны аэрации имеет весьма сложное строение:

- сверху он перекрыт асфальтом, фундаментами различных сооружений, инженерными коммуникациями; лишь 10...15 % территории городов свободны от такой крыши и находятся в садово-парковой зоне или пригородной полосе; по этой причине зона аэрации выполняет свою естественную буферную роль лишь на небольшой части территории мегаполиса, где колебания уровня грунтовых вод имеют сезонный характер; в остальных местах атмосферное питание затруднено;
- верхнюю часть зоны аэрации слагают искусственные грунты, их мощность в среднем равна нескольким метрам, а в некоторых случаях может достигать 20...25 и более м (чем древнее город, тем больше изменений вносит история в рельеф и покровные отложения);
- в естественном разрезе зоны аэрации могут быть встречены породы различного состава, состояния свойств и возраста; например, на территории Санкт-Петербурга это могут быть торф, литориновые песчано-глинистые отложения, обогащенные органикой, озерно-ледниковые пески, супеси, суглинки; на территории Москвы – закарстованные известняки карбона; Якутска – многолетнемерзлые породы и др.;
- подземное пространство города содержит многочисленные коммуникации, обеспечивающие подачу воды, газа, электроэнергию, работу систем связи, отвод коммунальных и промышленных стоков и др.; под городом находится еще один город – подземный; Е.Ю. Куликова [5] приводит такой

пример, что если вытянуть все подземные коммуникации и водостоки подземного пространства, например, Москвы в одну линию, то ими можно будет опоясать земной шар дважды [2];

- отсутствие на преобладающей части территории города прямой связи подземной и наземной гидросферы создает ниже поверхности земли преимущественно восстановительную обстановку;
- проникновение атмосферных осадков через почвенный слой может происходить на очень ограниченном пространстве (сады, парки, уличные газоны); гораздо больше в зону аэрации проникает канализационных стоков, потерей из водоводной сети, через другие источники техногенного питания (на участках свалок, через люки, дюкеры, подземные выработки и др.); это нередко приводит к образованию куполов подпора, предопределяющих значительную дифференциацию абсолютных отметок уровня грунтовых вод, подтоплению зданий и сооружений, интенсификации перетекания и разгрузки подземных вод.

Особо следует обратить внимание на то, что почвы являются индикаторами промышленного загрязнения территории. Состав и интенсивность загрязнения почв определяется характером промышленного производства. Так, например, тяжелые металлы накапливаются в почвах вблизи предприятий, занимающихся металлообработкой, машиностроением, радио- и электротехническим производством. Свинец, олово, кадмий сбрасывают в почву полиграфическое производство. Предприятия энергетического профиля накапливают в почвах ванадий, никель, молибден. Богатый спектр элементов наблюдается на участках отстойников гальванического производства и на полях фильтрации бытовых и коммунальных стоков.

**Биогенная обстановка.** Концентрирование людей в одном месте и их проживание в городах могут иметь как положительные, так и отрицательные последствия. Экологическое зонирование городов и отдельных их районов показывает, что техногенная нагрузка распределена неравномерно. Ее воздействие на качество воды и воздуха сказывается неодинаково. В одних местах это проявляется в образовании геопатогенных зон, в других местах — на уменьшении продолжительности жизни и возникновении определенных заболеваний людей, в третьих местах — в создании дискомфортных условий проживания. Все живое приспосабливается к городской жизни, но испытывает при этом определенные трудности. Это особенно наглядно видно на примере растительности.

Наибольшую активность проявляют микроорганизмы как в наземных, так и подземных условиях. В наземной среде образуются различные виды вирусов и бактерий, часто обладающие болезнетворными свойствами. В подземной среде микроорганизмы активно участвуют в геохимических процессах. Микроорганизмы способны разрушать

главные породообразующие минералы — силикаты, алюмосиликаты и карбонаты. В этих процессах участвуют не только бактерии, но и грибы, микроводоросли, дрожжи. Продуктами их деятельности являются органические кислоты, щелочи, окислители. Разложение сульфидов дает свободную серную кислоту. Процесс нитрификации способствует образованию свободной азотной кислоты. Органические кислоты реагируют с определенными химическими элементами, входящими в состав минералов, что приводит к их разрушению и образованию в растворе комплексных соединений. Сероводород, образующийся при процессах брожения, разлагает алюмосиликаты и растворяет трехвалентное железо. Вынос вещества при микробиологическом выветривании оказывается в 2...3 раза больше, чем при тех же процессах без участия микроорганизмов. Микробиологическое выветривание карбонатных пород приводит к образованию карста.

Весьма широкое распространение получили микробиологические процессы, приводящие к трансформации минералов и новообразованиям. Больше всего они связаны с накоплением кальция и карбонатов, сульфидов, глинозема, бокситов, серы, гипсов, соединений железа и других минеральных образований. Особенно глубоко микроорганизмы преобразуют органическое вещество. С их помощью проходят процессы его гумификации и консервации. Сотни лет необходимы для образования почвенного покрова, разложения органических остатков и их гумификации. При неполном разложении органического вещества в восстановительных условиях и кислой среде происходит образование торфа и углей. Таким образом, природа обеспечивает консервацию солнечной энергии, которая была получена растительностью до ее превращения в полезное ископаемое.

Деятельность микроорганизмов сопряжена с выделением и потреблением газов. При биогенном разрушении органических веществ, карбонатов, сульфатов, сульфидов и других минералов образуются  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , летучие органические вещества и другие газы. Газовая фаза потребляется микроорганизмами при деструкции азотных соединений, при окислении  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{SO}_2$ .

Рассмотрим указанные процессы на примере Санкт-Петербурга [5]. Активизации генерации газов здесь способствует наличие в разрезе погребенных торфов, литориновых и микулинских глин, обогащенных органикой, бытовых и промышленных отходов, древних захоронений и др. К этому надо добавить инфильтрацию кислых атмосферных осадков, просачивание с поверхности земли агрессивных вод различного происхождения, проникновение канализационных стоков. Особенно высокая степень газонасыщенности грунтов наблюдается в верхней части разреза четвертичных отложений. Такая ситуация складывается потому, что примерно 90 % городской территории перекрыто сверху асфальтовым покрытием и зданиями

различного назначения. Все это препятствует диссипации газов, которые стремятся найти выход из подземного пространства. Вскрытие газонасыщенных зон скважинами нередко приводит к газогрязевым выбросам, продолжающимся иногда в течение нескольких часов. Песчано-глинистые отложения в этих зонах обладают тиксотропными и пловунными свойствами, плохими прочностными характеристиками.

Р.Э. Дашко [6] выделяет три зоны газогенерации: 1) верхнюю, до глубины 6...15 м, приуроченную к четвертичным отложениям с богатым содержанием органики (торфяные и литориновые образования); 2) среднюю, залегающую в межморенных отложениях, где газогенерирующими слоями служат микулинские суглинки и глины, обогащенные органическим веществом; 3) нижнюю, в которой газогенерация прослеживается в породах нижнего кембрия и венда.

В составе газов обычно преобладает метан, нередко ведущее место занимает также азот. Во многих пробах отмечается присутствие углекислого газа (до нескольких процентов) и сероводорода. Усилению процессов газогенерации в слоях четвертичного возраста способствует нефтяное загрязнение и тепловые аномалии, возникающие на участках энергоемких производств. В местах скопления людей и транспорта нефтяное загрязнение является одним из главных источников энергии и пищи для микроорганизмов. Повышение температуры в зоне гипергенеза способствует количественному росту бактерий и активизации их деятельности.

**Грунтовые воды.** На территориях крупных городов весьма сложными оказались условия питания и движения подземных вод, что обусловлено застройкой территории, наличием искусственных покрытий, различного рода барражей – шпунтов, забивных свай, существованием густой сети подземных коммуникаций, канализационных и водопроводных сетей, тоннелей станций метро, галерей глубокого заложения и т. п. Все это сказывается на условиях питания и движения подземных вод верхних водоносных горизонтов. Особенно затруднены условия водообмена в дельтах рек и на островах. Такие условия создают шпунтовые перегородки, набережные укрепления, различные инженерные сооружения, которые разделяют грунтовые потоки на малые сектора со специфическим гидродинамическим и гидрохимическим режимом подземных вод.

Возникновение загрязнения грунтовых вод на территории городов может быть объяснено разными причинами: проникновением промышленных стоков и отходов производства; просачиванием фекальных вод на площадях отсутствия канализационных систем; на участках свалок, промышленного и бытового мусора; в районах, отведенных под кладбища и скотомогильники; в условиях природного загрязнения пресных подземных вод. Каждая из названных обстановок характеризуется своими особенностями формирования химическо-

го состава грунтовых вод.

На преобладающей части города возникают условия затрудненного водообмена с низкими положительными, иногда отрицательными значениями Eh. Состав вод отличается разнообразным соотношением гидрокарбонатов, хлоридов и сульфатов при колебании минерализации от 1,0 до 3,5 г/л. Для этих вод характерны повышенные концентрации аммония, в среднем 8...10 мг/л. Отмечаются также повышенные концентрации органических веществ, нефтепродуктов, а также агрессивной углекислоты [7, 8].

Следует отметить, что на городских территориях существенным источником загрязнения являются потери из канализационных сетей. На участках проникновения канализационных стоков фиксируется наиболее высокая минерализация и сложный состав грунтовых вод. Канализационные стоки в среднем содержат взвешенных веществ – 300...416 мг/л, азота аммонийного – 58...67 мг/л, хлоридов – 67...75 мг/л, фосфатов ( $P_2O_5$ ) – 12,5...16 мг/л, калия ( $K_2O$ ) – 25 мг/л. Окисляемость ( $O_2$ ) составляет 42...58 мг/л. Содержание минеральных веществ во взвесах составляет 42 %, органических – 58 %. 1 мл фекальных стоков содержит 107–108 бактериальных клеток, присутствуют также грибные культуры и микроскопические водоросли [9].

Возьмем для примера г. Благовещенск на Дальнем Востоке, где мы проводили исследования в начале 80-х гг. XX в. Город находится в месте впадения р. Зеи в р. Амур на надпойменных террасах этого рек. Большая часть города занята частным сектором без канализации, что создает сложную экологическую обстановку. Широкое распространение в грунтовых водах получило загрязнение азотными и органическими соединениями. Кроме того, в этих водах наблюдается значительная концентрация двухвалентного железа (до 5...10 мг/л) и марганца (0,1...1,0 мг/л).

Значительное распространение имеет загрязнение подземных вод нефтепродуктами. Среди поверхностных источников загрязнения широкое распространение имеют свалки, загрязняющие вещества из которых выносятся просачивающимися через них атмосферными осадками.

К числу факторов, определяющих условия формирования городской среды, относятся техногенные физические поля. Так, например, длительное воздействие вибрационного поля приводит к неоднородному уплотнению пород различного литологического состава и влечет за собой неравномерность осадки и деформации ряда зданий и сооружений. Техногенные электрические поля способствуют увеличению уровня интенсивности блуждающих токов, что, в свою очередь приводит к интенсификации электрокоррозийных процессов. Пристального внимания требует тепловой фактор. Повышение температуры подземных вод приводит к увеличению концентрации содержащихся в них химических элементов и степени их агрессивности



по отношению к строительным материалам. При повышении температуры подземных вод и грунтов интенсифицируются процессы роста и жизнедеятельности некоторых видов микроорганизмов, что активизирует процессы биокоррозии.

Химия подземных вод может определять возможность использования подземных вод для водоснабжения и лечебных целей, но в еще большей степени химия воды сказывается на разрушительном воздействии на строительные материалы, бетон и металлоконструкции, которые используются для возведения фундаментов зданий, различных инженерных коммуникаций, метро, водопроводных и канализационных сетей и др. Из сказанного видно разнообразие задач, решаемых при гидрогеохимических исследованиях территорий мегаполисов, в интерпретации их результатов, и прогнозировании изменений гидрогеохимической обстановки под влиянием природных и техногенных факторов.

#### Заключение

Подземная гидросфера активно участвует в процессах загрязнения, с другой стороны берет

на себя техногенную нагрузку. Города постоянно расширяют сферу своего воздействия и вширь и вглубь и вверх, а эколого-гидрогеохимическая обстановка на этих территориях складывается стихийно с неизвестными последствиями, т. е. подземные воды не справляются с защитной функцией. Типизация гидрогеохимических обстановок городов только начинает разрабатываться. В ней следует учесть не только техногенные и природные факторы формирования химического состава подземных вод, но также и определяющие их геохимические процессы и возникающие при этом экологические последствия. Поэтому важнейшими направлениями изучения загрязнения подземных вод на городских агломерациях являются: получение представления о самоочищении геологической среды; инженерная профилактика, которые последовательно уточняются с помощью гидрогеологического прогноза на базе мониторинга. Гидрогеохимическое обоснование изучения и прогнозирования процессов контаминации подземных вод следует тесно увязывать с инженерными решениями по управлению этими процессами на объектах, включающих источники загрязнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.А. Города и окружающая среда. Космические исследования. – М.: Мысль, 1982.
2. Куликова Е.Ю. Подземная геоэкология мегаполисов. – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2005. – 480 с.
3. Шестаков В.М. Прикладная гидрогеология. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 144 с.
4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
5. Куликова Е.Ю. Подземная геоэкология мегаполисов. – М.: Изд-во МГГУ, 2005. – 480 с.
6. Дашко Р.Э. Микробиота в геологической среде: ее роль и последствия // Сергеевские чтения: Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – г. Москва, 23–24 марта 2000 г. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 72–78.
7. Дашко Р.Э., Норова Л.П. Техногенная эволюция подземного пространства Санкт-Петербурга: причины и последствия // Записки горного института. – 2001. – Т. 147. – С. 71–85.
8. Кириухин В.А., Норова Л.П. Гидрогеология мегаполисов // Геотехнические проблемы мегаполисов: Труды Междунар. геотех. конф. – Т. 5. – г. Москва, 7–10 июня 2010 г. – Москва, 2010. – С. 1929–1936.
9. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / Ф.В. Кармазинова [и др.]. – СПб.: Стройиздат СПб, 1999. – 424 с.

*Поступила 08.02.2012 г.*