

## 8 Лекция. Особенности инженерно-геологической разведки для подземного гражданского и промышленного строительства. Фильм «Город наизнанку».

Рост городов в условиях все возрастающего недостатка свободных земель и поиск путей улучшения окружающей среды вызывает необходимость освоения подземного пространства для гражданского и промышленного строительства. Под землей размещаются и планируется дальнейшее устройство инженерно-транспортных сетей и сооружений, предприятий торговли, общественного питания, бытового обслуживания, связи, зрелищных и спортивных сооружений, объектов промышленного назначения энергетики и др.

*Для крупнейших и крупных городов страны (с численностью жителей соответственно более 500 тыс. и 200-500 тыс.), где дефицит городских земель особенно ощутим, разрабатываются схемы комплексного использования подземного пространства, предусматривающие размещение различного вида подземных сооружений в плане и по глубине. В схемах комплексного использования подземного пространства принято ярусное расположение подземных объектов: первый ярус охватывает зону глубин до 4-5 м, второй - от 4-5 до 20 м, третий - более 20 м (ГОСТ 20522-75. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик).*

*Количество ярусов, глубины их заложения, характер использования могут меняться, определяясь различными причинами. В большинстве городов первый и второй ярусы издавна активно используются для размещения инженерных сетей - водоснабжения, канализации, газоснабжения, тепловых, кабельных сетей и инженерного оборудования: насосных станций, станций перекачки сточных вод, понизительных подстанций и др. В крупных городах к этому перечню добавляются подземные гаражи, склады, пешеходные переходы и др. В городах с населением более 1 млн. чел. сооружаются метрополитены на разных вертикальных уровнях до 50 м и более, но чаще глубина расположения подземных объектов достигает 10-20 м.*

*Размещение подземных объектов по глубине и в плане, этажность, размеры, конструкция, технология строительных работ во многом определяются инженерно-геологическими условиями. От правильной оценки этих условий изыскателями зависит устойчивость, долговечность подземного сооружения и безопасность производства строительных работ.*

***При подземном строительстве возрастает значение тех факторов, которые отсутствовали или не играли большой роли при наземном строительстве. К ним относятся: изменение напряженного состояния массива грунтов; возрастание температуры грунтов, обводненности с глубиной; изменение гидродинамических, гидрохимических условий, состояния и свойств грунтов; возникновение комплекса новых геологических процессов и явлений. Своевременно выявить эти факторы и оценить их влияние на производство строительных работ и сооружений является задачей изыскателей.***

# 1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНОГО ГРАЖДАНСКОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

**1.1.** Инженерно-геологические условия подземной среды во многом формируются факторами, несвойственными условиям наземного строительства, и с глубиной характеризуются следующими особенностями:

возрастают напряженное состояние, температура грунтов, обводненность и водопритоки (до определенных глубин);

изменяются гидродинамические, гидрохимические условия, состояние, физико-механические свойства грунтов;

возрастает влияние структурно-тектонических условий и геодинамического состояния территории в формировании подземных геологических процессов и явлений.

**1.2.** Напряженное состояние грунтов формируется под влиянием сил гравитации, тектонических движений, гидродинамических, температурных, кристаллохимических факторов. В пределах осадочного чехла платформ до вскрытия массива грунтов подземными выработками давление в нем подчиняется гидростатическому закону, т.е. зависит от глубины выработки и от плотности вышележащих грунтов. На небольших глубинах от поверхности земли - 10-20 м вертикальные напряжения составляют десятые доли МПа, на глубинах 100-200 м - 2-3 МПа и т.д.

В грунтах кристаллического фундамента платформ, складчатых комплексов горно-складчатых областей под влиянием тектонических сил возникают напряжения гораздо большие, чем создаваемые силами гравитации (даже на глубинах 6-15 м). Горизонтальные напряжения в скальных грунтах могут в 2-10 раз превышать вертикальные напряжения. Как правило, очаги концентрации напряжений приурочены к тектоническим зонам. При изысканиях необходимо учитывать естественное напряженное состояние массива грунтов, существование повышенных горизонтальных напряжений и их направление. Это позволит ориентировать подземную выработку в пространстве таким образом, чтобы ослабить влияние повышенных горизонтальных напряжений, рекомендовать способы проходки, сводящие к минимуму деформации грунтов.

**1.3.** Температура грунтов в массиве и ее изменение зависят от структурно-тектонических условий, состава, состояния, теплопроводности грунтов, плотности теплового потока, близости к интрузиям и пр. Геотермический градиент (прирост температуры грунтов от уровня постоянных годовых температур на каждые 100 м углубления в недра земли) колеблется от 0,1-1 до 20 °С и составляет: в платформенных областях 1-3,5°, в горно-складчатых 1-6°, в пределах кристаллических щитов 0,6-1 °С. Температура грунтов и подземных вод учитывается при проектировании искусственного замораживания грунтов, систем вентиляции горных выработок и сооружений.

**1.4.** Глубина залегания и распространения подземных вод, обводненность грунтов обуславливаются геологической структурой, тектоникой территории, глубиной распространения тектонических нарушений, составом и состоянием грунтов, режимом питания, транзита и разгрузки подземных вод. Является закономерным уменьшение обводненности грунтов на больших глубинах (2000 м и более). Интервалы глубин снижения водопритоков в зависимости от названных факторов значительно варьируют. В горнодобывающих районах страны (Донбасс, Челябинский бассейн и др.) отмечено, что максимальные водопритоки в горные выработки наблюдаются до глубины 150-200 м (50-80 м<sup>3</sup>/ч). Так как гражданские и промышленные подземные объекты в городах строятся в основном на глубинах до 100 м, они чаще попадают в

зону наибольшей обводненности, что следует иметь в виду при изысканиях, проектировании и строительстве. К оценке обводненности следует подходить дифференцированно, с учетом особенностей гидрогеологического разреза.

При изысканиях необходимо уделять внимание напорным водам. За счет напорного водоносного горизонта, расположенного ниже проектной отметки заложения подземного сооружения, возможно подпитывание снизу вышележащих водоносных пластов, которые будут вскрываться выработками. Кроме того, вскрытие напорных вод вызовет внезапное обводнение подземных выработок с неблагоприятными последствиями.

Обводненность грунтов возрастает в районах с большим количеством атмосферных осадков, с пересеченным рельефом (на пониженных участках), в зонах тектонических нарушений и повышенной трещиноватости.

**1.5.** Изменение состояния и физико-механических свойств грунтов с глубиной происходит у всех литолого-петрографических типов. В пределах глубин, на которых ведется строительство подземных объектов в городах, эти изменения наиболее заметны у дисперсных грунтов. У них уменьшается пористость, увеличивается плотность скелета, прочностные и деформационные свойства.

В глинистых, крупнообломочных и скальных (сланцы) грунтах под воздействием постоянных напряжений развиваются деформации ползучести. Ползучесть в глинистых грунтах проявляется обычно в течение строительного периода и выражается в виде выдавливания. В крупнообломочных грунтах и сланцах ползучесть развивается медленно - в течение ряда лет. Ее неблагоприятные последствия могут сказаться в незакрепленных выработках в период их эксплуатации.

**1.6.** При вскрытии массива грунтов подземной выработкой происходит разгрузка напряжений. Вокруг выработки в кровле и подошве образуется зона пониженных напряжений, где происходит упругое расширение грунтов, сопровождающееся их разрывом, расслоением, растрескиванием. Грунты разуплотняются, снижается их устойчивость. По поверхностям и в зонах ослабления происходит смещение блоков, глыб, кусков грунта в виде вывалов, обрушений, отжима, стреляний, осыпания, расслоения, выдавливания. Возрастает горное давление. Следствием его является пучение глин, глинистых сланцев, возрастание нагрузки на крепь и обделку сооружений. Нарушение гидрогеологических условий сопровождается развитием таких процессов, как прорывы подземных вод, плывунов, оплывание, растворение, антропогенное карстообразование, механическая суффозия. В газоносных зонах происходят прорывы газов, дегазация грунтов.

Развитие геологических процессов в подземных выработках сопровождается сдвижением грунтов кровли, образованием мульд оседания, трещин на поверхности, провальных воронок, деформацией зданий и сооружений.

**1.7.** Возникновение некоторых антропогенных геологических процессов и явлений обусловлено применением специальных способов ведения строительных работ.

Проходка под сжатым воздухом, осуществляемая в плавунных и водонасыщенных грунтах с большими гидростатическими напорами, сопровождается в определенных инженерно-геологических условиях утечками и прорывами воздуха через воздухопроницаемые грунты. Под их влиянием происходит выпучивание асфальта, увеличение притоков воды в соседние

подземные выработки, подъем уровня грунтовых вод, затопление подвалов зданий, выбросы в атмосферу сжатого воздуха, воды, дисперсных грунтов.

Замораживание глинистых грунтов сопровождается их пучением (до 30-40 см), что приводит к поднятию поверхности земли, фундаментов зданий и сооружений, их деформациям. При оттаивании грунтов развиваются просадки, вызывающие дополнительные деформации поверхности и сооружений.

Искусственное водопонижение вызывает гидростатическое сжатие песчаных грунтов, дегидратационное уплотнение глинистых водоупоров при снятии напоров артезианских вод, сопровождаемые оседанием земной поверхности.

**1.8.** В период эксплуатации подземного сооружения могут развиваться подъем уровня подземных вод, подтопление, загрязнение водоносных горизонтов, а также завершается процесс сдвига и оседания земной поверхности над сооружением, возведенным закрытым способом.

Подземные сооружения, перегораживая путь потоку подземных вод, вызывают уменьшение скорости и изменение направления движения потока, что приводит к подъему уровня подземных вод. Утечки хозяйственно-бытовых и промышленных вод из наземных и подземных объектов являются дополнительным источником подъема уровня. Подъем уровня подземных вод сопровождается набуханием глинистых, проседанием лессовых грунтов, снижением прочностных и деформационных свойств различных литологических разностей грунтов. В случае залегания этих грунтов под фундаментами зданий и сооружений могут произойти деформации последних.

Утечки сточных вод из подземных объектов различного назначения могут привести к загрязнению подземных вод - бактериальному, химическому, тепловому. В результате ухудшаются их питьевые качества, приобретаются агрессивные свойства по отношению к бетону, металлу, карстующимся грунтам.

При взаимодействии массива грунтов и подземного сооружения вокруг него изменяется влажностный, температурный и газовый режим в грунтах, что может привести к окислению некоторых минералов (сульфидов и сульфатов железа, магния, натрия), растворению карбонатов и т.д. В результате грунты могут приобрести коррозионные свойства по отношению к материалу обделки сооружения.

Сдвигание грунтов над подземными сооружениями и оседание поверхности вызываются продолжающимся со строительного периода уплотнением грунтов кровли, а также уплотнением грунтов основания сооружений под их весом. Над трассами метрополитена оседание поверхности дополнительно вызывают динамические воздействия от движения поездов.

**1.9.** В развитии подземных геологических процессов и явлений прослеживаются определенные закономерности, обусловленные зонально-климатическими и регионально-геологическими условиями.

Зонально-климатические условия, характеризуемые температурой воздуха, ее колебаниями, атмосферными осадками, обуславливают интенсивность процессов выветривания, которые ведут к снижению прочностных и деформационных свойств грунтов. Выветривание развивается преимущественно в котлованах, траншеях, длительное время остающихся открытыми. Из подземных выработок, пройденных закрытым способом, процессы выветривания имеют место главным образом в незакрепленных, причем интенсивность их более низкая, чем в открытых выработках.

При всем разнообразии факторов, влияющих на развитие процессов выветривания: климат, петрографические, структурные, текстурные особенности грунтов, трещиноватость, экспозиция склона, степень обнаженности и т.д. - устанавливается определенная связь геологических процессов в открытых котлованах с климатом.

В зоне тропического климата, где высокая температура воздуха, большая влажность и обилие атмосферных осадков обуславливают довольно быстрое выветривание грунтов, происходит смещение последних в откосах котлованов в виде оплывин, оползней, осыпания. Эти же процессы, но в меньшей степени, свойственны и зоне умеренного климата. В семиаридных районах с резкими колебаниями температуры в бортах котлованов развиваются преимущественно осыпание, вывалы грунтов.

В районах с арктическим климатом, с которым связана многолетняя мерзлота, строительство подземных сооружений открытым и закрытым способами, а также эксплуатация их будут сопровождаться оттаиванием или промерзанием грунтов в зависимости от расположения объекта в зоне сплошной, прерывистой или островной мерзлоты, времени производства работ, теплового режима эксплуатации сооружения. Изменение термического режима грунтов сопровождается развитием процессов солифлюкции, проседания оттаявших грунтов, морозного пучения, образования наледей, прорывом подземных вод и т.д.

**1.10.** Влияние регионально-геологических условий, выраженных структурно-тектоническими особенностями, литолого-петрографическим составом, структурой и текстурой грунтов, сказывается следующим образом.

В платформенных областях, где пласты залегают горизонтально или со слабым уклоном, скальные грунты разбиты трещинами на крупные блоки. Разрывные нарушения редки, слабо выражены зоны дробления. При подземном строительстве происходят вывалы грунтов по трещинам, осыпание обломков в зонах дробления.

В геосинклинальных областях пласты имеют моноклиналиное залегание, осложненное мелкой и пологой складчатостью. При падении пластов в сторону подземной выработки следует ожидать вывалы, обрушения. Сводовая часть антиклинальной складки является зоной повышенной трещиноватости и концентрации напряжений, что при вскрытии ее повлечет разгрузку напряжений со смещением разбитых трещинами грунтов в выработку.

Горно-складчатые области с крутыми углами падения крыльев складок и интенсивной трещиноватостью в местах перегиба складок, разрывными нарушениями, с зонами повышенной трещиноватости и дробления являются наиболее неблагоприятными для подземного строительства. Оно будет осложнено процессами стреляния, вывалами, обрушениями и др. В некоторых районах можно ожидать прорыв термальных вод по трещинам в выработку.

**1.11.** Литолого-петрографический состав, структура и текстура грунтов определяют их свойства и поведение в подземных выработках.

Монолитные скальные грунты имеют высокую прочность, устойчивость и в большинстве случаев не требуют облицовки. Проявление подземных геологических процессов весьма ограничено и связано с наличием зон и поверхностей ослабления, которые обусловлены трещиноватостью и текстурными особенностями грунтов - слоистостью, сланцеватостью, комковатостью и пр., а также с разгрузкой тектонических напряжений. В подземных выработках будут происходить вывалы глыб в местах пересечения трещин, стреляние. Слоистые и сланцеватые скальные грунты выветриваются, рассланцовываются, расслаиваются на тонкие

плитки и пластины, которые осыпаются, сползают или обрушаются. Эти грунты обладают также реологическими свойствами, в них развиваются деформации ползучести. В скальных растворимых грунтах при изменении гидродинамических условий, вызванных подземным строительством, могут развиваться по трещинам карстовые процессы.

В подземных горных выработках, проходимых в дисперсных грунтах, в зависимости от их обводненности развиваются сыпуны, осыпание, плывуны, оползни, обвалы, оплывание, механическая суффозия и др. В подавляющем большинстве случаев подземное строительство в дисперсных грунтах ведется с укреплением выработок.

Знание рассмотренных закономерностей развития подземных геологических процессов и явлений позволит предвидеть места их проявления, объемы и рекомендовать мероприятия по предупреждению этих процессов.

**1.12.** Геодинамическое состояние территории характеризуется наличием эндогенных и экзогенных геологических процессов и явлений. Первые представлены землетрясениями, вулканизмом, современными тектоническими движениями, вторые - оползнями, эрозией, карстом, механической суффозией и др. Эти природные процессы существенно осложняют подземное строительство и потому требуют особого внимания при изысканиях.

В сейсмических районах на подземные сооружения воздействуют: в дополнение к обычному геостатическому давлению - инерционные нагрузки от веса сооружения, от масс грунта на обделку сооружения, сейсмическое горное давление, вызванное прохождением сейсмических волн; сейсмоуплотнение нескальных грунтов; сейсмогравитационные процессы (сейсмообвалы и сейсмооползни на склонах); сеймотектонические движения по разломам. Наиболее неблагоприятными инженерно-геологическими условиями для расположения подземных сооружений являются: приповерхностная толща грунтов (приблизительно до 4-5 м глубины), дисперсные и обводненные грунты, скальные сильно трещиноватые грунты, зоны тектонических нарушений, контакты грунтов разных по составу и свойствам.

Современные тектонические движения представляют опасность возможностью подвижек блоков пород по надвигам, сбросам и другим тектоническим разрывным нарушениям.

Экзогенные геологические процессы проникают нередко на большую глубину. Выветривание распространяется в глубь массива до 100 м, карст - до 1000 м, поверхности скольжения оползней обнаруживаются на глубинах до 120 м и более, древние эрозионные врезы в виде погребенных долин, каньонов достигают глубины 50-100 м.

**1.13.** Подземное строительство в городах осуществляется в измененной геологической среде. Изменен режим подземных вод, а также термический режим и свойства грунтов, напряженное состояние массива, геодинамическое состояние территории.

**1.14.** Режим подземных вод изменен под воздействием эксплуатационных и строительных откачек, утечек хозяйственных, промышленных, поливных вод, конденсации влаги под зданиями и асфальтовыми покрытиями, подпора подземных вод водохранилищами, созданием искусственных дренажей. В районах длительных эксплуатационных откачек формируются депрессионные воронки глубиной до 110 м и радиусом до 70 км. Понижению уровня подземных вод сопутствуют геологические процессы: гидростатическое уплотнение песчаных грунтов, дегидратационное уплотнение глинистых водоупоров, ведущее к оседанию поверхности земли; деструкционные осадки в связи с разложением органического вещества; механическая суффозия, карст, увеличение глубины зоны сезонного промерзания и др.

Повышение уровня подземных вод достигает в зоне влияния водохранилищ 100 м, а в результате подтопления застроенных территорий - 30 м. При повышении уровня подземных вод происходит гидростатическое взвешивание грунтов, приводящее к их разуплотнению, заболачивание, набухание, размокание, просадка лессовых грунтов, развитие оползней, повышение балльности землетрясений и др.

При изысканиях для подземного строительства необходим тщательный анализ гидрогеологических условий с привлечением архивных материалов и изучением истории хозяйственного освоения территории, что позволит правильно установить расчетный уровень, предвидеть изменения свойств грунтов и геологических процессов.

**1.15.** Термический режим грунтов и подземных вод изменяется под влиянием тепловых воздействий от зданий и сооружений и города в целом, а также охлаждения грунтов и подземных вод вследствие нарушения теплового баланса. В геокриозоне в первом случае развиваются процессы деградации многолетней мерзлоты, оттаивание мерзлых грунтов с образованием чаш протаивания мощностью до 30 м, что сопровождается потерей несущей способности грунтов, оседанием поверхности и деформацией строений, термокарстом, солифлюкцией, увеличением водопритоков в подземные выработки. Во втором случае происходит аградация мерзлоты, морозное пучение грунтов, образуются наледи, гидролакколиты. При подземном строительстве следует иметь в виду вероятность вскрытия грунтов, которые ранее считались мерзлыми, в талом состоянии, и наоборот, что позволит избежать непредусмотренных осложнений при возведении и эксплуатации объекта, вызванных ухудшением прочностных свойств грунтов и проявлением подземных геологических процессов.

Вне геокриозоны учет измененного термического режима грунтов и вод важен при проектировании строительства с помощью замораживания грунтов.

**1.16.** На изменение напряженного состояния грунтов влияют статические, динамические нагрузки, вскрытие массива грунтов уже существующими открытыми и подземными выработками. Статические нагрузки от веса зданий и сооружений колеблются от 0,01 до 2 МПа. С ними связано уплотнение грунтов с образованием осадочных воронок глубиной от долей сантиметра до 100 см и более. Динамические нагрузки вызваны вибрацией от городского транспорта, различных механизмов, строительных и иных взрывов. Вибрационные и ударные механизмы уплотняют песчаные грунты в радиусе до 5 м, осадки при этом достигают 0,4-0,5 м.

Статические и динамические нагрузки меняют эпюру напряжений, способствуя возрастанию последних. Эти факторы должны учитываться при расчете прочности подземного сооружения.

С существованием открытых и подземных выработок (котлованов карьеров, шахт, рудников и т.д.) связано образование зон разгрузки напряжений, в пределах которых грунты теряют монолитность, прочность, приходят в движение, перемещаясь в сторону выработанного пространства. Вдоль бортов открытых выработок образуются призмы сдвижения, ширина которых обусловлена углом сдвижения и может достигать 60 м. При закрытом способе работ сдвижение грунтов может распространиться до земной поверхности. Строительство подземных сооружений в подработанном массиве может сопровождаться неравномерными осадками.