

## ЛЕКЦИЯ № 3

### ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ

1. Виды загрязненных грунтовых массивов.

2. Миграция поллютантов в массивах.

3. Типизация загрязненных массивов.

#### I.

Массивы загрязненных грунтов могут подразделяться разными способами, например, по различным особенностям концентрирования в них загрязнителей и особенностям процесса загрязнения массива. При этом рассматриваются в основном техногенные загрязнения массивов.

Загрязнители в массиве могут быть локальными, сконцентрированными на узком участке грунтового массива, и региональными, рассеянными, распространенными на значительной территории массива. В соответствии с этим можно выделять процессы локального и регионального загрязнения. В плане по площади и форме ореолов загрязнения могут выделяться: линейные, овальные (концентрические), неправильной формы, сплошные (площадные загрязнения по всей площади).

**По глубине нахождения** загрязнителей в грунтовом массиве они могут быть:

- поверхностными, расположенными в почвенном слое или непосредственно на поверхности грунтового массива (на глубине 0-0,25 м);
- подпочвенными, расположенными непосредственно под почвой (0,25-1,0 м и более в зависимости от мощности почвы);
- глубинными или погребенными, располагающимися на определенной глубине в теле массива (на глубине от первых до десятков метров);
- сверхглубинными, расположенными на значительных глубинах (сотни и тысячи метров).

Соответственно, можно выделять процессы поверхностных, подпочвенных, глубинных и сверхглубинных загрязнений массивов. Поверхностные загрязнения почв и горных пород наиболее многочисленны и формируются в местах несанкционированных свалок, в местах добычи, транспортировки, переработки и складирования нефтепродуктов, на урбанизированных территориях и т.п. Поверхностные загрязнения массивов, кроме того, связаны обычно с атмосферными выпадениями загрязнителей.

Подпочвенные загрязнения обусловлены главным образом нарушением почвенного защитного геохимического барьера или процессами миграции загрязнений, вызванными различными причинами. Погребенные загрязнители ("залежи" загрязнителей) формируются в местах полигонов ТБО или ТБПО, при засыпке свалок, планировке рельефа, когда в овраги, понижения рельефа и т.п. засыпаются отходы-загрязнители без их утилизации. Глубинные и сверхглубинные загрязнения массивов связаны в основном с подземным захоронением различных отходов в геологической среде.

**По положению загрязнителей** в пустотном пространстве пород массива загрязнения подразделяются на:

- трещинные (распространение загрязнителей по трещинам, разломам и другим дизъюнктивам в скальных массивах);
- поровые (загрязнение порового пространства дисперсных грунтов);
- смешанные (трещинно-поровые);
- сплошные в виде залежи загрязнителей (погребенной или поверхностной).

В соответствии с этим можно выделять процессы трещинных, поровых, смешанных и сплошных загрязнений массивов.

**По соотношению с зоной аэрации и подземными водами** загрязнители в массивах могут располагаться:

- в зоне аэрации;
- в зоне подземных вод (напорных или безнапорных).

В последнем случае загрязнители могут находиться: 1) в области водоносного горизонта; 2) в области слабопроницаемых прослоев (относительных водоупоров); 3) в пределах всего водоносного комплекса.

В соответствии с этим можно выделять процессы загрязнения зоны аэрации и зоны подземных вод.

**По времени существования** тех или иных загрязнителей в массиве они могут быть:

- старыми, существовавшими несколько лет и образовавшимися за длительный период (до 10 и более лет);
- молодыми, сформировавшимися недавно (дни, недели, месяцы).

Во всех случаях необходимо указывать возраст загрязнителя и длительность его существования. В соответствии с этим можно выделять процессы старых и молодых загрязнений массивов грунтов.

**По динамике изменения ореолов загрязнения** в массиве они подразделяются на:

- постоянные ореолы;
- переменные или меняющиеся ореолы (возрастающие или убывающие).

**По агрегатному состоянию загрязнителей** в массиве они могут быть:

- твердыми (в виде кристаллической или аморфной фазы);
- жидкими (в виде жидких или растворенных компонентов в поровом растворе грунта);
- газообразными (в виде газообразных компонентов в газовой фазе порового пространства грунта);
- полиагрегатными (смесь разных фаз).

Если один и тот же загрязнитель может находиться в разных агрегатных состояниях, то в массиве могут формироваться различные зоны, где концентрируются загрязнители определенного агрегатного состояния. Так, например, происходит при загрязнении массивов нефтью и нефтепродуктами.

**По токсичности** загрязнителей можно выделить несколько групп загрязнителей в массивах грунтов: 1) высокотоксичные; 2) токсичные; 3) среднетоксичные; 4) малотоксичные. Критерии токсичности загрязненных массивов зависят от типа вещества-загрязнителя (например, его летальной дозы Ld/50, ПДК и др.), количества загрязнителя, времени его разложения и т.п.

И наконец, **по степени загрязнения массива грунтов** можно также выделить различные градации: 1) сильнозагрязненный массив; 2) среднезагрязненный массив; 3) малозагрязненный массив. Критерии степени загрязненности массивов могут быть также различными. Они зависят от количества загрязнителей в массиве (их концентрации), вида (химического состава), пространственного расположения и т.п.

Кроме того, необходимо различать, какие массивы грунтов подвергаются загрязнению: природные или техногенные. Так, например, техногенные массивы, создаваемые человеком в виде отвалов, хвостохранилищ, шламонакопителей, отстойников, различных свалок ТБО или ТБПО и т.п., чаще всего уже являются изначально загрязненными (геотехногенными аномалиями). Распределение в них загрязнителей, а также формирование вокруг них ореолов рассеяния зависят от конструкции этих техногенных массивов, их масштабов, расположения в геологическом пространстве и т.д.

Оборудование безопасной свалки в грунтах предусматривает двойную систему покрытия нижнего основания, систему контроля за утечками токсичных отходов, вентиляцию и т.п. Распространение загрязнения от такой свалки минимально. Однако на практике чаще всего полигоны ТБО, к сожалению, вообще не оборудуются системой защиты и контроля утечек

загрязнителей, а устраиваются лишь в более-менее подходящих гидрогеологических условиях, представляя просто погребенные залежи. В этом случае распространение загрязнения вокруг такой свалки максимально, так как она не имеет никаких (кроме естественных) систем защиты.

Другим типичным примером техногенных массивов, с которыми связаны различные загрязнения геологической и окружающей среды, являются отложения хвостохранилищ, шламонакопителей, золо- и шлакоотвалов.

Формирование техногенных загрязнений на глубине массивов чаще всего происходит за счет закачки в недра всевозможных опасных и токсичных отходов разных отраслей промышленности. Схема оборудования скважины для подземной закачки отходов довольно проста.

На определенной глубине подбирается подходящий пласт-коллектор для закачки в него отходов, затем оборудуется скважина, вскрывающая этот пласт, и в заданном режиме ведется в него закачка отходов. В этом случае формируется загрязнение в естественном массиве пород, точнее - в пласте-коллекторе. Главное условие - надежная изоляция отходов от попадания их в соседние водоносные горизонты и экосферу. Для этого пласт-коллектор подбирается на возможно большой глубине и устраивается цементирование скважины с уплотнителями. Кроме того, пластины-коллекторы выбираются в таком месте разреза, где они перекрываются и подстилаются практически непроницаемыми породами, например пластами соли. Однако найти абсолютно надежные пластины-коллекторы, которые полностью изолированы от гидросферы и экосферы, практически невозможно. Поэтому подземная закачка токсичных отходов должна быть запрещена.

## II.

Техногенные загрязнения, формирующиеся в массивах грунтов, как правило, с течением времени видоизменяются. Практически все загрязнители с той или иной скоростью мигрируют от очагов и источников загрязнений. Вопросы миграции загрязнений в массивах являются наиболее сложными, как с точки зрения исследования их особенностей в массивах, так и с точки зрения прогноза миграции.

Характер миграции загрязнителей в грунтовых массивах зависит от: 1) положения очага загрязнений; 2) типа и состояния загрязнителя; 3) геологического строения массива и его гидрогеологических особенностей; 4) климатических и мерзлотных условий; 5) состава, структуры и свойств пород, формирующих определенные геохимические барьеры, на которых концентрируются загрязнители.

Положение очага загрязнения определяет исходные условия миграции загрязнителя в массиве. От типа загрязнителя, его физических, химических и физико-химических свойств зависят многие параметры миграции. Например, вязкость нефти и различных товарных жидких нефтепродуктов-загрязнителей в целом больше вязкости воды, поэтому миграция нефти и многих вязких НП (масла, мазута) в порах грунтов более затруднена по сравнению с миграцией водных поровых растворов. Однако легкие НП, например такие, как бензин и другие, имеют вязкость меньшую, чем вода. Вследствие этого такие загрязнители быстрее мигрируют в порах и трещинах грунтов по сравнению с другими жидкими НП и водой.

Геологическое строение массива (в самом широком смысле) определяет главнейшие особенности миграции в нем загрязнителя, поскольку они зависят от состава пород, их структуры, условий и характера залегания пород в массиве, обводненности массива (взаимодействия загрязнителя с подземными водами), его выветрелости, трещиноватости и т.п. Климатические условия существования данного массива (температура пород, количество выпадающих осадков и т.п.) также влияют на характер миграции различных загрязнителей. И наконец, миграция загрязнителя зависит от того, в каком состоянии находится грунтовый массив, в талом или мерзлом, от того, каковы его геокриологические (мерзлотные) условия в целом.

Подвижность загрязнителей зависит от химико-минерального состава пород, их структуры и свойств, в частности от pH порового раствора грунтов. Так, например, подвижность различных тяжелых металлов и микроэлементов в почвах существенно меняется в зависимости от реакции среды.

Если загрязнитель в той или иной мере растворим в воде, то от очага загрязнения под действием атмосферных осадков загрязнитель мигрирует вниз, проникая в зону аэрации и захватывая ее определенный объем. Достигая уровня грунтовых вод, далее загрязнитель мигрирует по потоку воды в сторону реки. В месте разгрузки подземных вод происходит

проникновение загрязнений в реку. Мощность потоков загрязнителя, его концентрация в зоне аэрации и в горизонте подземных вод будут зависеть от многих факторов, главнейшими из которых являются состав загрязнителя, градиент его концентрации по фронту миграции, состав, фильтрационные и сорбционные свойства пород, направление и скорость движения подземных вод, их химический состав и т.п.

С геохимической точки зрения миграция техногенных загрязнителей в массивах пород подчиняется закономерностям техногенной миграции элементов и веществ в земной коре. Это один из видов техногенеза. Отметим лишь некоторые основные его черты, согласно А.И. Перельману [61].

Массивы загрязненных пород можно рассматривать как техногенные геохимические аномалии, применяя к ним аппарат исследований, разработанный в геохимии техногенеза. Наибольший объем техногенных потоков вещества, извлекаемого из геологической среды и коренным образом видоизменяющего рельеф поверхности, связан с районами горнодобывающей и топливно-энергетической промышленности.

Такие аномалии могут быть глобальными (формирующимися за счет глобальных выпадений техногенного происхождения), региональными и локальными. Техногенные аномалии делятся на литохимические (в почвах, породах, строениях), гидрохимические (в водах), атмосферные (в атмосфере) и биогеохимические (в организмах). Совокупность техногенных аномалий от локального источника (завода, рудника, города и т.п.) именуется техногенным ореолом и потоком рассеяния, которые, как правило, включают в себя все виды аномалий. Загрязнения представляют собой вредные аномалии, ухудшающие (загрязняющие) окружающую среду.

Формирование потоков рассеяния загрязнителей происходит в соответствии с наличием и особенностями тех или иных геоструктурных и геохимических барьеров. Геоструктурный барьер - это участок в массиве пород, где в условиях постоянной геохимической обстановки происходит концентрирование мигрирующего вещества вследствие особенностей строения массива (наличия непроницаемых прослоев, водоупоров, литологических ловушек разных типов и т.п.).

Например, за счет геоструктурных барьеров формируются залежи нефти и газа. Геохимическим барьером называются те участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. Это зона, где происходит смена одной геохимической обстановки на другую. Для разных загрязнителей существуют "свои" геоструктурные и геохимические барьеры.

Например, для загрязнителей, представленных нефтепродуктами (НП), плотность которых обычно ниже плотности воды, барьерами на их пути являются прежде всего водоносные горизонты. Воды, содержащиеся в почвенном слое, верховодка, фронт капиллярного подъема грунтовых вод и, наконец, зеркало грунтовых вод служат барьерами на пути миграции таких загрязнителей. Поэтому чаще всего техногенные "залежи" НП являются водоплавающими, они располагаются на небольшой глубине, в пределах первых метров (реже - нескольких десятков метров). Пластовое давление таких техногенных залежей равно гидростатическому. В районах многолетнемерзлых пород барьерами для формирования таких залежей НП являются многолетнемерзлые породы, надмерзлотные воды сезонных таликов или сезонномерзлые породы.

Наряду с природными существуют и техногенные геохимические барьеры (механические, физико-химические и биогеохимические). Это участки, где происходит резкое уменьшение техногенной миграции и, как следствие, концентрация соответствующих элементов. Техногенные барьеры могут также быть полезными, нейтральными и вредными. Примером вредного техногенного геохимического барьера является вторичное засоление почв в орошаемых районах. На техногенных геохимических барьерах происходит техногенное минералообразование. Для техногенеза в целом характерен больший динамизм, большая интенсивность миграционных процессов, чем для природных процессов.

Характер распространения загрязнений в массивах пород, формировавшихся в платформенных или геосинклинальных условиях, будет различен в силу специфических геолого-структурных особенностей этих массивов и соответствующих геохимических барьеров. В общем случае миграция загрязнителей идет более интенсивно в дисперсных, рыхлых

осадочных породах по сравнению со скальными осадочными, магматическими или метаморфическими породами.

В зонах сочленения осадочных бассейнов с выступами кристаллических пород миграция загрязнителей возможна в самые нижние слои осадочных пород.

Структура массивов пород, характер залегания отложений, их дислоцированность, тип складок и т.п. также определяют характер миграции в них загрязнителя. Так, например, в массивах, сложенных моноклинально залегающими породами, миграция загрязнителя от очага возможна лишь по наиболее проницаемым слоям.

Тектонические условия массива, характер его дислоцированности, тектонической раздробленности и т.д. также определяют характер миграции загрязнителя.

Загрязнители способны проникать в глубь массивов скальных пород по трещинам и тектоническим дислокациям. Зоны разломов, находящиеся непосредственно под очагами загрязнений, являются теми транзитными путями, по которым загрязнители могут вместе с инфильтрующимися водами проникать в глубоко залегающие слои пористых пород, перекрытых непроницаемыми или слабопроницаемыми отложениями. Тектоническая раздробленность массива, направление, тип и характер дислокаций в этом случае определяют масштабы миграции загрязнителя.

Существенным фактором при этом являются гидрогеологические условия тектонически раздробленных массивов. Так, например, по зонам дислокаций могут осуществляться разгрузка напорных загрязненных водоносных горизонтов и миграция загрязнений к поверхности.

Особенно важно учитывать подобную схему миграции в местах подземного захоронения отходов-загрязнителей, которые могут из глубины массивов проникать в приповерхностные или поверхностные части массивов и отрицательно влиять на экосистемы.

В целом следует отметить, что гидрогеологические условия являются одним из ведущих факторов, определяющих характер распространения тех или иных загрязнителей, особенно если они содержатся в подземных водах. Поэтому все особенности миграции загрязнителей в подземных водах должны учитываться при анализе этого процесса. Различие направлений движения подземных вод в гидрогеологических массивах и в артезианских бассейнах определяют и разные направления миграции загрязнений в них.

Особенно важен учет геолого-структурных, тектонических и гидрогеологических факторов при анализе возможной миграции загрязнений от мест их подземного захоронения, в частности - участков подземного захоронения РАО и других высокотоксичных отходов. Приведем примеры гидрогеологических разрезов пород в районах расположения полигонов глубокого захоронения РАО вблизи г. Красноярска и г. Томска.

Для этих территорий характерно сложное геолого-гидрогеологическое строение, которое имеет ряд общих для них черт и в каждом из районов обладает определенными особенностями.

Так, например, полигон захоронения отходов вблизи Красноярска расположен в области сочленения юго-восточной окраины Западно-Сибирской плиты с новейшим эпиплатформенным оро-геном Восточного Саяна и сводово-глыбовым поднятием Сибирской платформы - Енисейским кряжем. Характерная особенность рассматриваемого района - его блоковое строение, обусловленное наличием крупных тектонических нарушений.

В рассматриваемом районе, согласно, выделяются три участка (блока): Западный - опущенный, принадлежащий к юго-восточной окраине Западно-Сибирской плиты; Центральный - приподнятый, ограниченный Муратовским и Правобережным разломами; Восточный - опущенный, находящийся между Правобережным разломом и Енисейским кряжем.

Полигон захоронения расположен в пределах древней эрозионной впадины на площади Восточного опущенного блока. Максимальная мощность песчано-глинистых юрских отложений эрозионной впадины составляет 550 м. В восточном, южном и юго-восточном направлениях мощность отложений осадочного чехла быстро уменьшается, вплоть до полного выклинивания и выхода на дневную поверхность кристаллического фундамента.

В гидрогеологическом отношении рассматриваемый район отнесен к южной части Чулымо-Енисейского наложенного артезианского бассейна. Гидрогеологический разрез представлен

водоносными комплексами осадочных четвертичных и юрских образований, а также метаморфических и изверженных пород докембрия. В разрезе напорного юрского водоносного комплекса выделяют три горизонта, сложенные кварцевыми среднезернистыми песками и слабосцементированными песчаниками. Нижним водоупором служат слабопроницаемые отложения коры выветривания или монолитные породы кристаллического фундамента. Между собой водоносные горизонты разделены глинистыми горизонтами, имеющими практически повсеместное распространение.

Захоронение радиоактивных отходов производится в I и II пресные водоносные горизонты, область питания которых расположена примерно в 10 км к югу от полигона, а область разгрузки - в долине р. Кан и частично в долине р. Тель. Естественная скорость фильтрации подземного потока составляет в среднем 5-6 м/год.

Другой полигон захоронения отходов, вблизи Томска, расположен в области сочленения южной окраины молодой Западно-Сибирской плиты с северной частью Колывань-Томской позднегерцинской складчатой области, выраженной в современном рельфе в виде поднятий. В пределах Колывань-Томской складчатой области сильно дислоцированный палеозойский фундамент приподнят и выходит на дневную поверхность в эрозионных врезах речных долин. Фундамент, сложенный преимущественно визейскими отложениями карбона, перекрыт относительно маломощной толщей континентальных образований новомихайловской свиты среднего олигоцена и субаэральными, озерно-аллювиальными осадками среднего плейстоцена.

В гидрогеологическом отношении район полигона расположен в юго-восточной части Обского артезианского бассейна и характеризуется наличием высоконапорных трещинных и трещинно-жильных вод в породах палеозойского фундамента, мощных напорных водоносных горизонтов в меловых и палеогеновых отложениях, а также широким распространением межпластовых (напорных и безнапорных) и грунтовых вод в отложениях неогенового и четвертичного возраста.

Гидрогеологический разрез рассматриваемой территории представлен двумя водоносными комплексами: нижним, включающим в себя I, II и III меловые горизонты, и верхним, в состав которого входят IV меловой, V и VI палеогеновые и четвертичный водоносные горизонты.

В соответствии со спецификой гидрогеологических исследований в районах расположения полигонов захоронения жидких радиоактивных отходов нумерация водоносных горизонтов в отличие от общепринятого дается цифрами снизу вверх, а нумерация слабопроницаемых пород между водоносными горизонтами - буквами в том же порядке.

Водоносные комплексы разделены между собой горизонтом, сложенным водоупорными глинистыми образованиями. Каждый из водоносных комплексов характеризуется различными избыточными напорами, гидрохимическими и гидродинамическими показателями. Водоносные горизонты нижнего комплекса, в который производится захоронение жидких радиоактивных отходов, содержат пресные напорные воды гидрокарбонатного кальциевого типа, движущиеся со скоростью порядка 3-5 м/год преимущественно в юго-западном направлении.

Таким образом, описываемые районы захоронения жидких радиоактивных отходов, находящиеся в зоне сочленения платформенной и горноскладчатых областей, характеризуются весьма сложными геолого-гидрогеологическими условиями, в которых долгосрочное прогнозирование экологической безопасности захороненных промстоков представляет собой сложную многофакторную задачу.

Всесторонний анализ двух рассмотренных участков, а также других подобных примеров показывает, что жидкие РАО и аналогичные сверхтоксичные загрязнители, даже будучи захоронены в глубокие (на глубины до 1 км) и сверхглубокие (на глубины более 1-2 км) геологические формации, представляют серьезную опасность для ноосферы Земли, поскольку по разным причинам они рано или поздно все же способны мигрировать в поверхностные части массивов. Вряд ли где-нибудь на Земле существуют столь идеальные геологические условия, в которых возможна надежная и длительная изоляция РАО или других токсичных загрязнителей.

Современное прогнозирование миграции и изолированности РАО в глубоких геологических формациях пока не может обеспечить высокую надежность создаваемых полигонов захоронения РАО, а следовательно, строительство новых полигонов должно быть повсеместно прекращено. Оценка и выявление земель с радиоактивными загрязнениями проводятся в соответствии с нормативными документами.

### III.

Типизация техногенно загрязненных массивов грунтов должна строиться с учетом вышеописанных особенностей подразделения загрязнений и загрязнителей. Поскольку сами массивы горных пород подразделяются на несколько порядков по масштабу (от региональных до мелких), то, очевидно, аналогично могут подразделяться и загрязненные массивы.

Для целей эколого-геологической оценки и очистки загрязненных массивов их типизация должна строиться на несколько иных принципах и подходах, чем, например, при инженерно-геологических, гидрогеологических или геокриологических исследованиях. В частности, она должна давать наиболее удобную форму систематизации загрязненных массивов не с точки зрения их устойчивости или среды для инженерных сооружений, а с точки зрения учета по крайней мере двух факторов: 1) опасности для экосистем и 2) практической возможности очистки массивов от загрязнителей.

Первый фактор - опасность для экосистем (и прежде всего для человека), может быть учтен при оценке токсичности загрязнителей в массиве, их количества, концентрации, активности и мобильности токсичных компонентов и т.п.

Второй фактор - возможность очистки, определяется: а) целым набором собственно геологических условий массива

(геологических факторов строения массива), б) пространственным расположением и в) формой нахождения в нем загрязнителей.

Геологическое строение загрязненного массива является важнейшим фактором типизации. Оно определяется типом массива, и в соответствии с этим в типизации выделены платформенные, орогенные и рифтогенные массивы.

Не менее важной геологической особенностью является термо- и влагообеспеченность массивов пород, под которыми понимается наличие или отсутствие многолетнемерзлых пород в рассматриваемом массиве, а также степень увлажненности пород массива. Последняя может быть разбита всего на две категории: массивы с распространением сильно- и средне-увлажненных пород и массивы со слабоувлажненными породами.

Кроме того, важно охарактеризовать состав преобладающих пород массива: дисперсные или скальные. Для скальных массивов важно выделять выветрелые и невыветрелые массивы.