ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по выбору исходных данных для модели прогноза процесса подтопления городских территорий



Москва 1986

gost.e-ecolog.ru

Производственный и научно-исследовательский институт
по инженерным изысканиям в строительстве
(ПНИИИС) Госстроя СССР

Рекомендации

по выбору исходных данных для модели прогноза процесса подтопления городских территорий

Москва Стройиздат 1986

УДК 556.3:518,61

Рекомендовано к изданию решением секции инженерной защиты территорий от опасных природных процессов научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по выбору исходных данных для модели прогноза процесса подтопления городских территорий /ПНИИИС Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.

Рассмотрены вопросы методики получения и обработки информации по природным условиям и техногенным факторам для составления расчетных геофильтрационных схем, являющихся основой построения имитационных моделей исследования и прогноза процесса подтопления.

Количественную оценку режимообразующих факторов рекомендуется выполнять на основе составления водного баланса городской территории и ее районирования по режиму грунтовых вод.

Для выбора расчетных значений параметров геофильтрационной схемы рекомендуются методы моделирования на АВМ и ЭВМ. По разделам приведены соответствующие примеры.

Табл. 37, ил. 39

Для инженерно-технических работников изыскательских, проектно-изыскательских и научных организаций.

Разработаны ПНИИИС Госстроя СССР – канд.техн.наук Ф.В.Залесский (разд. 5, 6, 7, 9), кандидаты геол.-минералог.наук В.С.Зильберг (разд. 2) и О.В.Слинко (разд. 1,3,4,8,10,11,12) при участии производственного объединения "Стройизыскания" – инж. А.Н.Койда (разд. 8).

Замечания и предложения по содержанию настоящих рекомендаций просим направлять по адресу: 105058, Москва, Окружной проезд, 18, ПНИИИС.

3202000000 – 477
Р ---------- Инструкт.-нормат., I вып.–34– 85
047(01) – 86

©Стройиздат, 1986

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы подтопление городских территорий грунтовыми водами в различных природных условиях нашей страны приняло массовый характер. Подтопление приносит значительный материальный ущерб, исчисляемый сотнями миллионов рублей.

Развитие подтопления обусловлено не только возросшими масштабами влияния хозяйственной деятельности человека на геологическую среду, но и в ряде случаев недостаточно эффективной работой построенных систем защитных сооружений. Это, в свою очередь, объясняется определенными затруднениями изыскательских и проектно-изыскательских организаций в постановке инженерно-гидрогеологических и гидрометеорологических работ для целей прогноза подтопления и гидрогеологического обоснования предупредительных и защитных мероприятий.

В Рекомендациях, на основе разработанной в ПНИИИС методологии изучения и прогноза процесса подтопления на городских территориях, дается принципиальная схема постановки и проведения полевых работ с целью выбора исходных данных для прогноза уровенного режима подземных вод, излагаются методы обобщения и систематизации материалов инженерных изысканий и специальных исследований по оценке природных условий и комплекса техногенных факторов в пределах городской застройки.

Выбор исходных данных для прогноза завершается составлением расчетной геофильтрационной схемы. Полнота и достоверность материалов в конечном итоге определяют выбор методики прогнозных исследований. В качестве полевых методов оценки гидрогеологических параметров грунтов зоны аэрации и водонасыщенных пород предлагаются традиционные методы. Для выбора расчетных значений параметров геофильтрационной схемы, оценки внутренних и внешних граничных условий на всех стадиях исследований рекомендуются методы моделирования на АВМ и ЭВМ.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОДТОПЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

1.1. В соответствии с ГОСТ 19185 – 73 "Гидротехника. Основные положения. Термины и определения" термин подтопление имеет следующее определение: "повышение уровня подземных вод, приводящее к нарушению хозяйственной деятельности на данной территории". Это определение применительно к инженерным изысканиям для строительства и содержанию настоящих Рекомендаций конкретизируется нами следующим образом: подтопление – направленный процесс подъема уровня грунтовых вод и увеличения влажности грунтов на застроенных территориях, обусловленный изменением водного баланса (приходные статьи баланса преобладают над расходными) под влиянием комплекса техногенных факторов при соответствующих природных условиях".

1.2. Работы по специфике развития и прогноза подтопления на застроенных территориях можно условно подразделить на две группы:

оценка локального подтопления на территориях промышленных предприятий [1, 2, 3, 62, 63];

оценка " регионального" подтопления на городских территориях [26–30, 37, 65, 75 – 78].

Специфика и отличие городских территорий от промышленных площадок по развитию подтопления и его прогнозу общепризнаны [65, 75, 78].

Специфика и масштабность развития подтопления на территориях городов зависит от:

природных условий (климатических, орогидрографических, геоморфологических, геологических и гидрогеологических);

комплекса градостроительных факторов (планировочной структуры, типа и плотности застройки, инженерной подготовки территории);

характера освоенности прилегающих территорий (степени зарегулированности рек, наличия водохранилищ, каналов и орошаемых массивов, интенсивности эксплуатации подземных вод, осушения карьеров и других горных выработок).

Под комплексом техногенных факторов следует понимать суммарное воздействие инженерно-строительной и хозяйственной деятельности человека на геологическую среду.

1.3. Выделяют две стадии развития подтопления: при строительстве и при эксплуатации застроенной территории. При этом следует иметь в виду, что поднимающийся уровень грунтовых вод может достигнуть отметок фундаментов, заглубленных частей зданий и сооружений, подземных коммуникаций уже на стадии строительства.

1.4. При изучении и прогнозе подтопления на застроенных территориях следует исходить из необходимости рассмотрения этих вопросов комплексно, с учетом многофакторности этого явления, а не ограничиваться упрощенным пониманием подтопления как процесса повышения уровня грунтовых вод в результате дополнительного инфильтрационного питания на отдельном конкретном участке территории. Такой подход требует целенаправленной постановки и поэтапного проведения инженерно-гидрогеологических изысканий, использования комплекса методов по получению и обработке исходной информации для оценки гидрогеологических условий.

1.5. Под основными процессами, определяющими развитие подтопления на городских территориях, следует понимать:

подъем уровня грунтовых вод (УГВ) первого от поверхности водоносного горизонта, существующего на период изысканий;

подъем УГВ в зоне влияния водохранилищ;

формирование нового техногенного водоносного горизонта на местном или региональном водоупоре;

увлажнение и замачивание грунтов обратных засыпок по контуру фундаментов, подвалов, подземных сооружений; планировочных подсыпок при строительстве на практически непроницаемых грунтах.

1.6. Подъем УГВ, обусловливающий подтопление территории, следует рассматривать на фоне закономерностей формирования режима грунтовых вод в естественных условиях [78] в соответствии с существующей схемой районирования естественного режима грунтовых вод [44]. В этой схеме по степени увлажнения территории выделены три гидрогеологические зоны: обильного, умеренного и недостаточного питания. Природные условия типизированы [65, 75] путем выделения в гидрогеологических зонах основных геоморфологических поверхностей (макроформы) и геоморфологических типов рельефа (мезоформы), которым соответствуют типовые геолого-литологические разрезы. По разрезам дана краткая характеристика первых от поверхности водоносных горизонтов с описанием основных (региональных) зональных закономерностей естественного и техногенного режимов грунтовых вод.

При выделении потенциально подтопляемых территорий следует исходить из глубин залегания уровня грунтовых вод. Потенциально подтопляемыми территориями следует считать такие, на которых уровень грунтовых вод находится настолько глубоко (преимущественно более 4 – 5 м), что не мешает началу строительства с учетом отметок заложения наиболее заглубленных сооружений и установленной средней годовой амплитудой колебания УГВ. В процессе строительства и последующей эксплуатации зданий и сооружений на таких территориях наблюдается направленный процесс подъема УГВ.

Соответственно кроме потенциально подтопляемых территорий следует выделять сезонно подтопляемые, где подтопление обусловлено сезонными подъемами уровня грунтовых вод или подъемами в результате экстремальных осадков и экстремальных паводков. На таких территориях главное внимание при инженерных изысканиях должно быть уделено изучению режима грунтовых вод для оценки возможности сезонного подтопления.

Типизация разнообразных природных условий является основой выбора расчетных геофильтрационных схем с последующим обоснованием методов прогноза, а также определяет постановку и методику инженерно-гидрогеологических изысканий.

1.7. Развитие процесса подтопления на городских территориях характеризуется двумя основными закономерностями – скоростью подъема и характером колебания подземных вод: подъем УГВ носит ярко выраженный характер и по своим показателям выше годовой амплитуды изменения уровня или амплитуды его сезонного подъема: подъем УГВ значительно не изменяет общего характера колебания уровня на городской территории и как бы накладывается на него, обусловливая постепенный подъем уровня с отдельными резкими подъемами в годы с экстремальными атмосферными осадками или паводками.

Эти закономерности должны учитываться при организации стационарных гидрогеологических и гидрологических наблюдений на застроенных территориях.

1.8. Подъем УГВ в зоне влияния водохранилища, формирующийся как процесс развития подтопления на городских территориях, следует рассматривать на фоне формирования подпора подземных вод при заполнении водохранилища до отметки НПГ (наивысший подпорный горизонт) или на фоне стабилизировавшихся уровней подземных и поверхностных вод при сформировавшемся подпоре. Стабилизировавшиеся эксплуатационные уровни в водохранилищах при рассмотрении процесса подтопления следует оценивать дифференцированно для водохранилищ сезонного или многолетнего регулирования, что определяет различный подход при размещении пунктов в режимной сети и методики стационарных гидрогеологических наблюдений. Ширина прибрежной зоны водохранилища, в которой происходит подпор подземных вод, на равнинных реках может достигать нескольких километров.

При заполнении водохранилища происходит фильтрация в его борта и формируется призма накопления фильтрационных вод в прибрежной зоне аэрации. Одновременно естественный поток грунтовых вод, питающих реку, подпирается фильтрационным потоком из водохранилища. По границе этих двух потоков формируется своеобразная зона раздела, где

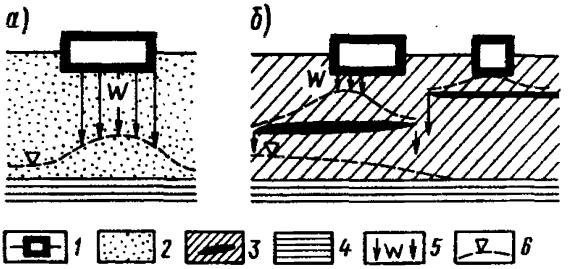


Рис. 1. Схема формирования техногенного водоносного горизонта
а – зона аэрации сложена проницаемыми грунтами; *б* – зона аэрации сложена слабопроницаемыми грунтами; *1* – источник инфильтрационного питания на поверхности земли (здание, сооружение, подземная коммуникация); *2* – проницаемые грунты (супеси, пески); *3* – слобопроницаемые грунты (суглинки; лессовидные суглинки с прослоями более плотных разностей тех же грунтов и погребенных почв); *4* – водоупор (глины); *5* – направление движения инфильтрующейся воды, 5 – интенсивность инфильтрации; *6* – уровень подземных вод формирующегося техногенного водоносного горизонта

расход потока равен нулю. В процессе заполнения водохранилища эта граница постепенно смещается к урезу водохранилища пока не совпадает с ним. Этот период времени смещения границы характеризуется постоянной фильтрацией воды из водохранилища. Далее восстанавливается питание реки подземными водами. Однако теперь это питание происходит при значительно меньших гидравлических градиентах.

Приведенная динамика формирования подпора подземных вод и образования новых водоносных горизонтов в зоне аэрации требует особого подхода при проектировании и выполнении гидрогеологических и гидрологических изысканий по получению исходной информации для прогноза.

Практика показывает, что ранее выполненные прогнозы подъема уровня в зоне влияния существующих или проектируемых водохранилищ следует обязательно корректировать прогнозом подъема существующего УГВ с учетом дополнительного воздействия техногенных факторов на городской территории.

1.9. При образовании техногенного водоносного горизонта в грунтах зоны аэрации необходимо различать два случая:

подземные воды формируются на местном водоупоре выше первого от поверхности водоносного горизонта, существующего в начале освоения территории. Техногенный водоносный горизонт имеет ограниченное распространение в пределах площади развития местного водоупора. Со временем подземные воды этих двух горизонтов могут образовать единый водоносный горизонт;

подземные воды формируются на региональном водоупоре, когда до начала освоения территории в зоне аэрации были развиты подземные воды спорадического распространения или подземные воды вообще отсутствовали.

В зоне аэрации процесс миграции воды в результате техногенного инфильтрационного питания заключается в непосредственном поступлении воды на нижний водоупор (местный или региональный) и далее на уровень формирующегося (ранее существовавшего) водоносного горизонта или этот процесс носит более сложный характер: насыщение грунтов зоны аэрации, движение влаги одновременно вверх и вниз, формирование "подвешенных" водонасыщенных массивов грунта.

Поэтому целесообразно исходить из двух схем развития подтопления. Первая – зона аэрации сложена хорошо проницаемыми грунтами. Подъем

уровня подземных вод формирующегося водоносного горизонта происходит непосредственно от поверхности водоупора по схеме снизу – вверх (рис. 1,*а*). Вторая – зона аэрации сложена слабопроницаемыми грунтами (наиболее типичным является геолого-литологический разрез, представленный лессовидными суглинками с прослоями их более плотных разностей и погребенных горизонтов почв). В начальной фазе формирования водоносного горизонта происходит увлажнение и насыщение грунтов в верхней части зоны аэрации, что является причиной подтопления сооружений "подвешенными" подземными водами в отдельных точках территории. В средней фазе формирования горизонта наблюдается движение воды одновременно снизу вверх (к поверхности земли) и сверху вниз (к нижнему водоупору). Это обусловливает нередко формирование куполов подтопления при отсутствии общепринятой поверхности подземных вод в пределах района (рис.1,*б*). На заключительной фазе формирования техногенного водоносного горизонта наблюдается направленный подъем уровня подземных вод, приводящий к повсеместному подтоплению площадки (района).

Вышеприведенную динамику формирования техногенного водоносного горизонта необходимо иметь в виду при проектировании и выполнении гидрогеологических изысканий для обоснования расчетной схемы, при составлении которой требуется определить направление потока подземных вод, его мерность, характер протекания процесса и изменение граничных условий во времени.

1.10. Увлажнение и замачивание грунтов обратных засыпок, планировочных подсыпок по периметру фундаментов, подвалов зданий и сооружений, что приводит к их подтоплению, а на отдельных участках к заболачиванию поверхности, обычно наблюдается на застроенных территориях геолого-литологический разрез которых представлен (сверху вниз):

слой 1 – суглинки, супеси покровные мощностью до 3 – 5 м;

слой 2 – глины (хвалынские, майкопские), суглинки плотные (моренные и др.) с коэффициентами фильтрации менее 0,1 м/сут.

На этих территориях в естественных условиях, особенно в гидрогеологических зонах умеренного и недостаточного питания, подземные воды в слое 1, как правило, отсутствуют. Только иногда могут наблюдаться подземные воды спорадического распространения в периоды интенсивной инфильтрации атмосферных осадков. Нижележащие практически непроницаемые грунты (слой 2) не содержат гравитационную воду и являются верхними местными или региональными водоупорами нижележащих водоносных горизонтов.

Подтопление в таких условиях объясняется действием техногенных факторов, а его специфика заключается в локальном развитии процесса, когда техногенный водоносный горизонт и общепринятая свободная поверхность подземных вод отсутствуют. Поэтому прогнозирование изменения УГВ не имеет смысла, а неизбежный факт подтопления необходимо учитывать при строительстве, используя метод аналогий, заранее проектируя комплекс защитных мероприятий локального плана.

1.11. Развитие подтопления на городских территориях (подъем уровня грунтовых вод и увеличение влажности грунтов) обусловливает:

затопление заглубленных частей зданий и сооружений, подземных сооружений и коммуникаций;

изменение прочностных и деформационных свойств грунтов;

изменение химического состава подземных и поверхностных вод;

активизацию или возникновение инженерно-геологических процессов и явлений;

повышение сейсмичности территорий.

Это влечет за собой целый ряд негативных последствий как экономического (затраты средств и времени на ликвидацию подтопления), так и социального плана. Отсюда возникают проблемы обеспечения нормального функционирования городской территории, рационального использования и охраны геологической среды, т.к. искусственное нарушение любого компонента вызывает ее изменение, выражающееся в развитии геологических, физико-химических и биохимических процессов протекающих с различной скоростью в зависимости от конкретной ситуации.

1.12. В соответствии с требованиями основных нормативных документов по инженерным изысканиям одной из главных задач инженерных изысканий является комплексное изучение природных условий строительства и составление прогнозов изменений окружающей природной среды (в частности оценка гидрогеологических условий и прогноз их изменения) под воздействием строительства и эксплуатации предприятий, зданий и сооружений для обоснования проектов комплексных защитных мероприятий по предупреждению и ликвидации неблагоприятных последствий воздействия строительной практики человека на окружающую среду.

1.13. Оценку гидрогеологических условий городских территорий, применительно к решению проблемы подтопления, следует рассматривать как основу установления возможного факта изменения уровенного режима грунтовых вод и выявления характера направленности его развития. Под оценкой гидрогеологических условий понимается схематизация природных условий, техногенных режимообразующих факторов и установление их функциональной надежности.

Схематизация в обобщенном виде заканчивается составлением расчетной геофильтрационной схемы. Эта схема с определенной степенью точности и надежности дает представление о форме и размерах исследуемой области фильтрации; ее климатических, орогидрографических, геоморфологических, геологических и гидрогеологических особенностях; характере застройки и инженерной подготовки территории; о гидродинамике потока, его расчетных фильтрационных характеристиках, внутренних и внешних граничных условиях.

1.14. Прогноз изменения гидрогеологических условий – экстраполяция во времени и (или) пространстве изменений гидрогеологических условий района.

При исследовании процесса подтопления на городских территориях следует выполнять два вида прогнозов – календарный и вероятностный.

Основной задачей прогноза подъема УГВ при подтоплении является оценка максимального подъема УГВ под действием техногенных факторов на период строительства и на предполагаемый период эксплуатации зданий, сооружений с учетом сезонных и многолетних колебаний УГВ.

Время эксплуатации определяется исходя из типа и сроков застройки в пределах выбранной площадки (например, предусматривается застройка части площадки, другая часть будет застраиваться позже); существующей застройки вокруг выбранной площадки и намечаемой в перспективе застройки (например в соответствии с генеральным планом). Учет динамики застройки при прогнозных проработках изменения УГВ имеет важное значение, т.к. дополнительное строительство может изменить принятые граничные условия и существенно повлиять на режим грунтовых вод в пределах выбранной площадки. Степень вероятности (% обеспеченности) прогнозного уровня должна определяться совместно проектирующей и изыскательской организациями в каждом конкретном случае с учетом существующих внутренних и внешних граничных условий и возможного их изменения.

Результат прогноза должен представляться в виде карт прогнозных УГВ, формирующихся под действием всех режимообразующих факторов, и карт прогнозных уровней с выбранной степенью обеспеченности влияния каждого из основных режимообразующих факторов. В случае, если уровенный режим грунтовых вод в годовом разрезе характеризуется значительными сезонными колебаниями уровня, то кроме вышеназванных карт следует составлять карты прогнозных уровней на характерные периоды времени. Такие данные являются основанием для выбора проектировщиками расчетных УГВ.

1.15. Основным вариантом календарного прогноза является учет всех составляющих водного баланса вероятностью P=50%. Прогноз выполняется до наступления стабилизации прогнозного уровня грунтовых вод. Необходимо рассматривать также вариант с учетом максимальных значений основных природных и техногенных режимообразующих факторов – атмосферные осадки, сток или инфильтрация принимается вероятностью P=1% (максимальные), испарение – вероятностью P= 99% (минимальные). По

времени максимальные условия накладываются на год, когда наступает стабилизация прогнозного уровня.

1.16. Вероятностный прогноз основывается на многолетних наблюдениях за подземными водами на постоянно действующей режимной сети станций Мингео СССР, Минводхоза СССР. Здесь путем обработки наблюдений методами математической статистики вычисляют уровни вероятностью один раз в 10, 25, 50 и более лет. При этом проявление гидрогеологической характеристики данной вероятности не связано с календарными датами и может проявиться в любой год.

1.17. Под расчетными уровнями следует понимать прогнозные уровни, выбираемые проектировщиками для расчета проектов водопонижения на период строительства и комплекса защитных мероприятий против подтопления на период эксплуатации застроенной территории. Расчетные уровни могут приниматься в целом для площадки (района) строительства и для отдельных зданий, сооружений в зависимости как от экономических показателей прорабатываемых различных вариантов капитального строительства и комплекса защитных сооружений, так и от необходимости нормального функционирования всей застраиваемой и уже застроенной территории.

1.18. Прогноз уровенного режима грунтовых вод необходимо выполнять для территории всего города или его районов в пределах естественных и искусственных гидродинамических границ первого от поверхности водоносного горизонта с учетом перспективного освоения территории [65, 78]. В таком случае отпадает необходимость выполнять гидрогеологические прогнозы для отдельных площадок (здание, сооружение, микрорайон, промышленные площадки). Это положение обусловливает проведение инженерно-гидрогеологических изысканий для решения основных задач: определения расчетных гидрогеологических параметров водовмещающих пород и грунтов зоны аэрации, изучения уровенного режима подземных и поверхностных вод, оценки взаимосвязи грунтовых вод с подземными водами нижележащих водоносных горизонтов и поверхностными водами количественной оценки балансовых составляющих питания и разгрузки грунтовых вод.

1.19. Приходные и расходные статьи баланса грунтовых вод являются результирующими общего водного баланса городской территории. Они должны рассчитывать для трех ярусов: поверхности городской территории, зоны аэрации и поверхности грунтовых вод (табл. 1).

Основные естественные и техногенные факторы, определяющие приходные и расходные статьи общего водного баланса городской территории приведены в общем классификаторе процесса подтопления (табл. 2).

1.20. Составляющие баланса от действия разнообразных техногенных факторов в условиях городской застройки мало изучены, т.к. нет городов, где комплексная режимная сеть построена и постоянно функционирует.

При проектировании и выполнении комплексных гидрогеологических изысканий для прогноза подтопления и обоснования проекта защитных мероприятий следует исходить из особенностей застройки городской территории, оказывающей существенное влияние на баланс грунтовых вод. Эти особенности обосновывают выбор балансовых площадок и методики исследований по оценке составляющих баланса в пределах границ городской территории (принимаются в соответствии с генеральным планом) выделяя основные зоны застройки.

Первая – зона завершенной застройки (возможно строительство только отдельных зданий, сооружений). Техногенный тип режима грунтовых вод установившийся или наблюдаются определенные закономерности в подъеме (снижении) уровня.

Вторая – районы старой застройки. Генеральным планом предусматривается реконструкция застройки или ее снос и новое строительство. Режим грунтовых вод аналогичен режиму первой зоны. По окончанию реконструкции или нового строительства произойдет изменение уровенного режима грунтовых вод в связи с изменением приходных и расходных составляющих баланса под действием новых техногенных факторов. Для

Таблица 1. **Принципиальная схема составляющих водного баланса городской территории**

Приход	Расход
Поверхность земли	
Атмосферные осадки	Инфильтрация осадков, техногенных и конденсационных вод
Техногенные и конденсационные воды	Суммарное испарение
Приток поверхностных вод	Отток поверхностных вод
Зона аэрации	
Инфильтрация атмосферных осадков, техногенных и конденсационных вод	Суммарная инфильтрация на уровень грунтовых вод
Потери воды из поверхностных водотоков и водоемов	Суммарное испарение из зоны аэрации
Грунтовые воды	
Инфильтрация атмосферных осадков, техногенных и конденсационных вод	Испарение с уровня подземных вод
Потери воды из поверхностных водотоков и водоемов	Транспирация растениями
Приток подземных вод	Разгрузка подземных вод: в поверхностные водотоки и водоемы искусственными сооружениями родниками
	Отток подземных вод

прогнозных проработок уровенного режима в этой зоне необходимы данные количественной оценки составляющих баланса по режимным наблюдениям в первой зоне на участках с аналогичными условиями и типами застройки.

Третья – незастроенные (резервные) территории, на которых генеральным планом предусматривается современная застройка. В этой зоне наблюдается естественный режим грунтовых вод. В процессе нового капитального строительства и далее в процессе эксплуатации территории режим грунтовых вод претерпит определенные изменения. Для прогнозных проработок режима в этой зоне необходимы данные количественной оценки составляющих баланса по режимным наблюдениям в первой зоне на участках с аналогичными природными условиями и типами застройки.

1.21. В качестве основного метода прогноза уровенного режима грунтовых вод рекомендуется метод математического моделирования, реализуемый на АВМ и ЭВМ [27 – 29, 37, 65, 66, 70, 78], с привлечением методов аналогий и аналитических расчетов для оценочных прогнозов на ранних стадиях исследований.

Математическое моделирование позволяет подойти к созданию постоянно действующей геофильтрационной модели застроенной территории. Создание такой модели позволяет: учесть любые изменения (конкретизировать в пространстве и времени) внутренних и внешних граничных условий в пределах всей территории путем ввода в модель дополнительной информации, получаемой в процессе изысканий и комплексных режимных наблюдений на постоянно действующей режимной сети; выявить рациональность инженерной защиты с точки зрения эффективности ее эксплуатации, соблюдения природоохранных, санитарно-гигиенических требований; оптимизировать компоновку, конструкцию и режим работы защитных сооружений.

Таблица 2. **Общий классификатор процесса подтопления**

Приходные статьи баланса								
инфильтрационное питание					потери воды из водотоков и водоемов	приток подземных вод		приток поверхностных вод
атмосферные осадки	техногенные воды			конденсационные воды				
Атмосферные осадки, выпадающие на поверхность. Коэффициент инфильтрации рассчитывается дифференцированно с учетом строения зоны аэрации, плотности застройки и инженерной подготовки территории	Водоподача по сетям водонесущих коммуникаций (водопровод, канализация, горячее водоснабжение) для каждого типа застройки территории	Утечки на сооружениях водопотребляющих производств ТЭЦ, станции очистки воды, насосные станции водопровода и канализации, очистные сооружения и др.	Полив зеленых насаждений общего пользования (скверы, бульвары, парки), орошение массивов сельскохозяйственных угодий	Накопление конденсационных вод в грунтах обратных засыпок, планировочных подсыпок; в естественных грунтах зоны аэрации на закрытых (асфальт, бетон и т.п.) и открытых (скверы, газоны и т.п.) площадях.	Потери воды (инфильтрационное питание и подпертая фильтрация) каналов и водохранилищ	Входной расход потока подземных вод на боковых границах	Переток напорных подземных вод через нижний водоупор	Входной расход поверхностных водотоков на границах области, соизмеримый с приходной частью водного баланса исследуемой территории

Продолжение табл. 2

Расходные статьи баланса						
испарение	транспирация растениями	отток поверхностных вод	разгрузка подземных вод		отток подземных вод	
Величина испарения определяется дифференцированно с площадей, свободных от застройки (парки, скверы, газоны) и закрытых (асфальт, бетон, кровельные покрытия зданий и сооружений и др.) с учетом строения зоны аэрации и глубины залегания грунтовых вод; с поверхностных водоемов	Определяется с учетом видов растительности дифференцированно по типам застройки территории и для незастроенных территорий	Выходной расход поверхностных водотоков на границах области соизмеримый с приходной частью водного баланса исследуемой территории	Разгрузка осуществляется в реки, каналы водохранилища, пруды озера, болота,дренирующие подземные воды	Отбор подземных вод искусственными сооружениями (водопонизительные дренажные системы водозаборы и др.)	Выходной расход потока подземных вод на боковых границах	Переток грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты через водоупор

1.22. Работы по получению исходных данных для моделей прогноза процесса подтопления городских территорий рекомендуется выполнять по следующей схеме:

сбор и анализ материалов изысканий прошлых лет, а также данных по существующей застройке территории и ее инженерной подготовке. В результате составляется комплекс предварительных карт масштаба 1:5000–1:25 000 (в зависимости от площади территории и стадии проектирования), отражающих природные условия и техногенную обстановку;

рекогносцировка выполняется при слабой гидрогеологической изученности территории для получения данных о гидрогеологических условиях и выявления подтапливаемых объектов. Если отсутствуют какие-либо данные по режиму грунтовых вод, то при рекогносцировке организуются режимные наблюдения за уровнем подземных вод по одному – трем опорным поперечникам на городской территории и на одном поперечнике на незастроенной территории;

гидрогеологическое районирование – выделение гидрогеологических районов в пределах естественных и искусственных гидродинамических границ первого от поверхности водоносного горизонта, составление предварительных расчетных геофильтрационных схем по каждому району для обоснования объемов опытно-фильтрационных работ и разработки проекта первой очереди комплексной режимной сети;

полевые работы выполняются по составленной программе для получения исходных данных для гидрогеологического районирования. Продолжительность режимных наблюдений один год;

предварительная оценка гидрогеологических условий каждого из районов – ориентировочный расчет баланса грунтовых вод, количественная оценка природных условий и техногенных факторов методами аналогий и моделирования. В результате: выделяются подтопленные, потенциально подтопляемые и неподтопляемые территории; обосновывается схема расположения наблюдательных пунктов второй очереди режимной сети; выбираются участки проведения опытно-фильтрационных работ для детализации гидрогеологический условий;

полевые работы по составленной программе – получение исходных данных для составления расчетной схемы прогноза. Продолжительность стационарных гидрогеологических и гидрометеорологических наблюдений не менее одного года. Таким образом, общая продолжительность наблюдений должна быть не менее двух лет;

составление окончательной расчетной геофильтрационной схемы и идентификационные исследования методами математического моделирования – решение стационарных и нестационарных геофильтрационных задач для уточнения расчетных гидрогеологических, гидрологических параметров, граничных условий и составляющих баланса[1] грунтовых вод.

2. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОДТОПЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

2.1. Имитационный подход к исследованию и прогнозу процесса подтопления городов, когда в пределах значительных по размерам территорий необходимо учитывать сложный характер взаимодействия природных условий и техногенных режимообразующих факторов, причем последние меняются во времени, выполним лишь методами математического моделирования, реализация которых предпочтительнее на ЭВМ. Математическое моделирование позволяет воспроизводить на ЭВМ (АВМ) процесс подтопления:

уже сформировавшийся, т.е. решать нелинейные стационарные задачи, в результате которых, с целью уточнения расчетных фильтрационных пара-

---

[1] Баланс грунтовых вод необходимо рассчитывать по данным режимных наблюдений и корректировать на моделях прогноза при решении обратных задач.

метров и выявления мест расположения и величин источников подтопления строятся имитационные модели идентификации коэффициентов фильтрации (водопроводимости) водоносных горизонтов, коэффициентов перетока разделяющих водоносные горизонты слабопроницаемых прослоев, фильтрационных проводимостей подрусловых отложений и величин утечек из водонесущих коммуникаций;

формирующийся в наблюдаемый эпигнозный период, т.е. решать нестационарные задачи, в результате которых строится имитационная модель идентификации наблюдаемых уровенных режимов грунтовых вод с целью уточнения коэффициентов свободной и упругой водоотдач, инфильтрации атмосферных осадков и параметров испарения с уровня грунтовых вод;

формирующийся в прогнозные периоды и до стабилизированного положения без исследования динамики процесса, т.е. решать соответственно стационарные задачи, в результате которых строятся имитационные модели формирования прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод и оценки влияния природных режимообразующих факторов и утечек из водонесущих коммуникаций на формирование прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод, прогноза гидрогеологических условий, оценки потенциальной подтопляемости территорий.

2.2. Имитационная модель идентификации коэффициентов фильтрации (водопроводимости) водоносных горизонтов, коэффициентов перетока разделяющих водоносные горизонты слабопроницаемых прослоев, фильтрационных проводимостей подрусловых отложений – величин утечек из водонесущих коммуникаций представляется в виде атласов:

факторно-диапазонных оценок, состоящих для каждого параметра из карт машинных выдач – величин отклонений в каждом блоке сеточной модели природных отметок от модельных при пофрагментном воспроизведении на ЭВМ стационарных геофильтрационных процессов с различными значениями идентифицируемых параметров;

совместно-корректировочных оценок, состоящих из аналогичных карт машинных выдач при воспроизведении на ЭВМ стационарных геофильтрационных процессов в условиях различного сочетания идентифицируемых параметров.

2.3. Имитационная модель идентификации наблюдаемых уровенных режимов грунтовых вод представляется в виде факторно-диапазонных, совместно-корректировочных и проверочных оценок функций влияния характеризующих изменение уровня грунтовых вод в сети режимных гидрогеологических скважин при различных значениях и сочетаниях коэффициентов свободной и упругой водоотдач, инфильтрации атмосферных осадков и испарения с уровня грунтовых вод. Оценками функций влияния являются амплитуды уровней грунтовых вод в пределах временных интервалов, дискретно аппроксимирующих эпигнозный уровенный режим. В качестве эпигнозного выбираются уже сформировавшийся и наблюдаемый в природе фильтрационный процесс.

Выбираемый период должен быть представительным в смысле отражения влияния тех искомых параметров и режимообразующих факторов. В динамике формирования уровенного режима грунтовых вод в эпигнозный период должен учитываться (вместе с параметрами водоносного пласта) режим поверхностных водотоков, инфильтрации атмосферных осадков и испарения с уровня грунтовых вод. При этом желательно, чтобы в пределах выбранного эпигнозного периода можно было бы выделить временные моменты с самостоятельным независимым влиянием каждого естественного режимообразующего фактора на режим уровня грунтовых вод и моменты, используемые для проверки индентифицируемых параметров. Длительность эпигнозного периода должна охватить как минимум двухлетний цикл режимных наблюдений. Внутри этого периода представляется возможным выделить временные интервалы в уровенном режиме грунтовых вод, формирующемся при раздельном и совместном влиянии режимообразующих факторов в их различном сочетании. Дискретная аппроксимация эпигнозного периода выполняется в соответствии с необходимостью детального учета изменений временных интервалов в режиме грунтовых вод по которым сопоставляются факторно-диапазонные, совместно-корректировочные и проверочные оценки.

Для получения факторно-диапазонных оценок исследуемая область фильтрации районируется на зоны независимого влияния искомых расчетных параметров и граничных условий на формирование уровенного режима грунтовых вод. Районирование осуществляется в следующей последовательности. Вначале выделяются зоны относительно определяющего фактора с учетом его площадного размещения или приуроченности к тем или иным природным и техногенным условиям рассматриваемой территории. Затем путем многократного воспроизведения на ЭВМ нестационарного режима фильтрации подземных вод в течение эпигнозного периода (при задании различных значений определяющего фактора последовательно в каждой предварительно выделенной зоне, а сопутствующего фактора – во всей области) уточняются границы зон.

Получение факторно-диапазонных оценок в виде функций влияния от изменения коэффициентов свободной и упругой водоотдач, инфильтрации атмосферных осадков и параметров задания испарения с уровня грунтовых вод осуществляется путем воспроизведения режима фильтрации вод при варьируемых значениях водоотдачи, инфильтрации и испарения. Диапазон варьируемых значений должен охватывать реально возможные величины оцениваемых факторов при различных видах внешних плановых границ. Результатом являются оценки степени раздельного влияния водоотдачи, инфильтрации атмосферных осадков и испарения на формирование уровенного режима грунтовых вод в течение эпигнозного периода.

Получение совместно-корректировочных оценок осуществляется путем воспроизведения режима фильтрации грунтовых вод при различном сочетании совместно влияющих идентифицируемых параметров в соответствии с данными их факторно-диапазонных оценок. Решение контролируется по отклонениям модельных и натурных амплитуд изменения уровня грунтовых вод в гидрогеологических скважинах относительно начальной поверхности. Натурные амплитуды изменения уровня грунтовых вод осредняются в течение дискретно заданного периода времени в соответствии со ступенчатой аппроксимацией непрерывной функции изменения граничных условий при задании их на ЭВМ. В качестве завершающего принимается корректировочный вариант, в котором достигнуты, во-первых, идентичные направленности модельного и натурного режимов уровня грунтовых вод, т.е. наблюдаемые в природе периоды подъема, снижения и стабилизации в графике колебаний уровня грунтовых вод должны быть соответственно получены и на ЭВМ; и, во-вторых, минимальные расхождения между модельными и природными амплитудами изменения уровня грунтовых вод.

Получение проверочных оценок осуществляется путем воспроизведения на ЭВМ наблюдаемого в проверочный временной интервал эпигнозного периода уровенного режима грунтовых вод с параметрами завершающего совместно-корректировочного варианта. Имитационная модель идентификации наблюдаемых уровенных режимов формируется в виде таблицы, в которой для каждой скважины вышеназванные оценки приведены в соответствии с характеризуемыми ими временными интервалами дискретной аппроксимации эпигнозного уровенного режима.

2.4. Имитационное исследование идентифицируемых параметров и уровенных режимов наблюдаемых геофильтрационных процессов позволяет уточнить:

расчетные фильтрационные параметры; коэффициенты фильтрации, водопроводимости, водоотдачи водоносных горизонтов, перетока слабопроницаемых разделяющих прослоев, сопротивления подрусловых отложений поверхностных водотоков;

источники, обусловливающие как питание грунтовых вод за счет поступления из поверхностных водотоков, инфильтрации атмосферных осадков и утечек из водонесущих коммуникаций, так и их разгрузку за счет дренирования поверхностными водотоками и испарения с отражением характера изменения всех факторов во времени. Модельная поверхность уровней грунтовых вод на конец эпигнозного периода идентифицированного уровенного режима является исходной для имитационного представления прогноза процесса подтопления.

2.5. Имитационная модель формирования прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод строится для городских территорий с существующей и проектной застройкой с известными датами ввода микрорайонов в эксплуатацию. С учетом динамики застройки микрорайонов воспроизводится прогнозируемый процесс подтопления путем численного решения на ЭВМ нестационарных задач геофильтрации. В качестве источников, вызывающих процесс подтопления, принимаются природные режимообразующие факторы и утечки из водонесущих коммуникаций, величины которых, выраженные в % от расхода в коммуникациях, определяются в результате решения инверсных задач.

Для воспроизведения на ЭВМ утечек из водонесущих коммуникаций при построении сеточной модели исследуемой области фильтрации застраиваемые микрорайоны аппроксимируются соответствующими блоками, в которых задаваемые утечки распределяются пропорционально протяженности водонесущих коммуникаций и расходам воды в них.

Природные факторы в воспроизведении процесса подтопления участвуют в соответствии с их естественным режимом в годовом разрезе, повторяясь из года в год в течение всего периода застройки территории. Через год после начала строительства последнего микрорайона воспроизведение процесса подтопления продолжается при полностью введенных утечках из водонесущих коммуникаций и различных сочетаниях природных режимообразующих факторов с обеспеченностями и продолжительностями приводящими к наиболее неблагоприятным уровенным режимам грунтовых вод.

Уровенный режим рассматривается каждый год в течение всего прогнозируемого периода.

Имитационная модель состоит из атласов прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод в годовом разрезе в течение всего времени застройки территории, а после завершения застройки – на временные периоды формирования наиболее неблагоприятного уровенного режима грунтовых вод. Прогнозируемые уровенные режимы характеризуются величинами подъема уровня грунтовых вод относительно своих весенних минимальных отметок и абсолютными отметками УГВ, сформировавшимися за периоды действия каждого природного режимообразующего фактора в комплексе с постоянно действующими утечками, а также в период их самостоятельного влияния.

Атлас каждого прогнозируемого режима УГВ представлен комплексом карт машинных выдач, содержащих в каждом блоке модели исследуемой территории на соответствующие временные периоды абсолютные отметки и величины подъема УГВ.

2.6. В условиях формирования уровенных режимов грунтовых вод под влиянием подпора от водохранилища имитационная модель строится так, чтобы получить представление о динамике развития процесса подтопления в течение прогнозируемого периода при:

нормальном подпертом горизонте;

естественном режиме водотоков с расчетными обеспеченностями наиболее высоких уровней, накладываемых на НПГ;

том же самом, совместно с осадками и варьированием величин испарения.

Прогнозируемый период формирования уровенного режима под влиянием НПГ охватывает время от начала подпора до наступления стационарного положения в уровенной поверхности грунтовых вод. Остальные уровенные режимы могут прогнозироваться в течение одного года от стационарного при НПГ положения уровня грунтовых вод, поскольку режим факторов, формирующих прогнозируемые режимы, принимается низкой обеспеченности. Временные интервалы аппроксимации прогнозируемых периодов должны отразить волновой характер уровенного режима грунтовых вод и продвижение его максимальных отметок во времени и по площади, а тем самым оценить продолжительность любой прогнозируемой поверхности грунтовых вод.

2.7. Вышеизложенная имитация прогнозируемого развития процесса подтопления, происходящего под влиянием утечек из водонесущих коммуникаций и при различной вероятности природных факторов, позволяет

получить детальное количественное представление о динамике формирования любой точки исследуемой территории:

уровенных режимах грунтовых вод в годовом разрезе в течение всего времни застройки территории (при природных режимообразующих факторах 50% обеспеченности), а после застройки – об уровенных режимах, приводящих к максимально высоким расчетным положениям уровня грунтовых вод;

наиболее неблагоприятном уровенном режиме грунтовых вод в годовом разрезе в течение любого времени застройки территории. При этом прогнозируется поверхность максимально высоких абсолютных отметок уровней грунтовых вод и участки установления их на отметках поверхности земли с указанием продолжительности высокого стояния. Для каждого прогнозируемого уровенного режима грунтовых вод приводится оценка динамики балансовых составляющих.

2.8. Имитационная модель оценки влияния природных режимообразующих факторов и утечек из водонесущих коммуникаций на формирование прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод является логическим дополнением к их имитационной модели и, естественно, строится для территорий с существующей застройкой и уже спроектированной с известными датами ввода микрорайонов в эксплуатацию, используя ранее выполненные районирование и модельную аппроксимацию исследуемой территории по хронологии ее освоения.

Практическое построение имитационной модели осуществляется путем многократного воспроизведения на ЭВМ процесса подтопления, развивающегося под влиянием перебора различных соотношений природных и техногенных режимообразующих факторов, которые были использованы при построении имитационной модели формирования прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод. Характер формирования перебора сочетаемых факторов обусловливается требованием получить представление о режиме амплитуд уровня грунтовых вод раздельно от каждого фактора в течение всего времени застройки территории.

Имитационная модель состоит из атласов оценок влияния соответствующих режимообразующих факторов на формирование прогнозируемых при развитии процесса подтопления уровенных режимов грунтовых вод в годовом разрезе для всего периода застройки территории.

Оценки влияния характеризуются величинами подъема уровня грунтовых вод относительно весенних минимальных отметок соответствующих лет и абсолютными отметками УГВ, сформировавшимися за периоды действия каждого природного режимообразующего фактора.

Атлас каждого годового режима оценок влияния рассмотренных сочетаний техногенных и природных факторов на формирование прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод представлен комплексом карт машинных выдач, содержащих во всех блоках модели исследуемой территории на определенные временные периоды абсолютные отметки и величины подъема УГВ.

Вышеизложенная имитация развития процесса подтопления позволяет:

количественно оценить пространственно-времнное раздельное и совместное (в любом сочетании) влияние природных и техногенных режимообразующих факторов на прогнозируемые уровенные режимы грунтовых вод;

целенаправленно вести инженерные изыскания, сосредоточив внимание на изучении фактора, являющегося определяющим в развитии подтопления;

подтвердить правильность принятой методологии прогноза уровенных режимов грунтовых вод и гидрогеологических условий при развитии процесса подтопления;

2.9. Имитационная модель прогноза гидрогеологических условий, формирующихся при развитии процесса подтопления под влиянием природных режимообразующих факторов различной обеспеченности и утечек из водонесущих коммуникаций с учетом динамики застройки микрорайонов, строится для городских территорий с существующей застройкой и уже спроектированной с известными датами ввода микрорайонов в эксплуатацию.

По своей структуре имитационная модель формируется из последовательно прогнозируемых гидрогеологических условий для периодов:

завершения строительного освоения территорий;

стабилизации подтопления, обусловленного утечками из водонесущих коммуникаций после завершающегося освоения территории;

формирования максимально высокого расчетного положения уровней грунтовых вод.

Та часть данной имитационной модели, которая представляет гидрогеологические условия, прогнозируемые на период завершения строительства территории, полностью соответствует имитационной модели формирования уровенных грунтовых вод, прогнозируемых на этот период, и аналогична методике их построения.

Имитация развития процесса подтопления позволяет в любой точке исследуемой территории:

прогнозировать наиболее неблагоприятные гидрогеологические условия и соответствующие им максимально высокие поверхности УГВ, которые сформировались при развитии процесса подтопления под совместным и раздельным влиянием техногенных и природных источников подтопления;

оценить степень влияния каждого источника подтопления;

прогнозировать наиболее неблагоприятный уровенный режим грунтовых вод (с привлечением имитационной модели формирования прогнозируемых уровенных режимов грунтовых вод);

обосновать схему размещения защитных сооружений по борьбе с подтоплением.

2.10. Имитационная модель оценки потенциальной подтопляемости строится для территорий как с уже запроектированными микрорайонами, так и перспективными для проектирования городской застройки и, соответственно, состоит из двух частей.

Структура первой части модели формируется из последовательно прогнозируемых оценок потенциальной подтопляемости по каждому микрорайону (без учета влияния подтопления других микрорайонов) на периоды:

стабилизации подтопления, обусловленного утечками из водонесущих коммуникаций;

формирования максимально высокой уровенной поверхности грунтовых вод от установившейся поверхности на предыдущем периоде.

Построение этой части имитационной модели осуществляется в начальной стадии путем поочередного воспроизведения на ЭВМ в нелинейной стационарной постановке процесса подтопления в каждом предварительно выделенном участке. Участок может объединять один или несколько рядом расположенных микрорайонов, вне зависимости от года ввода их в эксплуатацию, лишь бы они находились в общей зоне взаимовлияния. В качестве источников, вызывающих процесс подтопления, принимаются утечки (нормативные, либо определенные по результатам идентификационных исследований) из водонесущих коммуникаций, которые в зависимости от характера застройки приурочены к выделенным участкам.

Прогнозируемые при этом во всей исследуемой территории установившиеся поверхности уровней грунтовых вод являются исходными для завершающей стадии построения первой части имитационной модели. На этой стадии построение ведется также путем поочередного воспроизведения на ЭВМ в нестационарной постановке процесса подтопления в каждом участке от соответствующей установившейся поверхности уровней грунтовых вод. Процесс прогнозируется под влиянием только природных режимообразующих факторов с принятыми обеспеченностями и продолжительностями, которые приводят к максимально высоким положениям уровней грунтовых вод. Первая часть имитационной модели в соответствии с ее структурой состоит из атласов оценок потенциальных техногенных уровней грунтовых вод при:

стабилизации подтопления, обусловленного утечками из водонесущих коммуникаций в запроектированных микрорайонах;

действии после стабилизации подтопления наиболее неблагоприятных природных режимообразующих факторов.

Атласы содержат прогнозируемые в результате поочередного воспроизведения на ЭВМ процесса подтопления каждого выделенного участка установившиеся и максимально высокие уровенные поверхности грунтовых вод, а также величины подъема относительно соответствующих начальных условий.

Структура второй части модели формируется из последовательно прогнозируемых оценок потенциальной подтопляемости по каждому участку перспективному для проектирования микрорайонов (без учета и с учетом влияния подтопления окружающих его запроектированных микрорайонов) на периоды:

стабилизации подтопления, обусловленного специально выбранной серией утечек из водонесущих коммуникаций.

формирования максимально высоких уровенных поверхностей грунтовых вод от установившихся на предыдущем периоде поверхностей.

На предполагаемой для застройки территории целесообразно рассматривать выделенные внутри геоморфологических элементов участки с идентичным геолого-литологическим разрезом на уже застроенной территории.

Построение второй части имитационной модели аналогично первой, но при этом необходимо в каждом участке, перспективном для застройки, а также выделенном геоморфологическом элементе воспроизвести на ЭВМ процесс подтопления как в нелинейной стационарной постановке, так и нестационарной (повторяется для условий отсутствия и наличия влияния подтопления запроектированных микрорайонов в соответствии с выбранной серией утечек из водонесущих коммуникаций).

Для получения оценок потенциальной подтопляемости участков перспективной застройки с учетом влияния подтопления окружающих их запроектированных микрорайонов воспроизведение на ЭВМ процесса подтопления осуществляется при одновременном задании утечек из водонесущих коммуникаций в блоках, аппроксимирующих участки перспективной и запроектированной застройки.

Содержание атласов второй части имитационной модели также аналогично первой имитационной модели, только прогнозируемые для каждого блока сеточной модели величины подъема и поверхности уровней грунтовых вод приведены в соответствии с задаваемыми при имитации подтопления значениями утечек из водонесущих коммуникаций.

Кроме того, имитационная модель, трансформированная непосредственно для участков, по которым оценивается потенциальная подтопляемость, может быть представлена таблицей матричного типа. В ней векторы – строки модельных блоков, аппроксимирующих каждый выделенный участок, содержат в развернутом виде прогнозируемые установившиеся величины подъема уровня грунтовых вод. Все оценки потенциальной подтопляемости сопровождаются балансовыми составляющими. Матричное выражение оценки потенциальной подтопляемости дает возможность выявить микрорайоны со взаимовлияющим подтоплением и определить результирующую величину подъема уровня грунтовых вод.

Вышеизложенная имитация развития процесса подтопления позволяет:

оценить в виде максимальных величин подъема уровней грунтовых вод и их абсолютных отметок потенциальную подтопляемость каждого запроектированного микрорайона и участков перспективной застройки с выявлением зон распространения развивающегося в них подтопления;

получить обоснование этажности домов в запроектированных микрорайонах и проектируемых на участках перспективной застройки;

наметить перспективу застройки территории.

2.11. Выполняемый вышеперечисленными четырьмя видами имитационных моделей прогноз процесса подтопления грунтовыми водами городских территорий позволяет:

получить детальное количественное представление о динамике формирования в любой точке исследуемой территории уровенных режимов грунтовых вод в годовом разрезе в течение всего времени застройки территории (при природных режимообразующих факторах 50% обеспеченности), а после застройки – об уровенных режимах, приводящих к максимально высоким положениям уровня грунтовых вод;

определить наиболее неблагоприятный уровенный режим грунтовых вод в годовом разрезе в течение любого времени застройки территории;

выявить наиболее неблагоприятные гидрогеологические условия и соответствующие им максимально высокие поверхности уровней грунтовых вод, которые могут сформироваться при развитии процесса подтопления под совместным и раздельным влиянием техногенных и природных источников подтопления;

количественно оценить пространственно-временное раздельное и совместное (в любом сочетании) влияние природных и техногенных режимообразующих факторов на прогнозируемые уровенные режимы грунтовых вод и изменения гидрогеологических условий;

оценить потенциальную подтопляемость каждого запроектированного микрорайона и участков перспективной застройки с выявлением зон развивающегося в них подтопления;

целенаправленно вести инженерные изыскания, сосредоточив внимание на изучении факторов, являющихся определяющими в развитии подтопления;

обосновать схему размещения защитных сооружений и управления уровенным режимом грунтовых вод.

2.12. Практическая реализация имитационного исследования и прогноза процесса подтопления городских территорий грунтовыми водами требует соответствующего специфического гидролого-гидрогеологического и техногенного обоснований.

3. ИСХОДНАЯ ФАКТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯ ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ПОДТАПЛИВАЕМЫХ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ, ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА ПОДТОПЛЕНИЯ

3.1. Характеристика природных условий должна составляться по данным гидрогеологических изысканий последовательно, начиная со сбора и анализа материалов [65, 78] региональных и специальных исследований, предшествующих инженерных изысканий в пределах района работ и прилегающих территорий и далее по этапам полевых работ непосредственно на исследуемой территории для целей прогноза подтопления.

Исходная фактическая информация по природным условиям должна включать сведения по рельефу, гидрографической сети, климату, геологическому строению, геоморфологии и гидрогеологическим условиям.

Характеристика рельефа заключается в описании основных форм рельефа, их превышений по отношению к гидрографической сети; оценке дренированности территорий (степени расчлененности рельефа гидрографической сетью), которая характеризуется средней протяженностью овражно-балочной и речной сети на единицу площади каждого генетического типа рельефа, глубинами вреза эрозионной сети, а также общей выровненностью или всхолмленностью территории. Степень расчлененности территории определяет процент атмосферных осадков, расходуемых непосредственно на поверхностный сток, скорость водообмена подземных вод, интенсивность спада и подъема уровней подземных вод. Должна быть дана характеристика техногенных изменений рельефа: засыпанных дрен, планировочных подсыпок, искусственных выемок и насыпей.

Характеристика системы постоянно и временно действующих водотоков и водоемов должна быть дана по морфологическим параметрам: ширине и глубине водотоков, скорости течения, уклонам водной поверхности; расходу водных потоков и их внутригодовому распределению; паводочному и ледовому режимам. По данным гидрологических исследований должна быть составлена карта современной гидрографической сети, на которой отображаются естественные и искусственные водотоки и водоемы.

Характеристика климатических условий производится по данным метеостанций: температуре воздуха, относительной и абсолютной влажности, недостатку насыщения, количеству осадков, испарению с грунта и водной поверхности, температурному режиму грунтов (средние месячные, средние

многолетние, минимальные и максимальные значения), датам появления и схода снежного покрова, величине запаса воды в снежном покрове.

Характеристика геологического строения и литологического состава пород дается до кровли местного или первого (от поверхности) регионального водоупора. Показывается стратиграфическое расчленение разреза, описываются закономерности распространения в плане и вертикальном разрезе отдельных литологических разностей пород, выявляются тектонические особенности, определяющие гидродинамические условия района. Если установлена взаимосвязь первого от поверхности водоносного горизонта с нижележащим водоносным горизонтом, то геолого-литологический разрез характеризуется до кровли следующего водоупора, соответственно с меньшей степенью детальности.

Составляются карты: геологическая, четвертичных отложений, изолиний кровли и подошвы водоупоров.

Характеристика геоморфологического строения территории должна включать описание генетических типов и форм рельефа, условия их образования и зависимость форм рельефа от состава пород. Подробно освещаются речные долины – указывается количество и типы террас, их ширина, высота, характер поверхности и сочленения друг с другом. Отмечается влияние геоморфологических условий района на глубину залегания подземных вод, условия их питания и разгрузки. Дается характеристика современных физико-геологических процессов и отмечается их влияние на гидрогеологические условия района. Составляется геоморфологическая карта.

Характеристика гидрогеологических условий дается в динамике их изменения от начала освоения территории и до окончания изысканий непосредственно для прогноза подтопления.

Изучаются:

распространение и глубина залегания водоносных пластов, горизонтов и комплексов;

состав водовмещающих пород и грунтов зоны аэрации, их мощность;

распространение, глубина залегания, мощность местного и регионального водоупоров (менее проницаемых слоев);

положение уровней подземных вод и их режим в естественных и нарушенных условиях: закономерности сезонных (годовая амплитуда, амплитуда весеннего подъема уровня, время начала подъема уровня, характеристика снижения уровня в годовом разрезе) и многолетних колебаний уровня подземных вод;

питание подземных вод (инфильтрационное питание – просачивание атмосферных осадков и техногенных вод через зону аэрации, локальное фильтрационное питание из поверхностных водотоков и водоемов; перетекание из нижележащих напорных водоносных горизонтов через менее проницаемые слои; конденсационное питание);

разгрузка подземных вод (разгрузка в виде родников, испарения, транспирации растениями; скрытая разгрузка в поверхностные водотоки и водоемы; перетекание в нижележащие водоносные горизонты на площадях развития депрессионных воронок и в "окна" водоупора);

режим влажности в зоне аэрации в естественных и нарушенных условиях;

химический состав подземных вод и его изменение во времени.

Кроме этих сведений должны быть охарактеризованы гидрогеологические параметры[1] водоносных горизонтов и грунтов зоны аэрации, методика их определения, выбор расчетных значений для прогноза. Гидрогеологические параметры: коэффициенты фильтрации, водопроводимости, водоотдачи, недостатка насыщения, упругой водоотдачи, уровнепроводности и пьезопроводности, параметр перетекания (коэффициент перетекания), параметр гидравлической связи поверхностных и подземных вод (гидравлические сопротивления днищ водоемов).

[1] Гидрогеологические параметры – численные показатели, характеризующие фильтрационные свойства грунтов (горных пород) или гидродинамические свойства водоносных горизонтов.

Соответственно составляются карты: гидрогеологическая (при сложных гидрогеологических условиях – комплекс гидрогеологических карт), мощности водоносных горизонтов, распределения гидрогеологических параметров, гидроизогипс на характерные периоды сезонных колебаний уровня подземных вод, районирования территории по типам режима грунтовых вод.

В зависимости от сложности природных условий района исследований, стадии исследований, объема и достоверности имеющейся информации состав вышеперечисленных данных может существенно изменяться.

3.2. Для оценки составляющих баланса грунтовых вод на городской территории под действием техногенных факторов (см. табл. 2) требуется сбор и обобщение материалов по техногенным факторам. В итоге составляется комплекс техногенных карт: застройки территории, водонесущих коммуникаций и внутригородских бассейнов стока. Методика составления карт разработана в ПНИИИС [77]. Масштаб карт при изучении всей городской территории – 1:10 000 – 1:25 000 (в зависимости от площади территории города), для отдельных районов города (планировочный район; микрорайоны) детальность карты увеличивается (1:1000 – 1:5000). Такие карты составляются на основе сбора и анализа материалов в отделе главного архитектора (генеральный план города и другие материалы), в проектных организациях (например, Гражданпроект), в различных организациях коммунального хозяйства, на крупных промышленных предприятиях. Часть весьма важной информации может быть получена по данным инженерно-геологических и специальных изысканий, выполнявшихся по выявлению причин изменения гидрогеологических условий и обоснованию проектов защитных мероприятий.

3.3. В основу легенды карты застройки территории положены тип этажности селитебной застройки и тип промышленных предприятий, для которых разработаны нормы водопотребления.

Типы селитебной застройки: одноэтажная (индивидуальная) с приусадебными участками; двух-трехэтажная (старая); трех-пятиэтажная (новая); многоэтажная (7 – 9 этажей и более). Каждый тип застройки в пределах площади, ограниченной соответствующим контуром, характеризуется следующими данными: дата окончания строительства (фактическая или проектная), общая площадь, га; коэффициент плотности застройки (отношение суммарной площади непосредственно зданий (сооружений) и асфальтобетонных покрытий к общей площади типа застройки); площадь асфальтобетонных покрытий (площадки, проезды, улицы, дороги), га; площадь озеленения (скверы, парки, газоны и т.п.), га; преобладающая глубина заложения фундаментов, подземных сооружений, м; контуры свайных полей. Если позволяет масштаб карты, то эти сведения конкретизируются на карте для каждого объекта.

Важное значение имеет детализация данных по зданиям, сооружениям глубокого заложения и подземным сооружениям (построенным и проектируемым), которые могут оказывать барражный эффект на поток грунтовых вод (помещения складские и культурно-бытового назначения, гаражи, хранилища, транспортные коммуникации – тоннели различного назначения и др.). Этими данными являются контуры здания (сооружения) глубина заложения, технические мероприятия по их защите, величины водопритока в горные выработки, влияние водоотлива на формирование депрессионных воронок. Эти данные могут отображаться на картах или приводиться в специальных таблицах по каждому объекту.

Для каждой выделенной площади указывается количество (фактичекое и проектное) подаваемой и отводимой воды, $м^3$/сут. Кроме того на карте выделяются зеленые насаждения общего пользования (скверы, бульвары, парки, лесопарки) с указанием интенсивности поливов (фактической или проектной в соответствии с табл. 6 СНиП II-31-74), $м^3$/сут; реконструируемые или намечаемые к реконструкции территории; резервные (незастроенные) территории.

Площадки промышленных предприятий (существующие и проектируемые) выделяются на карте соответствующими контурами. На первом

Таблица 3. Классификация предприятий по плотностти застройки

Отрасль промышленности	Плотность застройки, %
Текстильная, легкая, частично стройматериалов	55 – 65
Машиностроительная, станкостроительная, пищевая, стройматериалов	45 – 50
Целлюлозно-бумажная, металлургическая, химическая, нефтехимическая, трубопрокатные заводы, цементные заводы, частично стройматериалов	30 – 40
Элеваторы, мелькомбинаты, крупзаводы, хлебоприемные пункты	40

Таблица 4. Классификация предприятий по водопотреблению

Отрасль промышленности	Система водоснабжения	Количество систем коммуникаций		Расход воды, $м^3$/сут на 1 га
		водопровода	канализации	
Целлюлозная, энергетическая, металлургическая (частично)	Оборотная, комбинированная	5 – 7	3 – 6	15 000 – 80 000
Химическая, нефтехимическая, горно-обогатительные фабрики и комбинаты (ГОКи)	То же	4 – 6	3 – 7	5000 – 15000
Машиностроительная, станкостроительная, трубопрокатные заводы, пищевая (частично)	Прямоточная (реже оборотная)	1 – 4	2 – 6	500 – 5000
Текстильная, легкая, стройматериалов, пищевая	Прямоточная	1 – 3	1 – 3	50 – 500
Элеваторы, мукомольные заводы, хлебоприемные пункты	"	1	1	50

этапе исследований при предварительной оценке изменения гидрогеологических условий (например, оценка потенциальной подтопляемости) территории данные по плотности застройки и водопотреблению воды для этих площадок могут быть приняты в соответствии с существующими классификациями промышленных предприятий [70] по плотности застройки (табл. 3) и по водопотреблению (табл. 4).

Необходимо иметь в виду, что по промышленным площадкам, площадь которых превышает 100 га и водопотребление более 500 $м^3$/сут на 1 га, даже на первом этапе исследований требуется нанесение на карту всех зданий, цехов, сооружений, водонесущих коммуникаций и оценка водопотребления каждого из них по результатам обследования по аналогии с вышеприведенными данными для зон селитебной застройки. В дальнейшем при составлении расчетной схемы прогноза такая детализация должна быть выполнена по всем промышленным площадкам.

Для существующих водопотребляющих производств (ТЭЦ, станции очистки воды, очистные сооружения канализации, насосные станции подачи воды, поля фильтрации и т.п.), которые не отражены в вышеуказанной классификации, необходимо нанесение на карту конкретных сведений

как в целом для площадки на предварительной стадии оценки, так и для каждого здания, сооружения при составлении расчетной схемы.

Кроме того, на карте показываются намечаемые к реконструкции промышленные площадки, резервные территории промышленной застройки и прочие территории. К прочим территориям относятся: коммунально-складские, полосы отвода железной дороги, территории санитарно-защитных зон.

Все факторы различных типов застройки, оказывающих влияние на изменение гидрогеологических условий территории, не могут быть отражены на карте. Поэтому и каждому типу застройки или промышленной площадки, показанным на карте, необходимо составление табличных или текстовых приложений, в которых должны быть освещены:

абсолютные отметки полов и подвалов и заглубленных помещений, глубины заложения фундаментов, глубины заложения свай для зданий и сооружений всех типов застройки;

виды засыпки грунта пазух котлованов;

мероприятия при строительстве, направленные на снижение влияния деформаций зданий и сооружений; замачивание грунта, уплотнение грунта; замена естественных грунтов подушками из песка, гравия, щебня; отсыпка или гидронамыв оснований; искусственное закрепление грунтов и др.;

водозащитные мероприятия. Устройство водонепроницаемых (противофильтрационных) экранов (распространение в плане и глубина заложения защитного слоя), противофильтрационных завес (контур в плане, глубина вертикальной шторы), траншейных стенок;

строительные водопонижения (расположение и конструкция дрен, длительность возмущения, производительность, контуры депрессионной воронки);

источники подтопления, негативные последствия подтопления, мероприятия по организации контроля за возможными утечками воды и других жидкостей, мероприятия по ликвидации источников подтопления и защите от подтопления.

Таким образом, карта застройки территории с вышеуказанными приложениями несет информационную нагрузку по типам существующей застройки, площадному распределению водопотребления в динамике освоения территории; дает представление о возможности учета на моделях прогноза подтопления разнообразных техногенных факторов, в той или иной степени оказывающих или могущих оказать влияние на изменение составляющих водного баланса и на режим грунтовых вод; является основой для количественной оценки дополнительного искусственного инфильтрационного питания.

3.4. На карте водонесущих коммуникаций территории города или отдельных его районов показываются трассы водопровода, канализации, горячего водоснабжения и дренажные системы. На карту наносятся магистральные трассы существующих и проектных сетей (если позволяет масштаб карты, то и внутриквартальное распределение сетей). Для каждой трассы (или отдельных ее участков) даются следующие данные (на карте или в специальной таблице): год ввода в эксплуатацию; диаметр трубы и материал, из которого она изготовлена (сталь, чугун и т.д.); глубина заложения и конструктивные особенности; величина нормативных утечек, в соответствии с требованиями СНиП III-30-74, на единицу длины трассы (100 или 1000 м); количество постоянно подаваемой воды в пределах контролируемых участков коммуникаций, учитываемое в соответствующих документах диспетчерской службы эксплуатирующей организации. При отсутствии фактических данных приводится расчетная производительность водонесущей сети по проектным проработкам. На карте показываются участки зафиксированных постоянных утечек или наиболее частых аварийных утечек с приблизительной оценкой потерь.

На карту наносятся перехватывающие (береговой, головной и отсечный дренаж) и площадные (систематический дренаж, контурный, пластовый и пристенный) системы, которые по конструктивным признакам подразделяются на: горизонтальную, трубчатую, и галерейную; вертикальную, комбинированную, лучевую.

Для каждой дренажной системы (на карте и в приложениях к ней) приводятся данные: год ввода в эксплуатацию; глубина заложения; местоположение водоприемных устройств, их количество и конструктивные особенности; местоположение сбросных сооружений и их конструктивные особенности; режим работы; количество отводимой воды; изменение понижения уровня грунтовых вод в процессе эксплуатации.

Кроме того, по каждой дренажной системе должно быть приведено гидрогеологическое обоснование проекта сооружений: краткая характеристика гидрогеологических условий, расчетные гидрогеологические параметры осушаемого водоносного горизонта, обоснование расчетной схемы и гидрогеологический расчет.

Таким образом, карта водонесущих коммуникаций с вышеуказанными приложениями несет информационную нагрузку по точечному и линейному распределению источников питания и разгрузки грунтовых вод. Если по магистральным водонесущим коммуникациям отсутствуют учтенные данные по фактическим утечкам воды, то нормативные утечки не включаются в оценку дополнительного питания, так как объем таких утечек составляет не более 0,5–1% общей величины водоподачи. Следует иметь в виду, что потери из водонесущих коммуникаций по данным различных авторов могут составлять 3–30% от общей величины водоподачи. Максимальные утечки чаще всего фиксируются в магистралях со значительным сроком эксплуатации (более 5–10 лет), причем иногда наблюдается их сезонное изменение. Для застроенных территорий при наличии режимной сети скважин, способных зафиксировать утечки из водонесущих коммуникаций по колебаниям уровня подземных вод и изменению их температуры, требуется выполнение дополнительных исследований (натурное обследование, модельные проработки) по определению объема и интенсивности утечек. Полученные данные могут быть приняты для аналогичных типов застройки вновь застраиваемых территорий.

3.5. На карту внутригородских бассейнов стока наносятся: водосборные площади современных постоянно и временно действующих водотоков и водоемов; магистрали отвода атмосферных осадков (существующие и проектируемые) и исходные расчетные данные по их проектированию; засыпанные водотоки и водоемы в результате инженерной подготовки территории при ее застройке; оградительные дамбы (существующие и проектируемые) и сооружения для пропуска поверхностных вод, отвода их за пределы обвалованной территории; нагорные канавы (существующие и проектируемые) и водоприемники, исходные расчетные данные по их проектированию.

Пример 1. Исходные данные по техногенным факторам для целей прогноза подтопления.

Рассмотрим характеристику техногенных факторов северного района городской территории площадью 8 км^2.

Типы застройки. Территория района характеризуется многообразием типов застройки. Наряду с современной 5–14-этажной городской застройкой сохранилась старая 2–3-этажная. Обширные участки территории занимает индивидуальная застройка, которая в настоящее время сносится и территория застраивается многоэтажными жилыми домами. Среди жилой застройки встречаются отдельные промышленные предприятия и коммунально-складские зоны. Имеются участки резервной (незастроенной) территории. Площадь территории жилых микрорайонов и кварталов в пределах красных линий, обусловленных проектом детальной планировки, составляет 2,42 км^2. Площади других типов застройки приведены в табл. 5.

Контуры типов застройки и других территорий показаны на карте, составленной в масштабе 1:10 000.

Согласно проекту детальной планировки, население района составит 107 тыс. жителей, средняя этажность – 7,5. Жилая застройка предусматривается на месте сноса деревянного жилого фонда и некапитальной застройки. Общая территория сноса – 285 тыс. м^2. Ориентировочный объем земляных работ 1408 тыс. м^3, из них подсыпка территории на 0,5 – 1,2 м – 815 тыс. м^3, засыпка понижений рельефа – 30 тыс. м^3. По дну засыпаемых

Таблица 5. Характеристика планировки городского района по типам застройки

Территория	Площадь, га
Общая, по проекту детальной планировки	806
По эскизу застройки	521,1
В том числе:	
жилых микрорайонов и кварталов	242
учреждений обслуживания	29
парков, спортивных зон, скверов, бульваров и зеленой зоны	74,2
улиц, гаражей, автостоянок, транспортных развязок	95
коммунально-складских зон	12
промышленных предприятий	47,1
поверхностей водоемов	17
прочих территорий	8
Внешнего транспорта, железной дороги и санитарно-защитной зоны	284,9

понижений предусматривается дренаж. Схема детальной вертикальной планировки иллюстрируется картой масштаба 1:10 000.

Плотность индивидуальной застройки составляет 5 – 15%, чаще 11–13%, протяженность коммуникаций водопровода 10–100 м на 1 га. Водоподача по сетям водопровода на 1 га – 5–80 м^3/сут (среднее – 40 м^3/сут). Допустимые (нормативные) утечки в среднем 0,4 м^3/сут на 1 га. Для территории характерно расположение сетей водопровода вдоль улиц, водоразбор колонками, отсутствие канализации и теплосетей, ливневая канализация – по канавам, в летнее время осуществляется интенсивный полив зеленых насаждений.

Плотность 2–3-этажной старой городской застройки 25–50%, протяженность водонесущих коммуникаций 50 – 150 м на 1 га. Водоподача по сетям водопровода 40 – 130 м^3/сут на 1 га. Допустимые (нормативные) утечки 0,6 – 2 м^3/сут, в среднем 1,4 м^3/сут на 1 га. Для старой застройки характерно отсутствие сетей горячей воды, ветхость водонесущих коммуникаций, отвод поверхностных вод по открытым канавам.

Плотность 5 – 14-этажной современной застройки 25 – 35%, протяженность водонесущих коммуникаций 100 – 400 м на 1 га, водоподача 100 – 300 м^3/сут на 1 га. Допустимые (нормативные) утечки 1 – 6,8 м^3/сут, в среднем 2 м^3/сут на 1 га. Для застройки характерно: заглубление подвальных помещений на 1,5 – 4 м, свайные фундаменты для высотных зданий, большие напоры в трубопроводах, кольцевой дренаж для многих жилых домов.

Промышленная застройка находится в районах старой селитебной застройки. Для промышленной застройки характерна высокая плотность водонесущих коммуникаций – 200 – 1000 м на 1 га, заглубление отдельных зданий до 6 – 8 м, подсыпка территорий площадок на высоту до 3 – 5 м. По величине расхода на 1 га территории [63] предприятия района относятся к классификационным группам "В" и "Г". Общая подача воды на предприятия 6,5 тыс. м^3/сут.

Коммунально-складская застройка представлена различными базами, складами, депо, подъездными железнодорожными путями и др. Плотность застройки 30 – 80%, водонесущих коммуникаций 20 – 100 м, водоподача 30 – 120 м^3/сут (в среднем 80 м^3/сут) на 1 га. Допустимые (нормативные) утечки 2 – 10 (в среднем 5) м^3/сут на 1 га. Преобладающая глубина заложения заглубленных частей зданий 1,5 – 4 м.

Водонесущие коммуникации. К ним относятся сети водопровода, канализации, теплоснабжения и горячей воды. Схема расположения сетей с указанием диаметров трубопровода, материала труб, характера напорности, глубины заложения и объема водоподачи дана на карте масштаба 1:10 000.

Сети водопровода представлены стальными и чугунными трубами диаметром 150 – 300 мм, железобетонными – диаметром более 400 мм. Протяженность водопровода составляет: магистральные водопроводы – 79,63 км, внутриквартальные – 34,09 км, вводы в дома – 6,55 км. Общая подача воды в район – 39,9 тыс. м^3/сут. Ежегодно на сетях водопровода происходит 9 – 34 аварии, продолжительность ликвидации которых составляет 1 – 11 суток (в среднем 2 суток). Утечки воды и неучтенный расход составляют 8 – 9% от общей водоподачи.

Сети канализации представлены керамическими трубами диаметром 150 – 400 мм, железобетонными – диаметром более 400 мм. Напорные трубопроводы из стальных труб. Протяженность канализации: главные коллекторы – 8,96 км, магистральные сети – 34,93 км, вводы в дома – 12,18 км. Глубина заложения канализационных труб 1,5 – 7 м, максимальный диаметр труб 1400 мм. Расход стоков – 40 000 м^3/сут. Сточные воды отводятся на очистные сооружения за пределы района.

Сети теплоснабжения и горячей воды представлены стальными трубами. Общая протяженность сетей 25,5 км, водоподача по замкнутой системе круглогодично 3326,9 м^3/сут, в холодный период года (1.10–1.05) – 4497 м^3/сут. Глубина заложения теплосетей по улицам 1,8–2,5 м, внутри кварталов 1–1,6 м.

Трубы водонесущих коммуникаций периодически заменяются: в сухих грунтах 1 раз в 25 лет, в зоне колебания уровня грунтовых вод – 1 раз в 7 – 8 лет.

4. ТИПОВЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОДТОПЛЕНИЯ

4.1. Составление расчетной геофильтрационной схемы является заключительным этапом получения и обработки исходных данных по природным условиям и техногенным факторам для прогноза подтопления. При составлении схемы в первую очередь детализируются пространственная структура потока, режим фильтрации, внутренние и внешние граничные условия, строение потока.

В строгой постановке потоки подземных вод носят пространственный характер, поэтому напоры, скорости и расход в каждый данный момент времени t определяются как функции трех координат X,Y,Z. В практических гидрогеологических расчетах, учитывая, что обычно размеры водоносных горизонтов в плане (по площади) значительно превосходят их вертикальные размеры (по мощности), реальные пространственные потоки могут быть схематизированы в виде плоских в плане или разрезе. При этом напоры, скорости и расходы определяются только в зависимости от двух координат: X,Y (в плане), X,Z или Y,Z (в разрезе).

В плоских в плане потоках горизонтальные составляющие скорости фильтрации по вертикали осредняются и считаются одинаковыми. В слоистых водоносных горизонтах правильнее говорить об осреднении не скоростей, а градиентов напора, поскольку водопроницаемость различных слоев и соответственно средняя горизонтальная скорость в них будут неодинаковы. Вертикальные же составляющие скорости фильтрации плоских в плане потоках по сравнению с горизонтальными скоростями малы и их в расчетах можно не учитывать. Плоские в разрезе потоки характери-

зуются изменяющейся по вертикали скоростью фильтрации, последняя является здесь функцией $У$ и Z. Развитие процесса подтопления может происходить в условиях однослойного или многослойного потоков.

По характеру напорности следует выделять безнапорные грунтовые воды со свободной поверхностью, связанные с атмосферой; напорные подземные воды; напорно-безнапорные подземные воды, характеризующиеся различными режимами и разными условиями питания на различных участках водоносного горизонта.

По режиму фильтрации различаются стационарная (установившаяся) и нестационарная (неустановившаяся) фильтрация.

При установлении расчетной схемы пользуются граничными условиями четырех родов: ГУ-I, ГУ-II, ГУ-III, ГУ-IУ.

ГУ-I, представляющие собой постоянное или меняющееся во времени положение уровня грунтовых вод, задаются по контурам водоемов, у которых практически отсутствует сопротивление ложа, и на скважинах (дренах), работающих с заданным уровнем (напором).

ГУ-II, представляющие собой постоянный или меняющийся во времени расход, но не зависящий от положения уровня подземных вод, задаются по контурам питания (разгрузки) водоносного горизонта, выклинивания его, на скважинах (дренах), работающих с заданным расходом.

ГУ-III, представляющие собой расход, зависящий от изменения уровня подземных вод, задаются на контурах водоемов, обладающих определенным сопротивлением ложа, и в точках разгрузки подземных вод в виде родников.

ГУ-IУ, представляют собой равенство расходов и напоров на линии раздела безнапорной и напорной зон в однослойном плоско-плановом безнапорно-напорном потоке.

Начальные условия представляют собой поле распределения уровней грунтовых вод, выраженное в виде карты гидроизогипс.

4.2. Рассмотрим вопрос анализа плановой изменчивости гидрогеологических параметров при составлении геофильтрационных схем. Классификация неоднородности горных пород изложена в работах М.В.Раца [60, 61]. Оценке фильтрационной неоднородности посвящен ряд работ [12, 16, 49], причем для наших целей принципы классификации фильтрационной неоднородности условно можно подразделить (на основе классификации М.В.Раца) на две группы (табл. 6): 1 – классификация категорий неоднородности при схематизации фильтрационного потока; 2 – классификация категорий неоднородности для интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (ОФР).

Условность такого подразделения заключается в том, что понятие неоднородности является относительным и зависит от масштаба рассмотрения. Так, при схематизации применительно к ОФР неоднородное строение пласта может учитываться при построении модели, а при прогнозной оценке подъема уровня этот же пласт может быть принят за условно однородный, или в нем могут быть выделены зоны, имеющие постоянные показатели фильтрационных свойств. В этом случае модель не детализируют, а упрощают, используя статистические методы обработки. В вышеназванных работах речь идет о неоднородности по коэффициентам водопроводимости или фильтрации.

4.3. Водопроводимость – главный параметр, определяющий точность прогнозов, а обычно лишь информация о проводимости пластов делает вопросы осреднения значимыми. Последнее объясняется тем, что относительно массовым видом опытно-фильтрационных работ, дающих основание для статистического анализа, являются одиночные откачки, позволяющие как-то оценить лишь значения водопроводимости. Вопрос о допустимости и целесообразности осреднения проводимости эквивалентен вопросу о том, когда и как можно заменять неоднородный в фильтрационном отношении пласт условно однородным, для которого результаты решения прогнозной задачи будут индентичными точному решению для реального неоднородного пласта.

Следовательно, вопрос об осреднении проводимости целесообразно рассматривать лишь для сравнительно ограниченного круга условий, кото-

Таблица 6. Характеристика существующих классификаций оценки фильтрационной неоднородности для схематизации фильтрационного потока и интерпретации результатов ОФР

Категории неоднородности при схематизации фильтрационного потока		
Классификация по М.В.Рацу [61]		
Неоднородность высшего порядка (ультранеоднородность) Неравномерное чередование элементов линейные размеры которых в 10^4 раз и более меньше области воздействия	Эффективная неоднородность (микронеоднородность) Неравномерное чередование элементов, размеры которых в 10–100 раз меньше размеров области воздействия	Неоднородность низшего порядка (макронеоднородность) Размеры элементов неоднородности больше размеров области воздействия или примерно равны ей
Классификация по В.А.Мироненко [49]		
Микронеоднородность	Мезонеоднородность	Макронеоднородность
Фильтрационная неоднородность на уровне минимальных репрезентативных объемов, т.е. изменчивость фильтрационных свойств в масштабе минимальных объемов, для которых справедливы предпосылки однородности среды. Неоднородность отражена в локальных гидрогеологических параметрах и не принимается во внимание при гидродинамической схематизации	Фильтрационная неоднородность на уровне объемов, требующих учета вертикальной составляющей скорости фильтрации, т.е. масштаб изменчивости фильтрационных свойств соизмерим с мощностью водоносного пласта. Наиболее часто ее следует учитывать дифференцированно вблизи внутренних и внешних границ питания и разгрузки пласта (расстояние до границы–порядка мощности водоносного пласта), если она проявляется при опробовании как крупномасштабная эффективная неоднородность или (преимущественно при одиночных откачках) как неоднородность низшего порядка	Фильтрационная неоднородность на уровне характерных размеров области фильтрации. т. е. изменчивость фильтрационных свойств в масштабе площадей горных пород, размеры которых имеют один порядок с размерами области фильтрации. Неоднородность необходимо учитывать в прогнозах практически всегда. Выбор расчетных параметров должен обычно учитывать разномасштабность проявления неоднородности при опробовании и в прогнозируемом геофильтрационном процессе

Продолжение табл. 6

Категории неоднородности для интерпретации результатов ОФР			
Классификация по В.А.Мироненко [49]. Фильтрационная изменчивость оценивается по соотношению $R_э/R_н$ ($R_н$ – элемент фильтрационной неоднородности, $R_э$ – размер области воздействия опытных работ)			
Фильтрационная неоднородность высшего порядка ($R_э/R_н > 100$)	Эффективная фильтрационная неоднородность		Фильтрационная неоднородность низшего порядка
	крупномасштабная $1 \leq R_э/R_н \leq 10$	мелкомасштабная $10 \leq R_э/R_н \leq 100$	
При ОФР неоднородность не проявляется и опробуемый пласт ведет себя как квазиоднородная среда	Неоднородность проявляется в области воздействия короткого опыта, требует своего специального учета при интерпретации ОФР	Неоднородность проявляется при длительном опыте и оказывается обычно "автоматически" учтенной в вычисленных по данным ОФР локальных параметрах	Область воздействия опыта меньше размеров элементов неоднородности. Неоднородность данного вида на результатах единичных экспериментов не сказывается, за исключением тех случаев, когда опытные скважины расположены вблизи границы неоднородности

Классификация по Б.В.Боревскому, Б.Г.Самсонову, Л.С.Язвину [12]

	Хаотическая эффективная неоднородность	Структурная (закономерная) неоднородность
—	Хаотическая неоднородность связана с синтетическими различиями и целым рядом эпигенетических проявлений в водовмещающей среде. Элементы хаотической неоднородности, как правило, значительно меньше области опытного возмущения	Неоднородность связана с наличием литолого-фациальных границ, пликативных и разрывных тектонических нарушений. Схематизируется геометрическими формами с границами значительной протяженности и различной природы. Основные принципы интерпре-

—	—	тации опытных данных в условиях структурной неоднородности изложены в работе [12]. В тех случаях, когда элементы хаотической неоднородности соизмеримы с областью опытного возмущения, их роль в формировании фильтрационного потока аналогична действию структурной неоднородности

Примечание. Под элементом неоднородности подразумевается наибольший объем горной породы, который на данном уровне может рассматриваться как внутренне однородный в интересующем нас отношении.

рые конкретизируются областью плановой фильтрации, состоящей из достаточно большого числа участков неоднородности (на уровнях мезонеоднородности и макронеоднородности) распределенных случайным образом. Это распределение отражено некоторыми локальными параметрами, полученными на основании единичных экспериментов. Подобная постановка подразумевает независимость осредняемых локальных параметров между собой, а также отсутствие заметных систематических ошибок в их значениях.

4.4. Вопрос об осреднении проводимости в задаче, где искомой функцией является понижение напора, рассмотрен в работе [49], где отмечено, что для этих задач нельзя указать величину эффективной водопроводимости[1] (т.е. нельзя заменить неоднородный пласт однородным) так, чтобы понижения в однородном и неоднородном пластах во всех точках области фильтрации совпадали между собой. В самом деле, при переходе от неоднородного пласта к однородному неизбежно изменяется гидродинамическая сетка движения подземных вод, а следовательно, и картина распределения напоров по области фильтрации. Таким образом, эффективное значение водопроводимости, обеспечивающее совпадение прогнозных понижений в неоднородном и расчетном однородном пластах, можно выбрать лишь для некоторых частных точек области фильтрации (например, для самого водозабора). В целом же можно говорить о водопроводимости в смысле близости понижений уровня в исследуемом и модельном пластах. Под близостью можно понимать минимум среднеквадратичного отклонения напоров в неоднородном водоносном горизонте от напоров в условно однородном пласте.

4.5. Возможность использования средних величин водопроводимости в качестве эффективных в задачах прогноза понижений уровня исследована в работах [57, 80]. В них указано, что осреднение возможно лишь при малых значениях коэффициента вариации водопроводимости W_T по полю фильтрации порядка 17 – 25 %. При этом ошибки в определении напоров в радиусе, не превышающем половины расстояния от возмущающей скважины до границы пласта, лимитировались 10 – 13%. При больших значениях W_T (75 – 80%) ошибки возрастают до 25 – 55%. Таким образом, для задач прогноза понижений напоров осреднение водопроводимости в общем случае может дать недопустимые погрешности. Вместе с тем, при соотношениях параметров отдельных участков, не превышающих двух, осреднение водопроводимости будет приводить к ошибкам, не превышающим 10 – 20%. Однако, как правило, не рекомендуется включать в осредняющий алгоритм параметры участков, прилежащих к границам питания или разгрузки [49].

Современные аналоговые и численные методы прогноза позволяют осуществить расчет, не прибегая к осреднению водопроводимости по области фильтрации, т.е. в осреднении (в утилитарном смысле) нет серьезной необходимости. Прогнозная модель при этом может строиться преимущественно на базовых, т.е. полученных с наибольшей достоверностью, значениях параметров, определенных крупномасштабными экспериментами, а для интерполяции параметров между базовыми точками или для их экстраполяции могут использоваться закономерности относительной фильтрационной изменчивости, выявленные по совокупности одиночных опытов. Такая модель позволяет наиболее обоснованно оценить степень надежности прогноза сопоставления результатов при различных значениях расчетных параметров – осредненных или изменяемых в доверительных интервалах (например, в рамках среднеквадратического отклонения, определенного по распределению локальных параметров). В этих оценках необходимо использовать идентификационные исследования на моделях.

---

[1] Под эффективными параметрами понимаются значения km и a такого однородного водоносного горизонта, в котором расчетные значения понижений уровня в зоне квазистационарного режима на определенные моменты времени близки к значениям понижений в рассматриваемом неоднородном пласте [12].

Таблица 7. Критические значения Δ^2/σ^2

Объем выборки	$\alpha = 0{,}05$	$\alpha = 0{,}01$	Объем выборки	$\alpha = 0{,}05$	$\alpha = 0{,}01$
4	0,78	0,626	25	1,367	1,123
6	0,89	0,561	30	1,418	1,195
8	0,981	0,663	40	1,492	1,293
10	1,062	0,752	50	1,544	1,363
12	1,128	0,828	60	1,581	1,414
15	1,205	0,922	∞	2	2
20	1,3	1,041	–	–	–

В результате исследуемая область фильтрации может быть представлена, как однородная, кусочно-неоднородная (область разграничена на ряд условно однородных зон, в пределах которых параметры могут быть осреднены) или слоистая.

4.6. В работе [16] предлагается следующая последовательность схематизации фильтрационных свойств исследуемой области и методика выбора типа модели по строению фильтрационной среды (применительно к выделенным водоносным и относительно водоупорным горизонтам или комплексам):

а) изучается характер пространственной изменчивости фильтрационных и других свойств. На основании геолого-генетического и структурного анализа выявляются условия формирования отложений, устанавливаются главные факторы, обусловливающие изменчивость этих свойств, определяются основные направления изменчивости, выделяются элементы неоднородностей разных уровней, устанавливаются геометрические размеры ведущих элементов неоднородности и закономерность их размещения. Наличие тренда (закономерная составляющая пространственной изменчивости фильтрационных свойств) можно приближенно установить по формуле

$$\Delta^2/\sigma^2 = \Sigma(\Pi_i - \Pi_{i+1})^2/\Sigma(\Pi_i - \overline{\Pi})^2, \qquad (1)$$

где $\Pi_i, \Pi_{i+1}, \ldots, \Pi_n$ – полученная при опробовании последовательность изменения показателя в определенном направлении; $\overline{\Pi}$ – среднеарифметическое значение всех показателей.

Тренд отсутствует, если полученная величина меньше или равна критической Δ^2/σ^2, которая при выбранном значении α определяется по табл. 7;

б) на основании близости литолого-фациального состава общности геоморфологических и гидрогеологических условий выявляется наличие однородных в фильтрационном отношении элементов (зон). Затем определяются применительно к решаемой задаче возможные размеры зон возмущения и путем сопоставления их с размерами ведущих элементов неоднородности выбирается тип фильтрационной среды и способы ее схематизации;

в) дальнейшее упрощение заключается в сведении неоднородной толщи к квазиоднородной. Это может быть выполнено двумя способами. Первый применяется при небольшом числе исходных параметров и заключается в использовании эмпирического критерия в виде соотношения коэффициентов фильтрации или водопроводимостей

$$k_i/k_{min} \quad \text{или} \quad T_i/T_{min} \leqslant 3-5. \qquad (2)$$

Если критерий выполняется, толща считается условно однородной и вычисляется среднеарифметическое значение параметра, которое и является расчетным для зоны.

Таблица 8. Значения $\sigma_{\lg k(T)}$ при замене неоднородного пласта квазиоднородным

$\sigma_{\lg k(T)}$	Степень однородности пласта
0,1 – 0,2 и менее	Однородный
03, – 0,4	Неоднородный
0,4	Весьма неоднородный

Второй способ используется при достаточном объеме исходной информации. Он заключается в статистической проверке правомерности выделения зон. Находится закон распределения расчетных параметров и статистическими критериями подтверждается однородность принятой совокупности показателей. При соблюдении всех требований, предъявляемых к статистической обработке данных, вычисляются соответствующие расчетные характеристики зон [11].

Для предварительной оценки возможности замены неоднородного строения пласта квазиоднородным вычисляют среднеквадратичную величину логарифма k или T $(\sigma_{\lg k(T)})$ и пользуются данными таблицы 8 [13].

Если вычисленные значения попадают во вторую или третью группу (см. табл. 8), это указывает на нецелесообразность усреднения параметров.

При слоистом строении пласта, если удовлетворяется критерий (2), можно вычислить средневзвешенный по мощностям этих слоев (m_i) коэффициент фильтрации с учетом направления движения воды относительно слоистости и тем самым свести неоднородную толщу к однородной

$$\bar{k}_{ср\,\parallel} = \Sigma k_i m_i / \Sigma m_i ; \qquad \bar{k}_{ср\,\perp} = \Sigma m_i / \Sigma (m_i / k_i). \quad (3)$$

В грунтовых водах при слоистом строении водоносного горизонта и горизонтальном водоупорном ложе для осреднения используется функция Гиринского

$$G = \sum_1^n k_i m_i (h - z_i), \quad (4)$$

где h – уровень воды (общая мощность водоносных пород); z_i – расстояние от водоупорного ложа до середины слоя i.

Многослойная система, работающая по схеме Мятиева-Гиринского, принимается за многопластовую, если удовлетворяется эмпирический критерий

$$k_i / k_{min} \quad \text{или} \quad T_i / T_{min} \geqslant 100 - 150. \quad (5)$$

При схематизации слоистых толщ число взаимодействующих горизонтов может быть уменьшено путем использования схем эквивалентных пластов либо обобщенных параметров емкости и питания [15, 21, 46];

г) при наличии тренда по формуле (1) и геологических предпосылок о закономерном изменении фильтрационных свойств в исследуемых пластах выполняется аналитический подбор математического закона, описывающего это изменение в виде, например $T_i = T_0 e^{-\rho x}$ или аппроксимирующих полиномов n степени с реализацией этого подхода на ЭВМ [52]. Схематизация заканчивается построением карт параметров на ЭВМ или вручную;

д) на основе полученных результатов и общего гидрогеологического анализа решается вопрос о выборе типа модели, которой будет аппроксимирован принятый тип фильтрационной среды.

4.7. Разнообразные природные условия для прогнозных проработок подъема УГВ существующего первого от поверхности водоносного горизонта или формирования нового техногенного водоносного горизонта схематизируются по строению фильтрационного потока на региональном водоупоре, по отношению к исследуемой области фильтрации, тремя основ-

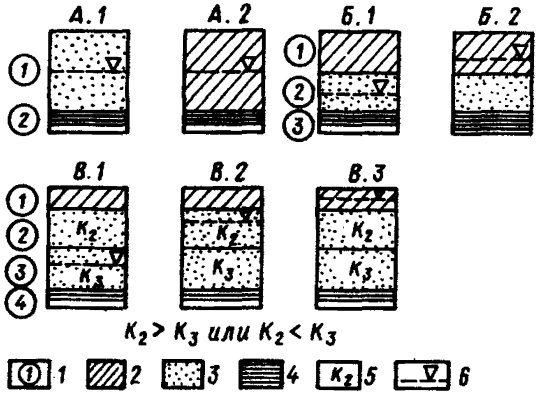


Рис. 2. Типовые схемы для прогноза подтопления
1 – номера слоев; *2* – слабопроницаемые грунты; *3* – проницаемые грунты; *4* – водоупор; *5* – коэффициенты фильтрации (водопроводимости) грунтов; *6* – уровень грунтовых вод

ными типовыми схемами: *А, Б* и *В* (рис. 2). Эти схемы соответственно дифференцируются по положению уровня грунтовых вод в разрезе.

Однослойный поток (А.1 и А.2) Проницаемые грунты (например пески от тонкозернистых до крупнозернистых) или слабопроницаемые грунты (например, суглинки лессовидные) залегают на наклонном или горизонтальном водоупоре. К грунтам слоя *1* приурочены подземные воды первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта.

Двуслойный поток (Б.1 и Б.2) В верхней части разреза слабопроницаемые грунты (слой *1*) залегают на проницаемых грунтах (слой *2*) . В основании разреза наклонный или горизонтальный водоупор. Уровень грунтовых вод в первом или втором слое.

Трехслойный поток (В.1, В.2 и В.3). В верхней части разреза слабопроницаемые грунты (слой *1*) залегают на проницаемых грунтах (слой *2,3*). Коэффициент фильтрации (водопроводимости) слоя *2* больше или меньше слоя *3* ($k_2 > k_3$ или $k_2 < k_3$). В основании разреза залегают наклонный или горизонтальный водоупор. Уровень грунтовых вод может находиться соответственно в слое *3* (*В.1*), слое *2* (*В.2*) или слое *1* (*В.3*).

Таким образом, первый от поверхности водоносный горизонт и зона аэрации чаще всего представляют собой слоистую толщу. В пределах исследуемой области фильтрации возможно распределение в плане нескольких первых от поверхности водоносных горизонтов, что обусловливает плановую неоднородность фильтрационных свойств слоистого потока.

Для всех типовых расчетных схем взаимосвязь грунтовых вод с нижележащими водоносными горизонтами должна оцениваться с учетом следующих факторов: наличие "окон" в водоупоре – разгрузка грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты или питание грунтовых вод напорными водами нижележащих водоносных горизонтов; повсеместное распространение водоупора – питание грунтовых вод напорными водами нижележащих водоносных горизонтов или переток грунтовых вод через водоупор (в случае формирования депрессионных воронок в нижележащем напорном водоносном горизонте).

4.8. Традиционный подход к прогнозу изменения уровенного режима грунтовых вод на городских территориях состоит в раздельном рассмотрении зоны полного насыщения и зоны аэрации, границей между которыми является свободная поверхность с давлением, равным атмосферному.

Как отмечается в работе [84], такой подход (применительно к решению мелиоративных задач) является во многих случаях наиболее целесообразным. Это касается и прогнозов на городских территориях, когда размеры геофильтрационных потоков в плане значительно превышают мощность зоны аэрации. В этом случае можно пренебречь горизонтальными составляющими потока в зоне аэрации и рассматривать одномерные схемы, характеристики которых типичны для определенных выделенных в плане участков. Для насыщенной зоны в этом случае решается задача плановой фильтрации. Сшивание этих зон осуществляется путем составления баланса на свободной поверхности подземных вод. При таком подходе инфильтрационное питание на уровень грунтовых вод, обусловленное действием гидрометеорологических и техногенных факторов, задается в виде ГУ-II. В общем случае для исследуемой области фильтрации характерно сочетание всех видов внешних и внутренних граничных условий.

При формировании техногенного водоносного горизонта в слабопроницаемых грунтах, когда грунтовые воды отсутствуют на период изысканий, традиционный подход к прогнозу уже неприменим. Инфильтрационное питание в начальной стадии образования водоносного горизонта (строительство и эксплуатация зданий) идет на увлажнение и насыщение грунтов (при отсутствии общепринятой поверхности грунтовых вод), что обусловливает пространственный (многомерный) характер миграции влаги в массиве грунта на локальных участках влияния техногенных факторов.

4.9. В качестве примеров рассмотрим геофильтрационные схемы участков городских территорий, на которых выполнен прогноз подтопления методом математического моделирования, реализован на ЭВМ ЕС-1022.

Территория площадью 40 км^2 расположена в долине реки (рис. 3). Основные геоморфологические типы рельефа: пойма, I и II надпойменные террасы. Мощность зоны аэрации 0,5 – 6 м

Первым от поверхности водоносным горизонтом (II) являются аллювиальные отложения и надпойменных террас. В разрезе горизонта, по данным гидрогеологических изысканий, выделено два слоя. Верхний слой по фильтрационным свойствам неоднородный в плане и вертикальном разрезе. Нижний – однородный, с более высокими фильтрационными свойствами. Нижним водоупором (B_1) являются глины (среднее значение коэффициента фильтрации 0,1 м/сут), на отдельных участках фациально замещенные песчаниками и алевролитами (среднее значение коэффициента фильтрации 8 м/сут). Там, где водоупор размыт, наблюдается прямая взаимосвязь с нижележащим напорным водоносным горизонтом (II), водовмещающие породы которого представлены трещиноватыми и закарстованными известняками. В основании разреза залегает региональный водоупор (B_2).

В гидродинамическом отношении грунтовые воды двухслойного водоносного горизонта I схематизируются плоскоплановым потоком. Вертикальная фильтрация через водоупор B_1 рассматривается как плосковертикальный поток. При этом интенсивность перетока оценивается с учетом плановой неоднородности фильтрационных свойств (выделены зоны с коэффициентом фильтрации 8 м/сут) водоупора. Напорный водоносный горизонт (II) схематизируется плоскоплановым потоком, на участках, где водоупор B_1 отсутствует, оба водоносных горизонта (I,II) рассматриваются как плоскоплановый безнапорный поток.

Территория площадью 8 км^2 расположена в пределах полого всхолмленной равнины, расчлененной долинами рек. Основные геоморфологические типы рельефа: пойма, I и II надпойменные террасы, поверхность водораздела и его склоны. Мощность зоны аэрации, сложенной покровными суглинками, супесями, песками и насыпными грунтами, – 0,5 – 11 м. В пределах исследуемой территории распространено четыре первых от поверхности водоносных горизонта (рис. 4). I_4 – современные аллювиальные отложения (на пойме); I_3, I_2 – верхнечетвертичные аллювиальные отложения I и II надпойменных террас; I_1 – средне-верхнечетвертичные покровные отложения (водораздел и его склоны). Водовмещающие породы характеризуются неоднородностью фильтрационных свойств в плане и разрезе.

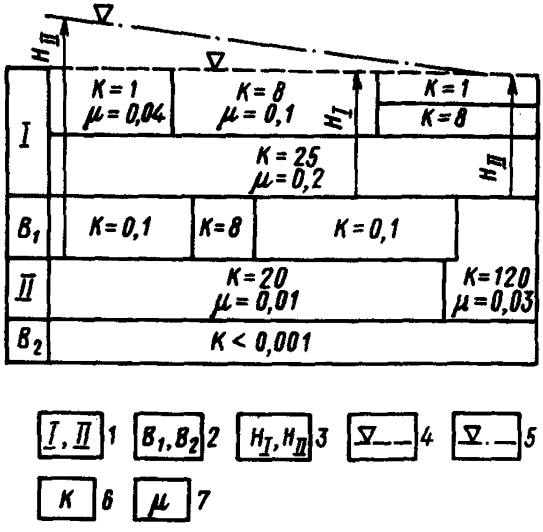


Рис. 3. Геофильтрационная схематизация многослойного фильтрационного потока
1 – номер водоносного горизонта; *2* – номер водоупора; *3* – напоры подземных вод соответствующих водоносных горизонтов; *4* – уровень грунтовых вод; *5* – уровень напорных вод; *6* – коэффициент фильтрации; *7* – коэффициент водоотдачи

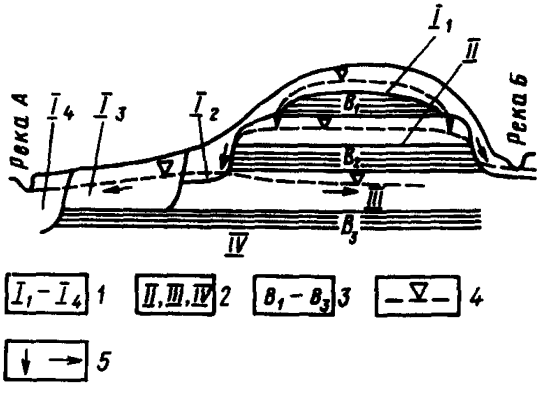


Рис. 4. Геофильтрационная схематизация многослойного фильтрационного потока
1 – номера первых от поверхности безнапорных водоносных горизонтов; *2* – номера нижележащих водоносных горизонтов; *3* – номер водоупора; *4* – уровень грунтовых вод; *5* – стрелками указан вертикальный переток подземных вод по контуру водоупора или направление потока подземных вод в водоносном горизонте III

В пределах водораздела водоносный горизонт I подстилается слабопроницаемыми суглинками (водоупор B_1)). Разгрузка подземных вод в нижележащий водоносный горизонт II происходит перетеканием через водоупор и прямым перетоком (переливом) по контуру выклинивания водо-

упора. Разгрузка водоносного горизонта II происходит прямым перетоком по контуру водоупора B_2. Глины водоупора B_2 приняты непроницаемыми. Водоносный горизонт III вдоль контура второй надпойменной террасы имеет подземный водораздел. Направление потока подземных вод от водораздела см. на рис. 4. Водоупор B_3 является региональным для всей области фильтрации и принят непроницаемым, за исключением поймы реки A, где он размыт. На этом участке наблюдается прямая связь безнапорных подземных вод горизонта I_4 с горизонтом IV. На остальной территории горизонт IV имеет напорный характер.

Таким образом, гидродинамическая схема территории имеет сложный характер. В пределах водораздела и его склонов фильтрационный поток имеет трехслойное строение: два плоскоплановых безнапорных потока (I_1 и II) разделены плосковертикальным потоком (B_1) с граничными условиями ГУ-II по контурам водоупоров B_1 и B_2. В пределах всей территории фильтрационный поток (I_2, I_3, I_4 и III) представлены плоскоплановым безнапорным потоком.

4.10. Приведенные примеры типовых расчетных схем показывают необходимость поэтапного выполнения гидрогеологических изысканий и комплексных стационарных гидрогеологических наблюдений за режимом и балансом грунтовых вод; анализа материалов изысканий каждого этапа с применением современных методов математического моделирования для оценки достоверности исходной информации, количественной оценки всех режимообразующих факторов, поэтапного уточнения расчетной геофильтрационной схемы.

5. БАЛАНСОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

5.1. Водосборный бассейн рассматривается как массив (призма) и подразделяется на три яруса [73]:

I – поверхность бассейна (поля, леса, луга, болота, сельскохозяйственные угодья);

II – зона аэрации (от поверхности земли до уровня грунтовых вод);

III – слои, содержащие подземные воды (различные типы водоносных пластов и горизонтов).

В некоторых случаях, при неглубоком залегании грунтовых вод и хорошо проницаемых грунтах, можно рассматривать только I и III ярусы.

5.2. При исследованиях процесса подтопления рекомендуется выполнять водобалансовые расчеты, дающие возможность:

оценить вклад каждого фактора в общий баланс и выделить наиболее существенные факторы;

оценить численное значение каждого фактора и, следовательно, установить те факторы, на уточнение которых должны быть направлены главные усилия при исследованиях.

5.3. Для водобалансовых расчетов составляется карта районирования бассейна. На карту наносят внешние водоразделы и основные внутренние водоразделы поверхностных и подземных вод.

Территория бассейна должна быть также разделена на ландшафтные зоны, представляющие собой различные типы местности – сельскохозяйственные угодья, леса, болота и т.п.

После нанесения линий внешних и внутренних водоразделов и границ ландшафтных зон на карте получается сетка пересекающих линий. Каждая ячейка этой сетки является стоковым участком, для которого характерны местные условия.

Из общего бассейна могут также выделяться частные бассейны, которые удобно рассматривать отдельно; для них устанавливаются свои граничные условия.

5.4. Выбирается водно-балансовый участок, который должен быть типичным и обладать примерно однородными условиями перемещения

воды в его пределах. Водно-балансовый участок может находиться в любом из основных трех стоковых ярусов и представлять собой взаимодействующие с атмосферой участок поверхности земли, призму зоны аэрации или призму, содержащую водоносный горизонт (или горизонты). Верхняя и нижняя поверхности водно-балансового участка должны совпадать с поверхностями, разделяющими ярусы. Плановые границы водно-балансовых участков во всех трех ярусах могут совпадать.

Уравнения баланса составляются выборочно, для характерных водно-балансовых участков.

5.5. Общее уравнение водного баланса, $м^3$/сут, любого яруса за расчетный период имеет вид

$$M_в - M_н + S_в - S_н \pm V = 0, \tag{6}$$

где $M_в$ – приток со стороны водораздела, $M_н$ – сток в сторону нижней границы; $S_в$ – водообмен с вышерасположенным ярусом, т.е. алгебраическая сумма поступления воды сверху (из атмосферы, из снежного покрова, из вышележащего яруса) и отдачи воды вверх (испарение, транспирация, насыщение и т.п.); $S_н$ – водообмен с нижерасположенным ярусом, т.е. алгебраическая сумма оттока и притока воды; V – изменение влагозапасов в пределах водно-балансового участка за расчетный отрезок времени.

Пример 1. Составление уравнений водного баланса для каждого яруса на примере Мещерской низменности [73].

Для поверхности земли

$$x - z + M_в \pm V - Y - S_н = 0, \tag{7}$$

где x – поступление воды на поверхность земли (осадки, водоотдача из снега); z – суммарное испарение с поверхности земли; $M_в$ – приток поверхностной воды со стороны водораздела; V – изменение запасов воды на поверхности земли за расчетный отрезок времени; Y – поверхностный сток; $S_н$ – инфильтрация в почвогрунты.

Для толщи почвогрунтов в зоне аэрации

$$S_н \pm V - z \pm S_в = 0, \tag{8}$$

где $S_н$ – инфильтрация с поверхности земли в почвогрунты; V – изменение запасов в почвогрунтах за расчетный отрезок времени; z – испарение из почвогрунтов и расходование воды на транспирацию с учетом конденсации влаги в толще почвогрунтов; $S_в$ – водоотдача из почвогрунтов зоны аэрации в грунтовые воды или подпитывание из грунтовых вод.

Указанные уравнения составлены применительно к водно-балансовым расчетам стока в Мещерской низменности, для других условий они могут конкретизироваться несколько по-иному.

Пример 2. В работе [14] предложен метод водного баланса зоны аэрации, по этому методу величина инфильтрации на водосборе

$$W_п = x + K - y_{пов} - E \pm \Delta U_{пов} \pm \Delta U_а - \gamma - h, \tag{9}$$

где x – количество атмосферных осадков; K – подпитка зоны аэрации грунтовыми водами; $y_{пов}$ – поверхностный сток с водосбора; E – испарение водосбора за вычетом конденсации; $\Delta U_{пов}$ – изменение запаса воды на поверхности водосбора; $\Delta U_а$ – изменение запаса влаги в почвогрунтах зоны аэрации, γ – водозабор на хозяйственные нужды; h – возврат в реку изъятых вод.

Все составляющие уравнения (9) являются средними по водосбору за расчетный период времени. Методы определения отдельных элементов уравнения даны в работе [14].

Пример 3. Расчеты сезонных и годовых балансов грунтовых вод (III ярус) по данным о режиме их уровня [25, 43, 44] рекомендуется выполнять по балансовому уравнению

$$\Sigma \mu \Delta H = [\Sigma (Q_1 - Q_2) \Delta t / F] \pm \Sigma W \Delta t \pm \Sigma \varepsilon \Delta t, \tag{10}$$

где ΔH – изменение уровня грунтовых вод за время Δt, м; μ – коэффициент недостатка насыщения (водоотдачи) пород в зоне колебания уровней грунтовых вод; Q_1 и Q_2 – приток и отток грунтовых вод на границах водно-

балансового участка м^3/сут; F – площадь водно-балансового участка, м^2; W – интенсивность инфильтрации осадков до поверхности грунтовых вод ($+W$) или испарения грунтовых вод ($-W$) за время Δt, м/сут; ε – интенсивность перетекания грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты ($-\varepsilon$) или питания грунтовых вод снизу ($+\varepsilon$), м /сут.

Левая часть уравнения (10) характеризует изменение запасов грунтовых вод, выражение $\Sigma(Q_1-Q_2)\Delta t/F$ – местное пополнение (или расходование) грунтового стока, $\Sigma W\Delta t$ – водообмен грунтовых вод с зоной аэрации, $\Sigma\varepsilon\Delta t$ – их водообмен с нижележащими водоносными слоями. В случае отсутствия водообмена с подстилающими [25] слоями выражение (10) приобретает вид

$$\Sigma\mu\Delta H=[\Sigma(Q_1-Q_2)\Delta t/F]+\Sigma W\Delta t. \qquad (11)$$

При отсутствии местного пополнения грунтового стока, когда горизонтальным давлением вод можно пренебречь, выражение (10) примет вид

$$\Sigma\mu\Delta H=\Sigma W\Delta t-\Sigma\varepsilon\Delta t. \qquad (12)$$

Методика расчета величин Q_1, Q_2, ε изложена в [17, 25, 43, 44], а некоторые преобразования формулы (10) для створа из двух скважин и различного расположения скважин относительно местного водораздела – в [31].

Для расчетов инфильтрации, по данным наблюдений в одиночных скважинах [25], используется выражение

$$W\Delta t=\Sigma\mu(\Delta H+\Delta z), \qquad (13)$$

где Δz – величина снижения уровня грунтовых вод за время Δt при оттоке грунтовых вод.

Необходимые для балансовых вычислений $\Delta H, k, \mu$ находят по данным о режиме грунтовых вод [10, 25]. Значение k корректируется расчетами по данным откачек, а коэффициент μ – водно-балансовым методом, путем сопоставления количества выпавших осадков и соответствующих подъемов уровней грунтовых вод [19, 24].

5.6. Помимо пространственного расчленения бассейна на стоковые участки следует установить разбивку периода времени, для которого выполняются подсчеты, на расчетные интервалы. Длительность расчетных отрезков времени определяется продолжительностью сохранения примерно однородных условий движения воды за рассматриваемый период и условиями поставленной задачи.

Учитывая средние условия инфильтрации, расчетные отрезки времени не должны быть менее 5 сут. Наиболее распространенными являются расчетные отрезки времени, границы которых приурочены к фазам гидрогеологического и гидрологического режима, которые в свою очередь связаны с сезонами года.

5.7. Поверхность водосбора по морфологическим признакам может быть разделена на водораздельные площади, безрусловые склоны, микроручейковую сеть и собственно русловые и пойменные площади [22]. Это деление несколько условно, однако оно необходимо для анализа составляющих поверхностного стока. Количественное соотношение этих площадей варьирует в широких пределах. В качестве примера взята территория Московской области, где указанные площади распределяются примерно следующим образом, %:

Площадь водоразделов	– 25
" безрусловых склонов	–50
" микроручейковой сети	–15
" русел и пойм	–10
Всего:	100%

Указанные соотношения приняты по планам масштаба 1:10 000 – 1:25 000 для конкретных участков.

5.8. Процесс трансформации осадков на различных морфологических типах территории водосборного бассейна (табл. 9) может быть схемати-

Таблица 9. Водный баланс речного бассейна при полном дренировании рекой подземных вод (для Московской обл.)

Элементы	Площадь, %	Приход за год, мм		Расход за год, мм		
		осадки	поступления грунта на поверхность	инфильтрация	испарение	поверхностный сток
Водоразделы	25	700	–	200	500	–
Безрусловые склоны	50	700	–	170	500	30
Микроручьи	15	700	240	135	550	255
Речные русла и поймы	10	700	1230	30	600	1300
Всего	100	700	159	158	518	183

Примечание. При необходимости могут быть взяты сезоны года или другие требуемые отрезки времени.

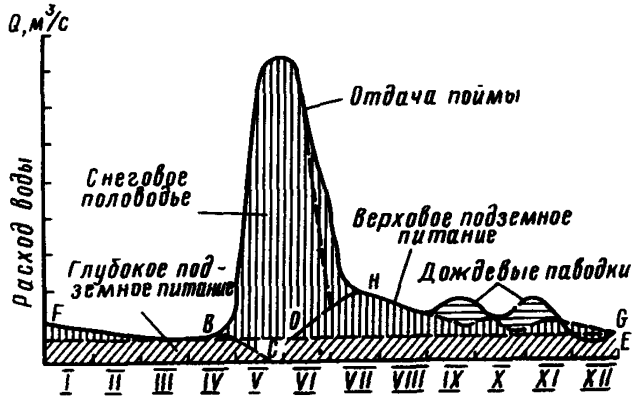


Рис. 5. Расчленение гидрографа р.Волги у Камышина

зирован следующим образом: осадки, выпадающие на водораздельные площади, расходуются только на испарение и на впитывание в почву, поверхностный сток, как правило, отсутствует; осадки, выпадающие на площадь безрусловых склонов, расходуются почти так же, с той только разницей, что здесь при большом количестве осадков уже возможен незначительный поверхностный сток.

На площадях, занимаемых микроручейковой сетью, часть подземного стока выклинивается на поверхность. Такое выклинивание (разгрузка) происходит на участках, где подземный поток встречает грунты с более низким коэффициентом фильтрации; уклон склона резко уменьшается; уровень подземных вод достаточно высок и приближается к поверхности земли.

На русловых и пойменных площадях происходит перехват (дренирование) подземного стока. В зависимости от глубины вреза русел грунтовые воды дренируются в большей или меньшей степени. В большинстве случаев подземный сток дренируется не полностью.

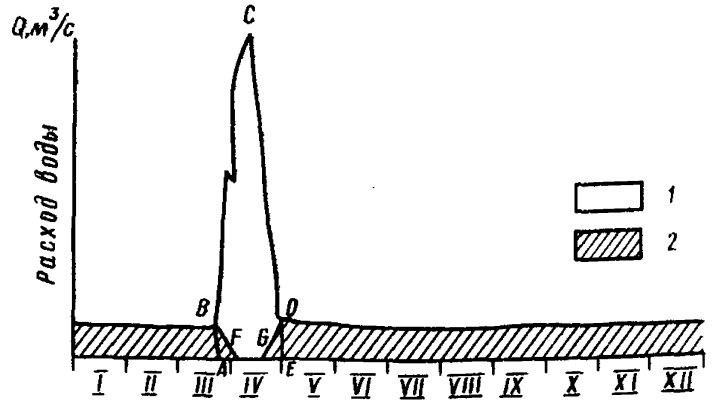


Рис. 6. Расчленение гидрографа р. Большой Черемшан
1 – поверхностный сток; *2* – грунтовый сток

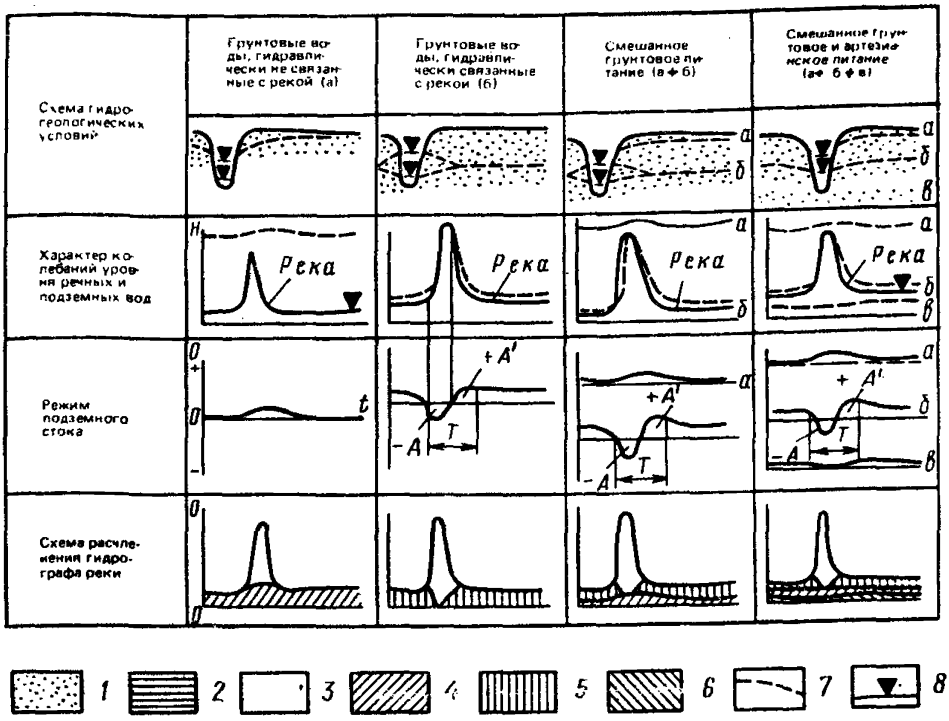


Рис. 7. Типовые схемы расчленения гидрографа речного стока в зависимости от гидрогеологических условий и режима подземного стока в реку (по Б.И.Куделину)
t – время; *Q* – расход; *T* – время берегового регулирования; *-Aи+A* – объемы подземного стока, принимающие участие в береговом регулировании;
1 – водоносные породы; *2* – водоупорные породы; *3* – поверхностный сток в реку; *4* – подземный сток в реку при условии *а*; *5* – то же, при условии *б*; *6* – подземный сток в реку из артезианских (напорных) пластов при условии *в*; *7* – уровень подземных вод; *8* – уровень речных вод

Пример 4. Карта подземного стока СССР масштаба 1:2 500 000 составлена по гидрометрическим измерениям в створах рек с бассейнами площадью 1000 – 50 000 км^2 (для равнин) и 100 км^2 и более (для горных районов). При недостатке данных использовались бассейны с площадями, выходящими за указанные пределы.

При составлении карты использовано 2128 створов с продолжительностью наблюдений: до 10 лет – 1123 створа; 11–20 лет – 659; 21–30 лет – 300; остальных створов 46. Короткие ряды удлинялись по аналогам.

Следует иметь в виду, что карта приводит подземный сток в долях от поверхностного, эта доля составляет в среднем 40%. Как видно из табл. 9, до 75% площади бассейна занимают безрусловые склоны, где почти нет поверхностного стока. Карта подземного стока касается только тех участков, где развита микроручейковая сеть, а также русла и поймы рек значительных размеров . Что касается приводораздельных участков и безрусловых склонов, то здесь модули подземного стока должны быть выше, чем это показано на карте подземного стока.

Методика и типовые схемы расчленения гидрографа даны на рис. 5–7.

6. БАЛАНСОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

6.1. Влияние города на балансовые соотношения на застроенных территориях определяется следующими факторами: а) изменением режима стока и испарения; б) изменением воздушной циркуляции; в) загрязнением воздушного бассейна; г) изменением теплового режима; д) незначительным изменением режима осадков.

При определении водно-балансовых соотношений исследуемая городская территория в соответствии с п. 5.1 подразделяется на три яруса.

6.2. Уравнение водного баланса приводится по работе [20] (в обозначениях автора).

Для первого и второго ярусов

$$N+P_1+T+П+K+K_a=\alpha_4 V+\alpha_5 P_2 \pm W \pm (Д_1+Д_2), \qquad (14)$$

где N – атмосферные осадки; P_1 – приток поверхностных вод; T – водоподача; $П$ – количество воды для полива деревьев; K – конденсация; K_a – потери из канализации; α_4 – коэффициент уменьшения испарения (см. табл. 10); V – суммарное испарение; α_5 – коэффициент изменения поверхностного стока; P_2 – отток поверхностных вод; W – водообмен зоны аэрации с грунтовыми водами; $Д_1$ – изменение запаса влаги на поверхности; $Д_2$ – изменение запаса влаги в зоне аэрации;

Для третьего яруса

$$Q_1=\alpha_2 Q_2 \pm W \pm Д_3 \pm \alpha_3 J, \qquad (15)$$

где Q_1 – приток грунтовых вод; α_2 – коэффициент уменьшения стока подземных вод (барражный эффект, засыпка мест разгрузки и т.д.); Q_2 – отток грунтовых вод; $Д_3$ – изменение запасов грунтовых вод; α_3 – коэффициент изменения перетекания; J – подпитывание грунтовых вод (перетекание).

6.3. Для I яруса наибольшие изменения составляющих водного баланса на городских территориях касаются поверхностного стока и испарения.

Основные нарушения естественного поверхностного стока происходят из-за непроницаемых поверхностей (улицы, проезды, площади, кровли жилых и промышленных зданий); дождевой канализации, отводящей воду в подземные водоприемники; поверхностного водоотвода в виде кюветов, лотков и т.п.; искусственных водоемов и каналов.

Основные нарушения естественного испарения с поверхности земли происходят из-за непроницаемых и других искусственных поверхностей; создания искусственных водотоков и водоемов; подъема уровня грунтовых вод ; повышения температуры в городах.

Наблюдения над поверхностным стоком и испарением в городах, как правило, не производятся. Поэтому для водно-балансовых расчетов следует

Таблица 10. Соотношение элементов водного баланса на городских территориях (естественные условия приняты за единицу)

Элементы водного баланса	Степень урбанизации	
	средняя	высокая
Испарение	$\alpha_4 = 0{,}8-0{,}9$	0,4–0,6
Поверхностный сток	$\alpha_5 = 2{,}0-2{,}5$	3,6–4,5
Инфильтрация	0,7–0,8	0,5–0,6
Осадки	1,03	1,05

Таблица 11. Коэффициенты стока на городских территориях (СНиП II-32-74; СНиП II-47-80)

Наименование	Коэффициент стока дождевых вод при грунтах водосборных площадей		
	супесь	суглинок	глина
Кровли и асфальтобетонные покрытия	0,95	–	–
Бетонные покрытия	0,85	–	–
Брусчатые мостовые и черные щебеночные покрытия	0,6	–	–
Булыжные мостовые	0,45	–	–
Щебеночные покрытия, не обработанные вяжущими материалами	0,4	–	–
Грунтовые обочины:			
незадернованные	0,6	0,65	0,7
задернованные	0,55	0,6	0,65
Грунтовые водосборные площадки			
без дернового покрова	0,25	0,35	0,4
с дерновым покровом	0,15	0,25	0,3

принимать средние обобщенные данные по нескольким городам. В первом приближении для центральных районов европейской территории Союза (ЕТС) могут быть приняты следующие соотношения основных составляющих водного баланса для поверхности застроенных территорий (табл. 10), составленные по нескольким городам.

Под высокой степенью урбанизации понимается полностью застроенная территория, где дальнейший рост застройки по современным нормам возможен только за счет увеличения этажности зданий, но не расширения застройки в плане.

Под средней степенью урбанизации понимается территория, позволяющая дальнейшую застройку (имеются значительные по площади парки и сады).

Изменения элементов водного баланса, вносимые застройкой, относятся также к зоне аэрации, которая в процессе урбанизации характеризуется резко отличающимися от естественных процессами накопления и расходования воды.

6.4. В табл. 11 приводятся коэффициенты стока на городских территориях при различных грунтах и покрытиях. Коэффициентом стока называется отношение слоя поверхностного стока к слою атмосферных осадков за выбранный отрезок времени.

В табл. 12 даны коэффициенты стока по сезонам года [45].

Начало весеннего стока в городских условиях более раннее, чем в естественных, а его продолжительность больше (около месяца). Для весеннего стока характерна суточная цикличность. Амплитуды суточных колебаний стока так же, как и максимального весеннего стока в городе, выше, чем в естественных условиях.

Таблица 12. Коэффициенты стока на городских территориях по сезонам

Род поверхности	Весна	Лето – осень
Непроницаемые поверхности (с учетом испарения с микропонижений)	0,95	0,75–0,80
Неудобные земли	0,75	0,1
Зеленые насаждения	0,5	0,1
Лес (зеленые зоны)	0,2	–

Таблица 13. Сопоставление сроков схода снега у городов и вне зоны их влияния

Город	Дата схода снега в зоне влияния города	Дата схода снега вне зоны влияния города	Ускорение таяния снега у городов, дн
Вологда	2/IV–71	19/IV-71	18
	15/III–72	21/III–72	6
	15/IV–74	22/IV–74	9
Воркута	11/V–71	5/VI–71	25
	8/IV–72	10/V–72	32
Джезказган	2/III–74	25/III–74	23
Караганда	21/III–73	3/IV–73	13
	22/III–74	2/IV–74	11
Ленинград	3/IV–71	20/IV–71	17
	6/III–72	14/III–72	8
Норильск	14/V–70	11/VI–70	28
	30/IV–71	15/VI–71	48
Омск	8/IV–71	15/IV–71	7
	17/IV–72	25/IV–72	8
	22/III–74	9/IV–74	18
	31/III–75	10/IV–75	10
Оренбург	7/III–74	31/III–74	24
Пермь	7/IV–70	20/IV–70	13
	18/IV–71	25/IV–71	7
Уральск	7/III–74	18/III–74	11
Череповец	20/III–72	31/III–72	11
	30/IV–74	22/IV–74	19

Максимальный сток воды в пределах города наблюдается на площадях и улицах с асфальтированным покрытием, где коэффициент стока составляет 0,95, и только 5% объема снеговой воды заполняет неровности поверхности и потом испаряется. Большим, казалось бы, должен быть сток, сформированный в условиях многоэтажного жилого сектора, где значителен процент непроницаемых площадей. Однако величина его здесь в 2,8 раза меньше, чем стока в парковой зоне. Объясняется это тем, что в составе многоэтажной застройки около 60% площади занимают неасфальтированные дворы, расположенные в них палисадники и полосы озеленения вдоль улиц, обладающие высокой инфильтрационной способностью, а также сравнительно небольшими запасами воды в снеге.

6.5. Для 11 городов СССР, расположенных в различных географических зонах, были выполнены исследования скорости таяния снега. За эталон приняты данные ежедневных гидрометеорологических бюллетеней Гидрометцентра СССР. По этим данным определялись даты, когда граница сплошного снежного покрова проходила через район города. Сопоставляя дату перехода через город границы сплошного покрова с датой, установленной по наблюдениям в городе, можно определить в первом приближении опережение схода снега в зоне влияния города. В табл. 13 сопоставлены даты схода снега в районе городов и вне их. Опережение схода снега вокруг городов составило от 6 до 48 дней.

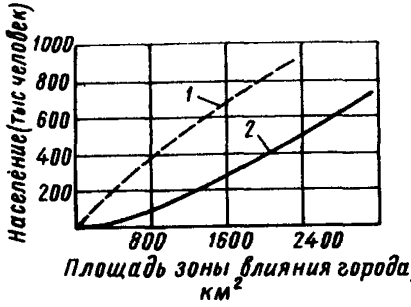


Рис. 8. Влияние города на процесс снеготаяния
1 – без промышленных объектов; *2* – с развитой промышленностью

6.6. Для определения зоны влияния города на процессы снеготаяния могут быть использованы зависимости, приведенные на рис. 8. Эти зависимости получены по осредненным данным для 25 городов СССР, разделенных на две группы: первая – города без промышленных объектов или с небольшим их количеством, вторая – города с развитой промышленностью. Это деление несколько условное и полученные результаты являются ориентировочными.

Например в условиях Курской области зимой, как правило, образуется устойчивый снежный покров. Наилучшие условия для формирования снежного покрова создаются на городской территории, где наиболее концентрированная застройка.

Наиболее динамичны запасы воды в снеге на магистралях, площадях и улицах с асфальтированным покрытием и большими транспортными нагрузками. Так как учесть запасы воды в этой части городского ландшафта практически невозможно, для расчета водного баланса можно принимать сумму осадков.

Пример 6. Расчеты водного баланса для города Г.

Рассматриваемая территория застроена следующим образом:

промышленные площадки	15 км²	что составляет	33%
селитебная застройка	13 "	" "	28%
не застроено	18 "	" "	39%
	46 км²		100%

В частном секторе коэффициент застройки $K_з$=0,1;
общая площадь асфальта $K_а$=1% площади частного сектора;
на участке двух-трехэтажных домов $K_з$=0,3 – 0,4; $K_а$=1–10%;
на участке четырехэтажных домов $K_з$=0,3; $K_а$=10%;
на участке пятиэтажной застройки и выше $K_з$=0,2; $K_а$=10%.

Рассматриваемая территория характеризуется неглубоким залеганием верхнего горизонта грунтовых вод (около 4 м) и хорошо проницаемыми грунтами ($K_ф$≈10 м/сут). Поэтому расчетная схема для составления водного баланса (согласно п. 5.1) состоит из двух ярусов: I и объединенного II-III.

Водный баланс рассматривается по данным инженерно-гидрогеологических изысканий за период 1978–1980 гг. Прежде чем приступить к анализу этих материалов, необходимо оценить, какое положение занимают уровни грунтовых вод указанных лет в многолетнем ряду режимных наблюдений над уровнем.

Как видно из рис. 9, начиная с осени 1977 г. началось заметное и устойчивое повышение уровня грунтовых вод, тогда как до этого времени в течение ряда лет уровни были достаточно стабильными. Если указанное повышение уровня в 1978–1979 гг. является случайным и не обусловлено подпором строящейся ГЭС, можно считать уровни 1978–1979 гг. имеющими вероятность порядка 3–4%. На этом повышенном фоне строятся дальнейшие расчеты водного баланса.

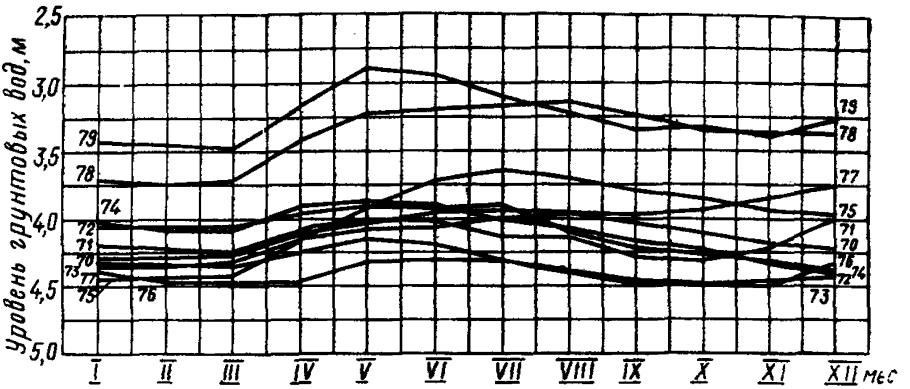


Рис. 9. Колебания грунтовых вод на территории города Г за 10 лет

Водный баланс для поверхности земли (рис. 10) выражен уравнением

$$\alpha + x + \beta + \gamma + \Delta = y + z + \gamma_1 + \omega. \qquad (16)$$

Приход:

подача воды для промышленных целей и жилых кварталов $-\alpha$;
атмосферные осадки $-x$;
полив зеленых насаждений $-\beta$;
разгрузка грунтовых вод в реки, каналы и пруды $-\gamma$;
конденсация $-\Delta$.

Расход:

поверхностный сток (в том числе в ливневую канализацию) $-y$;
испарение с поверхности земли $-z$;
питание грунтовых вод из рек, каналов и прудов $-\gamma_1$;
инфильтрация воды в почву $-\omega$.

Водный баланс для зоны аэрации (II ярус) и верхнего горизонта грунтовых вод (III ярус) (рис. 11) выражен уравнением

$$\gamma_1 + \omega_1 + \beta_1 + \omega_2 + \Delta_1 = \gamma_2 + \omega_3 + z_1 \qquad (17)$$

Приход:

питание грунтовых вод из рек и каналов $-\gamma_1$;
переток из нижнего водоносного горизонта $-\omega_1$;
утечки из коммуникаций (в том числе из ливневой канализации) $-\beta_1$;
инфильтрация атмосферных осадков $-\omega_2$;
конденсация $-\Delta_1$.

Расход:

разгрузка грунтовых вод в реки, в ручьи и каналы $-\gamma_2$;
переток в нижний водоносный горизонт $-\omega_3$;
испарение с поверхности грунтовых вод $-z_1$.

Пояснения к уравнениям водного баланса.

Для поверхности земли. При сборе исходных данных следует получать максимально точные сведения о водоподаче, так как это главная составляющая водного баланса. (Все остальные составляющие, за исключением атмосферных осадков, почти на порядок меньше.)

Атмосферные осадки в своем годовом ходе нанесены на графике (см. рис. 10) по среднемесячным данным. Можно также пользоваться декадными суммами осадков. Более мелкие интервалы времени для определения суммы осадков применять не рекомендуется. Зона аэрации, особенно при ее значительной мощности, обладает большой аккумулирующей способностью и служит регулятором инфильтрующих осадков. Поэтому следует считать, что месячные или декадные суммы атмосферных осадков наиболее приемлемы при водно-балансовых расчетах.

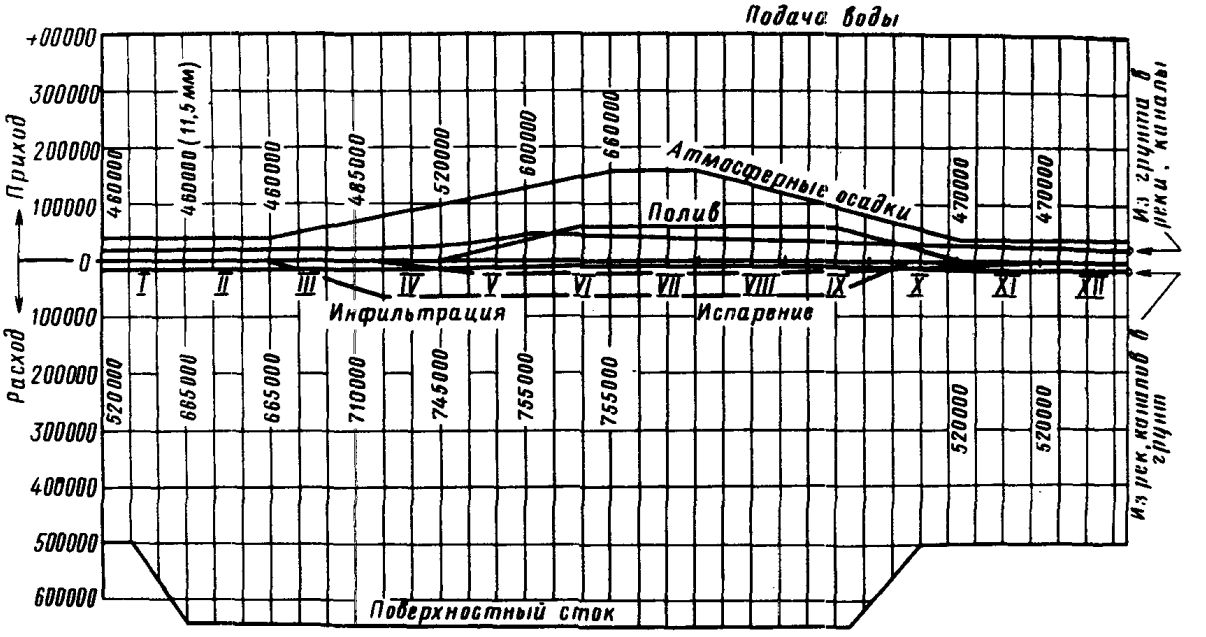


Рис. 10. График водного баланса поверхности территории города Г ($м^3$/сут)

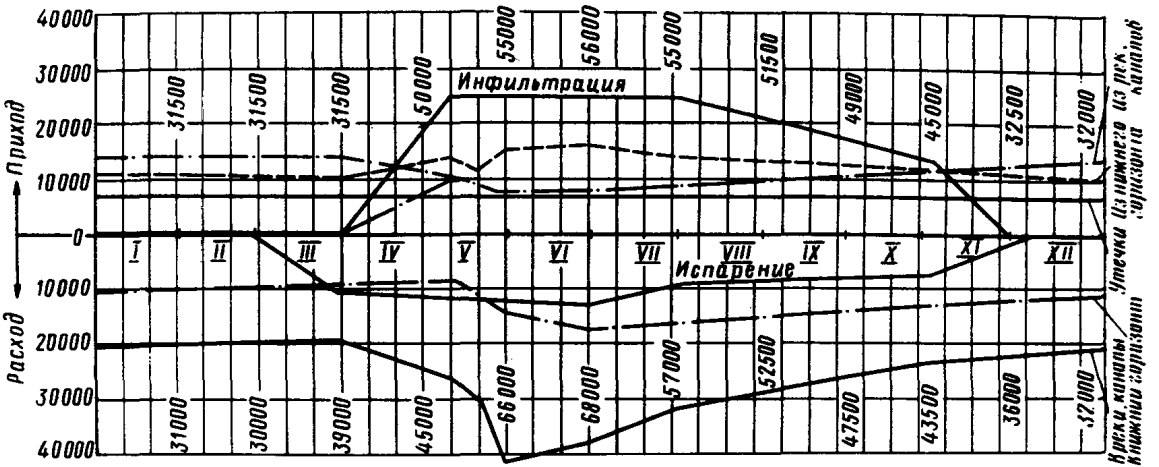


Рис. 11. График водного баланса зоны аэрации на территории города Г ($м^3$/сут)

Таблица 14. **Максимальные и минимальные величины потерь и притока в поверхностные водоемы**

Вероятность половодья P,%	Атмосферные осадки вероятностью P, м^3/сут		
	99	50	1
	Питание подземных вод из рек, озер, каналов		
10	25 600 (10.V)	14 200 (1.IV)	14 200 (1.IV)
	12 100 (1.VI)	7700 (1.VI)	7000 (1.VI)
1	30 700 (10.V)	17 100 (10.V)	14 900 (10.V)
	11 000 (1.VII–1.III)	8000 (1.VII)	7300 (1.VI)
0,1	37 200 (10.V)	23 700 (10.V)	21 600 (10.V)
	10 800 (1.VII–1.III)	7800 (1.VI)	7200 (1.VI)
	Разгрузка подземных вод в реки, озера, каналы		
10	14 400 (10.V)	19 400 (1.IV)	19 400 (1.IV)
	30 000 (1.VII)	38 900 (1.VI)	41 500 (1.VI)
1	16 300 (10.V)	19 400 (20.III)	19 400 (20.III)
	34 200 (1.VII)	41 200 (1.VII)	42 700 (1.VII)
0,1	17 600 (10.V)	19 400 (20.III)	19 400 (20.III)
	32 900 (1.VII)	41 200 (1.VI)	43 500 (1.VI)

Разгрузка грунтовых вод в реки, каналы и пруды и питание грунтовых вод из рек и каналов могут быть учтены весьма приближенно. В условиях застроенной территории каналы подвергаются постоянной реконструкции. Их расширяют, углубляют или, наоборот, они заносятся наносными отложениями, зарастают растительностью. Некоторые каналы выходят из строя другие сооружаются вновь.

Сток ручьев, протекающих по исследуемой территории, отличается постоянством в течение года. Это объясняется тем, что эти ручьи несут главным образом воды, сбрасываемые промышленными предприятиями, в частности сток ТЭЦ, а эти величины достаточно устойчивы.

Испарение с поверхности земли на изучаемой территории не измерялось и взято приближенно по данным двух ближайших метеостанций.

Потери из рек, озер, каналов на изучаемой территории рассмотрены в зависимости от вероятности половодья реки и осадков. На части территории происходит питание, а на другой – разгрузка подземных вод.

Вероятность половодья реки принималась в трех вариантах: один раз в 10 лет (P=10%), в 100 лет (1%) и в 1000 лет (0,1%).

Осадки также принимались в трех вариантах: наименьшее количество осадков, среднее (50%) и наибольшее количество осадков (1%) за 100 лет.

Все эти случаи даны во взаимных сочетаниях, результаты сведены в табл. 14.

Из таблицы видно, что при увеличении осадков потери воды из рек уменьшаются, а разгрузка подземных вод в поверхностные водотоки увеличивается. Это вполне объяснимо, так как выпадающие осадки впитываются на значительной части территории.

В период отсутствия осадков взаимодействие грунтовых вод с поверхностными водотоками сравнительно невелико, каналы никакого влияния на форму гидроизогипс не оказывают.

Для зоны аэрации и верхнего горизонта подземных вод. Переток из нижнего горизонта в верхний и наоборот в общем балансе этой зоны составляет около 25%. Величина перетока изменяется:

по времени года: наибольший переток летом, наименьший – в предвесенний период весеннего половодья; колебания в 1,5 – 2 раза (от 8 до 17 тыс. м^3/сут);

в зависимости от величины половодья на реке, при горизонтах воды в реке вероятностью 1 и 10% переток практически одинаков;

в зависимости от количества осадков переток весной практически не меняется, летом меняется от 13 000 м^3/сут при отсутствии осадков до 18 000 при осадках вероятностью 1%.

Сопоставим величины утечек и атмосферных осадков на рассматриваемой территории площадью F=40 км^2. Если принять атмосферные осадки в среднем 2 мм/сут, то на всю территорию это дает 80 000 м^3/сут. Эта величина условно распределена на площади 20 км^2, так как половина площади занята непроницаемыми площадями. Если принять, что коммуникации располагаются взаимно перпендикулярно с расстоянием между ними 200 м, то на 1 км^2 территории придется 10 км коммуникаций. Будем считать, что утечки из коммуникаций, растекаясь в стороны до глубины уровня грунтовых вод, обводняют полосу шириной 10 м. Тогда общая площадь обводнения будет $F = 40 \cdot 10 \cdot 0.01 = 4$ км^2

Таким образом, имеем сравнительные объемы воды: от осадков 80 000 м^3/сут на площади 20 км^2 – 4000 м^3/(сут·км^2) от утечки 60 000 м^3/сут на площади 4 км^2 – 15 000 м^3/(сут·км^2).

Как видно, интенсивность обводнения от утечек значительно выше, чем от осадков, однако обводнение осуществляется отдельными полосами. Атмосферные осадки обводняют проницаемые площади полностью, но на границах проницаемых и непроницаемых площадей также возникают сосредоточенные потоки воды, которые подобны утечкам.

В приведенном расчете приняты осадки, равномерно распределенные в течение года, для возможности сравнения их с ежедневными утечками. При прохождении сильных дождей соотношение будет отличаться от приведенного.

При разгрузке грунтовых вод в реку расчет ведется на 1 км длины участка вдоль реки.

K_Φ=10 м/сут; i=0,002 (уклон грунтового потока).

При толщине разреза 10 м F=1000·10 = 10 000м^2; $V = K_{\Phi i}$=10·0,002 =0,02 м/сут; $Q = FV$=10 000·0,02=200 м^3/сут, ее можно не учитывать.

В обычное время, когда уровень в реке ниже уровня грунтовых вод, гидроизогипсы располагаются параллельно реке, а линии тока грунтовых вод расположены перпендикулярно реке (рис. 12–14). В период половодья, когда речные воды создают подпор грунтовых вод, гидроизогипсы как бы разворачиваются на 90° и располагаются перпендикулярно реке, а линии тока соответственно параллельно реке.

В течение года на изменения уровня реки влияют попуски вышерасположенной ГЭС.

Пример 7. Расчеты водного баланса для Москвы [45].

Территория Москвы, %, застроена следующим образом:

"непроницаемые территории" (дома, улицы, асфальт)	30
промышленные предприятия, железные дороги, водные поверхности и т.д.	20
зеленые насаждения (парки)	30
резервные земли, огороды, парки, сады	20
Итого	100

Общая площадь непроницаемых территорий может быть принята равной 40%.

Средний коэффициент стока для всей территории Москвы равен

K=0,85·0,4 + 0,15 (0,3 + 0,3) = 0,34 + 0,09 = 0,43.

Для части города в пределах Садового кольца K=0,73.

Для территории, находящейся в естественном состоянии на расстоянии 60 км от Москвы K=0,28.

В расчетах водного баланса (табл. 16) осадки для Москвы приняты в количестве 700 мм, что соответствует результатам расчетов среднемноголетней величины осадков для всех осадкомерных станций в пределах города по данным Справочника по климату СССР (1967). Основная масса

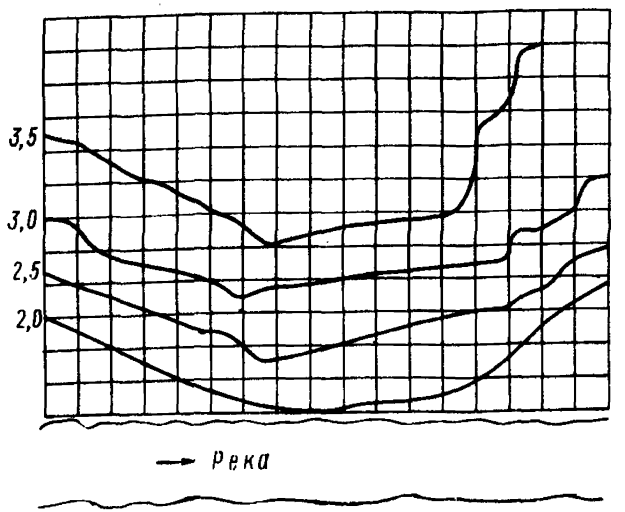


Рис.12. Гидроизогипсы на территории города Г на 20 марта

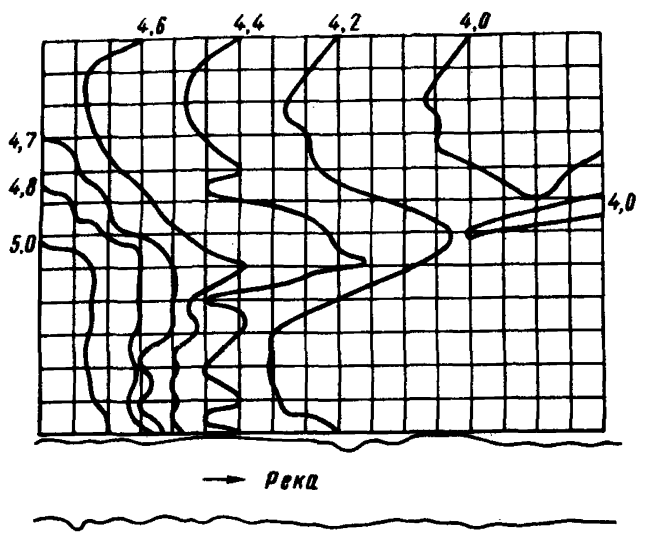


Рис. 13. Гидроизогипсы на территории города Г на 10 мая

осадков выпадает в виде дождей в летний и осенний периоды, а на снег и осадки периода снеготаяния приходится около 200 мм.

Расчет водного баланса Москвы проводился дифференцированно для теплого и холодного периодов года с учетом различных городских поверхностей. Полный сток определяется как сумма поверхностного и подземного,

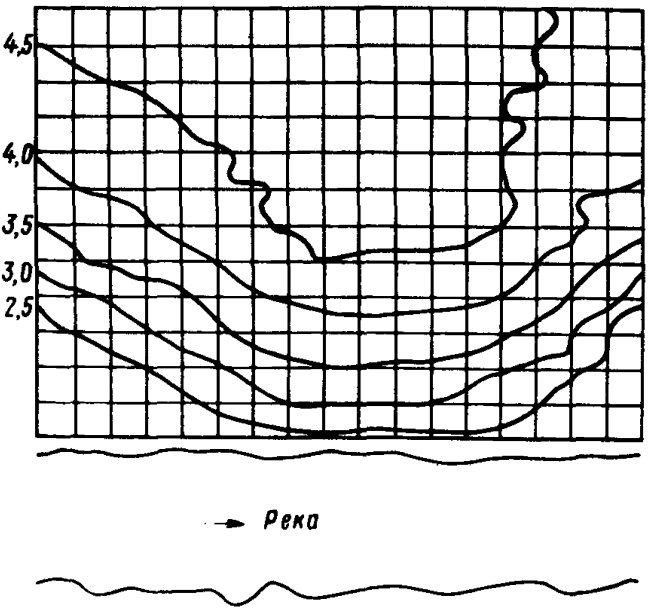


Рис. 14. Гидроизогипсы на территории города Г на 1 августа

Таблица 15. Водный баланс территории Москвы, мм

Территория	Сезон	Осадки	Полный сток	Питание подземных вод	Поверхностный сток	Валовое увлажнение территории	Испарение	Коэффициент полного стока
Вся Москва	Зима–весна	200	150	27	123	77	50	0,75
	Лето–осень	500	150	23	127	373	350	0,30
	Год	700	300	50	250	450	400	0,43
Центр в пределах Садового кольца	Год	700	510	35	475	225	190	0,73

рассчитанного для двух периодов года. Испарение определено по разности между осадками и полным стоком.

График изменения составляющих водного баланса Москвы в течение года показан на рис. 15.

Анализ табл. 15 показывает, что абсолютные значения поверхностного и подземного стока, а также структура расчета стока примерно одинаковы в холодный и теплый периоды года. Однако летом и осенью осадков выпадает в 2,5 раза больше. Наблюдается также значительная разница в валовом увлажнении территории: в зимне-осенний период оно почти в пять раз мень-

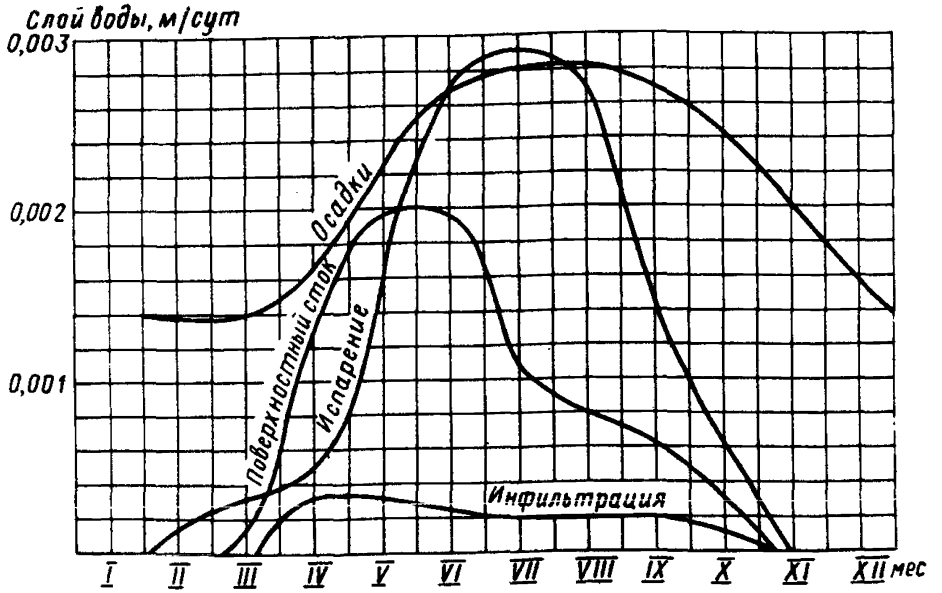


Рис. 15. График водного баланса для поверхности (Москва)

Таблица 16. **Сопоставление отдельных элементов водного баланса городской и сельской территорий**

Элемент водного баланса	Москва в пределах Садового кольца	Москва полностью	Водосбор р.Москвы до г.Звенигорода
Осадки, мм	700	700	700
Полный речной сток, мм	510	300	200
Подземный сток, мм	35	50	70
Поверхностный сток, мм	475	250	130
Испарение	190	400	500
Валовое увлажнение территории, мм	225	450	570
Коэффициент полного стока	0,73	0,43	0,28
Коэффициент питания рек подземными водами	0,15	0,11	0,12
Подземный сток, % от полного речного	7	16	35

ше, чем в летне-осенний. В холодный период на испарение расходуется около 65% почвенной влаги (валовое увлажнение), а в теплый период практически все валовое увлажнение территории города (94%) расходуется на испарение. По этой причине в холодную часть года на питание подземных вод расходуется почти 1/3 валового увлажнения, а в теплый – лишь 6%.

В табл. 16 приведен результат приближенного расчета водного баланса центра Москвы в пределах Садового кольца. В этой части города гуще застройка, больше относительная площадь асфальтированных улиц и площадей и соответственно выше полный сток, чем для территории города в целом. Существенно уменьшается валовое увлажнение территории (в 2 раза), а

также питание подземных вод (в 1,5 раза) и испарение (в 1,8 раза). С этой части города почти 3/4 осадков расходуется на поверхностный сток и лишь 7% от полного стока составляет питание подземных вод. В условиях сельского ландшафта этот процент в пять раз выше.

Средний годовой коэффициент стока с территории Москвы равен 0,43. Для сравнения укажем, что коэффициент стока в бассейне р. Москвы до Звенигорода за многолетний период составляет 0,28.

7. МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ НАД УРОВНЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

7.1. Одной из главных задач инженерно-гидрогеологических изысканий и исследований является оценка колебаний уровней подземных вод с целью их вероятностного прогнозирования. Эти колебания устанавливаются путем обработки данных многолетних режимных наблюдений на государственной стационарной сети министерства геологии. Обработка выполняется методами математической статистики с построением кривой обеспеченности (эмпирической или теоретической).

7.2. Под уровнем подземных вод, который подвергается математической обработке, в настоящих Рекомендациях понимается глубина до горизонта подземных вод, отсчитываемая от поверхности земли (устья скважины). Для того чтобы эта величина имела положительное значение, условно считается, что вертикальная ось имеет положительное направление вниз. При таком направлении оси расположение верхней и нижней ветвей кривой обеспеченности соответствует вертикальному разрезу водоносного слоя, а также отсчету глубины от поверхности земли.

При статистической обработке не рекомендуется выражать уровни подземных вод в абсолютных отметках, так как при этом плоскость отсчета принимается на уровне моря. Искажающее влияние плоскости отсчета изложено в п. 7.16.

При необходимости получения абсолютных отметок уровней той или иной расчетной обеспеченности требуется выразить эти уровни в расстояниях от поверхности земли, после чего вычесть это расстояние из абсолютной отметки устья скважины.

7.3. При формировании ряда уровней подземных вод следует отбирать фазово-однородные уровни, например минимальные предвесенние или максимальные весенние. К фазово-однородным относятся также минимальные годовые, или летне-осенние, или 30-дневные максимальные осенне-зимние. Для строительства требуются, как правило, максимальные уровни, для водоснабжения – минимальные.

В некоторых случаях нет возможности выделить фазово-однородные уровни, так как экстремальные величины проявляются в различные годы в разное время – весной, летом или осенью. Характер и различные типы внутригодовых колебаний подземных вод в одной и той же скважине даны на рис. 16 и 17.

В случаях, когда фазово-однородные уровни проявляются незакономерно, следует выбирать один годовой максимум или минимум независимо от сезона его проявления. Дальнейшая статистическая обработка таких уровней выполняется излагаемыми методами. Такая выборка правомерна, так как исходным положением является случайность проявления экстремума в том или ином месяце.

7.4. Графики на рис. 16 и 17 дают возможность установить водность года применительно к уровням верхнего водоносного горизонта. Наибольшая или наименьшая площадь графика, ограниченная снизу условной горизонтальной плоскостью отсчета, проведенной через низшую точку, а сверху линией уровня подземных вод, характеризует соответственно наиболее многоводный или маловодный годы. Можно ранжировать эти площади для всего ряда наблюдений в данной скважине и получить вероятностные статистические параметры водности года.

7.5. Многолетний ряд уровней выбирается из среднемесячных уровней каждого года. Однако наблюдения тех месяцев, в которые попадают

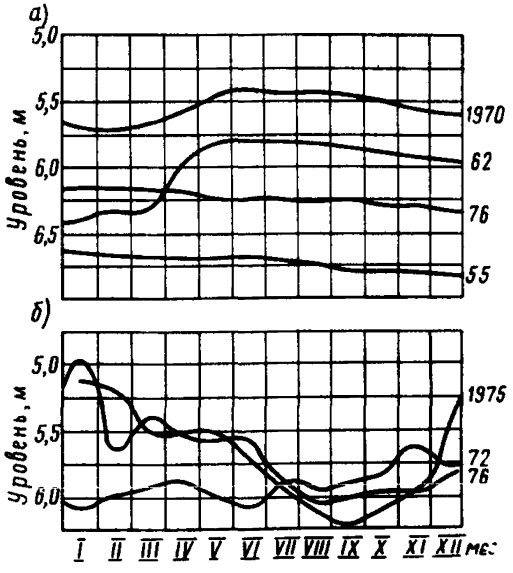


Рис. 16. Типы внутригодового колебания уровней подземных вод

а – Волгоградская область, *б* – Краснодарский край

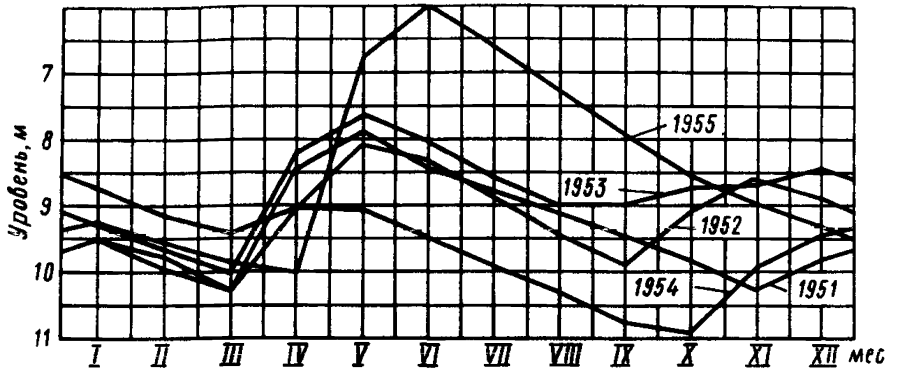


Рис. 17. Типы внутригодового колебания уровней подземных вод в Ленинградской области

экстремальные значения, следует анализировать более детально. Режимные наблюдения над уровнем производятся 2–5 раз в месяц, иногда один раз в 3 дня, поэтому экстремальный уровень может быть зафиксирован только с некоторым приближением. Этот уровень и включается в обрабатываемый ряд вместо среднемесячного.

Из большого количества случайно взятых рядов выявлено, что экстремальные уровни отличаются от среднемесячных на 10–15 см. Эта величина может быть значительно больше в условиях подпора грунтовых вод реками и водохранилищами.

Таблица 17. Координаты для построения клетчатки вероятностей Хазена

Вероятность P,%	Горизонтальное расстояние от средней абсциссы P=50%	Вероятность P,%	Горизонтальное расстояние от средней абсциссы P=50%
50	0	6	66,8
48	2,2	5	70,7
46	4,3	4,5	72,8
44	6,5	4	75,3
42	8,7	3,5	77,9
40	10,9	3	80,9
38	13,1	2,5	84,3
36	15,4	2	88,3
34	17,7	1,5	93,3
32	20,1	1	100
30	22,5	0,9	101,7
28	25,1	0,8	103,6
26	27,7	0,7	105,7
24	30,4	0,6	108
22	33,2	0,5	110,7
20	36,2	0,4	114
19	37,7	0,3	118,1
18	39,4	0,2	123,7
17	41	0,1	132,9
16	42,8	0,09	134,2
15	44,6	0,08	135,7
14	46,4	0,07	137,3
13	48,4	0,06	139,2
12	50,5	0,05	141,5
11	52,7	0,04	144,2
10	55,1	0,03	147,6
9	57,6	0,02	152,2
8	60,4	0,01	159,9
7	63,5		

При строительстве имеет практическое значение получение экстремального уровня продолжительностью стояния, например, один месяц. Такой уровень в обычных условиях меньше экстремального примерно на 10–15 см. Таким образом, экстремум длительностью стояния один месяц может быть в первом приближении и в обычных условиях приравнен к среднему уровню того месяца, в котором он наблюдается.

7.6. После того, как произведена ежегодная выборка тех или иных фазово-однородных уровней, следует ее ранжировать, т.е. расположить в порядке возрастания (для максимумов), или убывания (для минимумов). Затем для каждого члена ряда вычисляется его эмпирическая обеспеченность по формуле

$$P_m = m/(n+1), \qquad (18)$$

где m – порядковый номер члена в ранжированном ряду; n – число членов ряда.

7.7. Нанесение величин уровней на вероятностную клетчатку Хазена выполняется в соответствии с их эмпирической обеспеченностью. Горизонтальная шкала клетчатки Хазена может быть построена по данным табл. 17. Вертикальная шкала имеет обычный масштаб.

Иногда ряд экстремальных уровней может иметь максимум (или минимум), резко отклоняющийся (отскакивающий) от остальных членов ряда. Важно попытаться определить вероятность (обеспеченность) этого экстремума привлечением генетического анализа. Такой уровень наносится на клет-

чатку с той вероятностью, которая получена путем указанного анализа. Однако этот вопрос является предметом дальнейших исследований.

7.8. Прежде чем решить вопрос о необходимости построения теоретической кривой обеспеченности, следует построить эмпирическую кривую. Это вызвано тем, что ряды продолжительностью 25–30 лет не дают возможности надежного построения теоретической кривой (см. п. 7.19).

В пользу построения эмпирической кривой говорит то, что в гидрогеологических расчетах применяются обеспеченности порядка $P = 95–97\%$, т.е. один раз в 20–33 года. Уровни такой обеспеченности могут быть получены непосредственно по рядам многолетних режимных наблюдений продолжительностью 20–30 лет при помощи эмпирической кривой обеспеченности.

7.9. Одновременно с применением эмпирических кривых надлежит привлекать к вероятностному прогнозированию уровней и теоретические кривые распределения. К настоящему времени в гидрогеологии применяют следующие типы кривых:

трехпараметрическое гамма-распределение при положительной и отрицательной асимметрии (иногда употребляются термины – левоасимметричный и правоасимметричный тип); это распределение табулировано, что дает простую возможность построения кривой обеспеченности;

логарифмически – нормальное распределение;

нормальное распределение;

сложные кривые [33].

В работах [34, 82] произведено обобщение большого количества рядов уровней подземных вод. Результаты обобщения приводятся в табл. 18.

7.10. Часто применяют проверку соответствия эмпирических и теоретических кривых обеспеченности при помощи критериев согласия χ^2, Стьюдента, Фишера и многих других. Надо отметить, что сходимость, определенная подобным образом, является низкой [33]. Это объясняется тем, что критерии согласия разработаны для иных целей [23].

7.11. Одномодальные кривые распределения не охватывают все случаи, встречающиеся в практике, в частности при анализе уровней подземных вод. Здесь широко распространены двухмодальные кривые (В.С.Ковалевский называет их сложными). По данным его работы [34], доля двухмодальных кривых распределения среди всех обработанных рядов составляет для весенних максимальных уровней 40%, для среднегодовых 35%.

Взятый нами для примера ряд уровней подземных вод в Ленинградской обл. также дал двухмодальные кривые. На рис. 18 даны максимальные весенние и минимальные предвесенние уровни.

7.12. Построение теоретической кривой обеспеченности выполняется следующим образом.

Пример. 8 Построение теоретической кривой обеспеченности.

Ряд наблюдаемых максимальных весенних уровней по скважине в Ленинградской обл. дан в табл. 19. В результате расчета методом моментов получены параметры

$$H_0 = 7{,}92 \text{ м}; \quad C_v = \sqrt{\frac{0{,}38}{24}} = 0{,}13; \quad C_s = \frac{0{,}019}{24 \cdot 0{,}13^3} = 0{,}4,$$

где H_0 – среднее значение уровня, C_v – коэффициент изменчивости, C_s – коэффициент асимметрии.

Примем трехпараметрическое гамма-распределение, табулированное в зависимости от отношения C_s/C_v [71]. Таблицы составлены для отношений C_s/C_v=0,5; 1,0; 1,5; 2 и т.д. до 6. В данном случае мы получили отношение C_s/C_v=3. Поскольку ряд ранжирован в возрастающем порядке, берем расчетные обеспеченности в виде

$$P' = 1 - P.$$

Далее вычисляем квантили теоретической кривой обеспеченности. Для вероятности P=1% получаем P'=99%.

Из работы [71, с. 90] берем по таблице модульный коэффициент, который при C_v=0,13 равен 0,736 (по интерполяции). Таким образом ордината кривой обеспеченности при P=1% $H_{1\%} = H_0 K = 7{,}92 \cdot 0{,}376 = 5{,}85$ м.

Таблица 18. **Частота появления различных типов кривых распределения уровней грунтовых вод**

Типы кривых	Частота появления различных кривых распределения уровней								
	предвесенних (минимальных)			весенних (максимальных)			среднегодовых		
I-с нормальным законом распределения	4	–	17	10	–	9	8	1	18
	1		3	3		8	2	6	12
II-с логарифмически нормальным законом распределения	261	11	38	137	4	21	207	8	37
	66	46	29	42	24	16	62	47	23
III-с левоасимметричным распределением	75	8	15	113	9	16	66	5	20
	19	29	12	34	54	12	19	29	13
IV-с правоасимметричным распределением	12	2	25	17	2	31	10	2	26
	3	8	19	5	11	24	2	12	17
V-со сложным законом распределения	46	4	35	51	2	52	53	1	54
	11	17	27	16	11	40	15	6	35
Итого	398	25	120	328	17	129	344	17	155
	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Примечания: 1. Над чертой – число случаев, под чертой – %

2. Первые столбцы – данные анализа всех кривых из работы [82]; вторые – то же, с рядом наблюдений 20–25 лет [82]; третьи – результаты, заимствованные из работы [34].

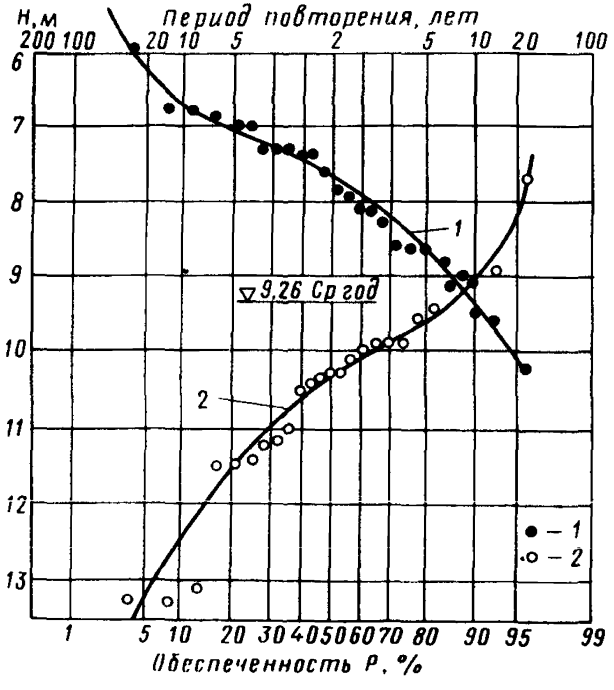


Рис. 18. Кривые обеспеченности уровней подземных вод

1 – максимальные весенние; *2* – минимальные предвесенние

Аналогично вычисляем ординаты других обеспеченностей.

Квантили теоретической кривой обеспеченности 1% – 5,85, 10% – 6,68 50% – 7,84; 80% – 8,71; 95% – 9,74 и 99% – 10,6 м.

По этим данным строим теоретическую кривую обеспеченности (рис. 19) по клетчатке Хазена. Как видим, она удовлетворительно соответствует эмпирическим точкам.

7.13. Ряды уровней подземных вод обладают автокорреляцией. По данным работы [34], при сдвиге τ=1 году коэффициенты автокорреляции составляют 0,4–0,6.

Учет внутрирядной корреляции разработан в достаточной степени [67] и мог бы быть применен при статистической обработке уровней подземных вод. Однако, согласно п. 7.8, основной кривой при обработке уровней подземных вод является эмпирическая кривая обеспеченности.

7.14. В многолетних рядах наблюдений над уровнем подземных вод могут проявляться циклические изменения. Однако эти изменения трудно поддаются определению, этот вопрос требует дальнейших исследований.

7.15. В многолетних рядах наблюдений над уровнем могут проявляться трэндовые (однонаправленные) изменения. На территории СССР преобладает явление истощения запасов подземных вод, составляющее в среднем 0,002 мм слоя в год.

Иногда трэндовые изменения бывают весьма значительными.

7.16. Коэффициент изменчивости (вариации) C_v уровней подземных вод, как сказано выше, определяется по формуле

$$C_v = \sigma / H_0 ,$$

Таблица 19. Статистическая обработка ранжированного ряда уровней

H_i, м	$K=H_i/H_0$	$K-1$	$(K-1)^2$	$(K-1)^3$	$P_m=\frac{m}{(n+1)}100\%$
5,97	0,75	−0,25	0,06	−0,015	3,8
6,76	0,85	−0,15	0,02	−0,003	7,7
6,77	0,86	−0,14	0,02	−0,003	11,5
6,94	0,88	−0,12	0,01	−0,001	15,4
7,04	0,89	−0,11	0,01	−0,001	19,2
7,06	0,89	−0,11	0,01	−0,001	23,0
7,24	0,91	−0,09	0,01	−0,001	26,9
7,26	0,92	−0,08	0,01	−0,001	30,8
7,28	0,92	−0,08	0,01	−0,001	34,6
7,4	0,94	−0,06	–		38,4
7,41	0,94	−0,06	–		42,3
7,62	0,96	−0,04	–	–	46,1
7,87	1	–	–	–	50,0
7,9	1	–	–	–	53,9
8,07	1,02	0,02	–	–	57,8
8,1	1,02	0,02	–	–	61,6
8,29	1,03	0,03	–	–	65,4
8,62	1,09	0,09	0,01	0,001	69,3
8,64	1,09	0,09	0,01	0,001	73,1
8,65	1,09	0,09	0,01	0,001	77,0
8,78	1,11	0,11	0,01	0,001	80,8
9,02	1,14	0,14	0,02	0,003	84,6
9,42	1,19	0,19	0,04	0,008	88,5
9,58	1,21	0,21	0,04	0,008	92,3
10,21	1,29	0,29	0,08	0,023	96,2
197,9	–	–	0,38	+0,019	–

где σ – среднее квадратическое отклонение ряда многолетних уровней, м; H_0 – среднее значение ряда многолетних уровней, м.

При определении коэффициента изменчивости C_v следует учитывать закономерности его изменения.

Пример 9. Допустим, что уровни подземных вод изменяются от 0,5 до 5 м через 0,5 м. Ряд состоит из следующих величин: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 м. При обработке этого ряда получены параметры H_0=2,75 м, σ=1,43 м, C_v=0,52 (табл. 20, ряд 1).

Теперь допустим, что ряд как бы сдвигается на 5 м вниз и начинается с цифры 5,5 м, изменяясь точно так же через 0,5 м. Очевидно, что изменчивость ряда остается прежней, среднее квадратическое отклонение σ = 143 м. Однако средняя величина увеличилась на 5 м и теперь имеет значение 7,75 м. В силу этого величина C_v будет 0,18 вместо 0,52 (табл. 20, ряд 2). В таблице даны пять рядов, сдвинутых вниз на 5 м каждый. В результате коэффициент C_v изменяется от 0,52 до 0,06.

Можно сделать вывод, что при статистической обработке уровней коэффициенты изменчивости являются несравнимыми.

7.17. Коэффициент асимметрии C_s не зависит от уровня отсчета, что очевидно из его математического выражения

$$C_s = \Sigma(H_i - H_0)^3 / n\sigma^3. \qquad (19)$$

Для определения коэффициента асимметрии C_s желательно наличие ряда продолжительностью 30 и более лет.

7.18. Для возможности перенесения параметров кривой обеспеченности, полученных для режимной станции и на объект изысканий, требуется вы-

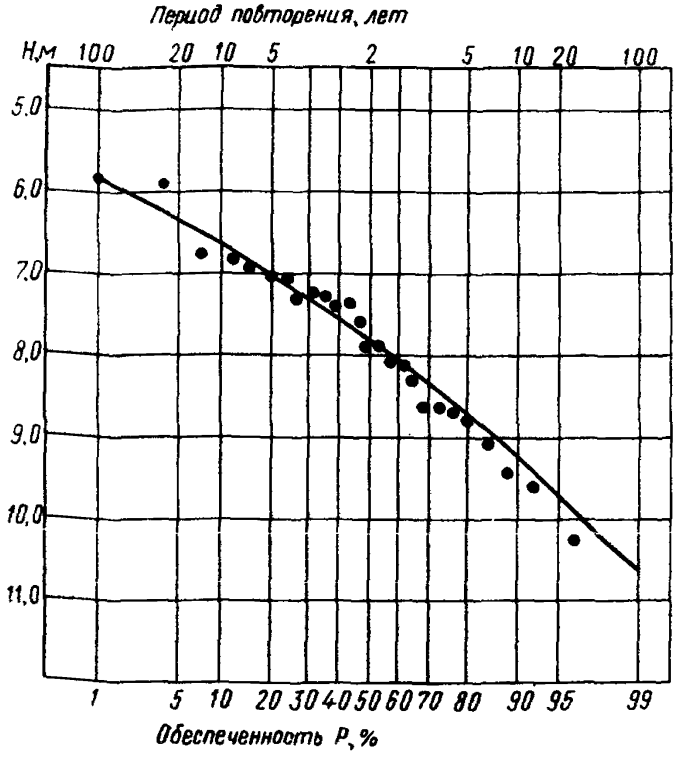


Рис. 19. Кривые обеспеченности максимальных весенних уровней (Ленинградская область)

Таблица 20. Изменение коэффициента изменчивости C_v

№ ряда	Диапазон изменения уровня	H_0	σ	C_v
1	0,5–5	2,75	1,43	0,52
2	5,5–10	7,75	1,43	0,18
3	10,5–15	12,75	1,43	0,11
4	15,5–20	17,75	1,43	0,08
5	20,5–25	22,75	1,43	0,06

полнить наблюдения над уровнями подземных вод в соответствии с плановыми сроками изысканий, но не менее года, а для ответственных объектов 2–3 года. При выборе режимных станций-аналогов необходимо стремиться к удовлетворению следующих условий: длина ряда наблюдений должна быть не менее 25 лет, причем станция должна быть действующей; режим подземных вод на объекте изысканий и на станции-аналоге должен быть сходным.

7.19. Вопрос о минимальной продолжительности рядов наблюдений, пригодных для статистической обработки, представляет большую сложность, так как каждый ряд имеет свою численную структуру. Различные комбинации этой численной структуры могут быть такими, что более короткий ряд может оказаться более репрезентативным нежели более длинный ряд. Можно принять, что ряды продолжительностью менее 20 лет не рекомен-

дуется подвергать статистической обработке. Такой вывод сделан на основе анализа многих рядов наблюдений, а также с учетом ряда исследований [33. 34. 35, 36, 74, 82].

7.20. При статистической обработке рядов многолетних уровней подземных вод иногда оперируют ежегодными амплитудами уровней.

Амплитуда уровней есть разность минимального и максимального уровней в данном году. Максимальный уровень может быть выдающимся, наивысшим за все годы, но минимальный уровень в этом же году вероятнее всего будет относительно высоким, учитывая общую повышенную водность данного года. (По 11 скважинам Ленинградской обл. средний коэффициент корреляции таких уровней равен 0,6, изменяясь в пределах 0,32 – 0,87.) В результате амплитуда может оказаться самой обычной, не выделяющейся. И наоборот, амплитуда может быть самой большой, а отметка максимального уровня при этом может быть невысокой.

Можно сделать вывод, что амплитуда колебаний уровней подземных вод не является показательной характеристикой

8. ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВЕННОГО РЕЖИМА ГРУНТОВЫХ ВОД НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Основные типы режима

8.1. Режим подземных вод весьма различен и приобретает разнообразные черты в зависимости от природной обстановки. Наибольшее влияние природные условия оказывают на режим грунтовых вод.

Существующее районирование территории СССР по особенностям формирования режима подземных вод [32, 38] основывается на выявлении главных режимообразующих факторов, обусловливающих основные количественные изменения в подземных водах данного участка. Факторы, являющиеся второстепенными при районировании крупных территорий, приобретают главенствующее значение при выделении более мелких участков. В табл. 21 дана схема районирования территории от крупных регионов, охватывающих провинции, до небольших участков. При этом выделение каждой таксономической единицы районирования режима грунтовых вод производится по степени определяющего воздействия того или иного фактора.

8.2. Для характеристики основных закономерностей естественного режима грунтовых вод в региональном плане и необходимости учета таких закономерностей при изучении режима на городских территориях для целей прогноза подтопления рассмотрим существующую схему районирования естественного режима грунтовых вод для территории европейской части РСФСР (вне зоны многолетнемерзлых пород) на основе приведенной схемы районирования в табл. 21. Указанная территория по особенностям формирования режима находится в двух гидрогеологических провинциях: устойчивого сезонного промерзания зоны аэрации (II) и спорадического промерзания зоны аэрации (III). Контуры таксономических единиц показаны на рис. 20. Этим провинциям соответствуют типы режима грунтовых вод: сезонного, преимущественно весеннего и осеннего, питания грунтовых вод (тип II) и круглогодичного, преимущественно зимнего питания грунтовых вод (III). Ведущими показателями районирования являются радиационный (тепловой) баланс и промерзание зоны аэрации.

В пределах вышеназванных провинций выделены гидрогеологические зоны по степени увлажнения территории (см. рис. 20): зона обильного питания (II-А), зона умеренного питания (II-Б), зона недостаточного питания (II-В и III-В). Этим зонам соответствуют подтипы режима грунтовых вод. Критерий выделения: соотношение величин атмосферных осадков и испарения. Типовые графики режима для гидрогеологических провинций и зон даны на рис. 21 а.

Таблица 21. Схема районирования территории СССР по особенностям формирования режима подземных вод (по С.В.Ковалевскому и А.А.Коноплянцеву)

Гидрогеологическая провинция	Гидрогеологическая зона	Гидрогеологическая область	Гидрогеологический район	Гидрогеологический участок	Гидрогеологический подучасток
Вечной мерзлоты С устойчивым промерзанием зоны аэрации Спорадического промерзания зоны аэрации	Обильного питания Умеренного питания Недостаточного питания	Слабодренированная (равнины, низменности) Дренированная (возвышенности, плоскогорья) Сильно дренированная (горные районы)	Выделяется по литологии водовмещающих пород	Выделяется по геоморфологическим элементам: междуречье, склоновый, террасовый и приречный	Выделяется по мощности зоны аэрации, м: до 1; от 1 до 4; св. 4

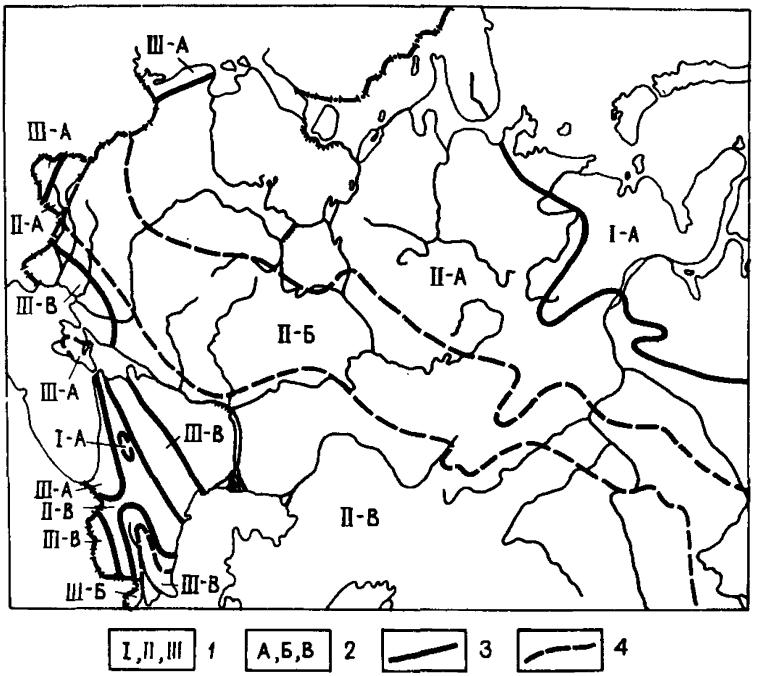


Рис. 20. Схематическая карта районирования территории РСФСР по типам естественного режима грунтовых вод (авторы В.С.Ковалевский, А.А.Коноплянцев)

1 – типы режима грунтовых вод;

I – кратковременного, преимущественно летнего питания, *II* – сезонного, преимущественно весеннего и осеннего питания, *III* – круглогодичного, преимущественно зимнего питания; *2* – подтипы режима: *А* – обильного питания, *Б* – умеренного питания, *В* – скудного питания; *3* – граница гидрогеологических провинций по типам режима грунтовых вод; *4* – граница гидрогеологических зон по подтипам режима грунтовых вод

Типовые графики колебания грунтовых вод, в зависимости от глубины залегания уровней приведены на рис. 21.б.

Отметим некоторые закономерности естественного режима грунтовых вод.

Годовая амплитуда определяется следующими основными факторами: атмосферными осадками, испарением и подземным оттоком грунтовых вод. Наибольшие годовые амплитуды колебания уровня наблюдаются в зоне умеренного питания (преимущественно от 1 до 3 м при среднем многолетнем значении амплитуды около 2 м). В зонах обильного и недостаточного питания среднее многолетнее значение годовых амплитуд соответственно 1 и 0,5 м. Та же закономерность подтверждается по тем же зонам, но уже с учетом глубины залегания грунтовых вод до 1,1–3,3, 3–5 и св. 5 м.

Время начала весеннего подъема уровня в каждой зоне совпадает со временем устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через ноль градусов после холодного периода года с отклонениями ±5 сут (рис. 22 и 23).

Наблюдения за режимом грунтовых вод показывают, что начало весеннего подъема в большинстве случаев наступает раньше оттаивания сезонно-мерзлого слоя почвы и грунтов, т.е. питание грунтовых вод в первый период происходит за счет воды, скопившейся за холодный период в зоне

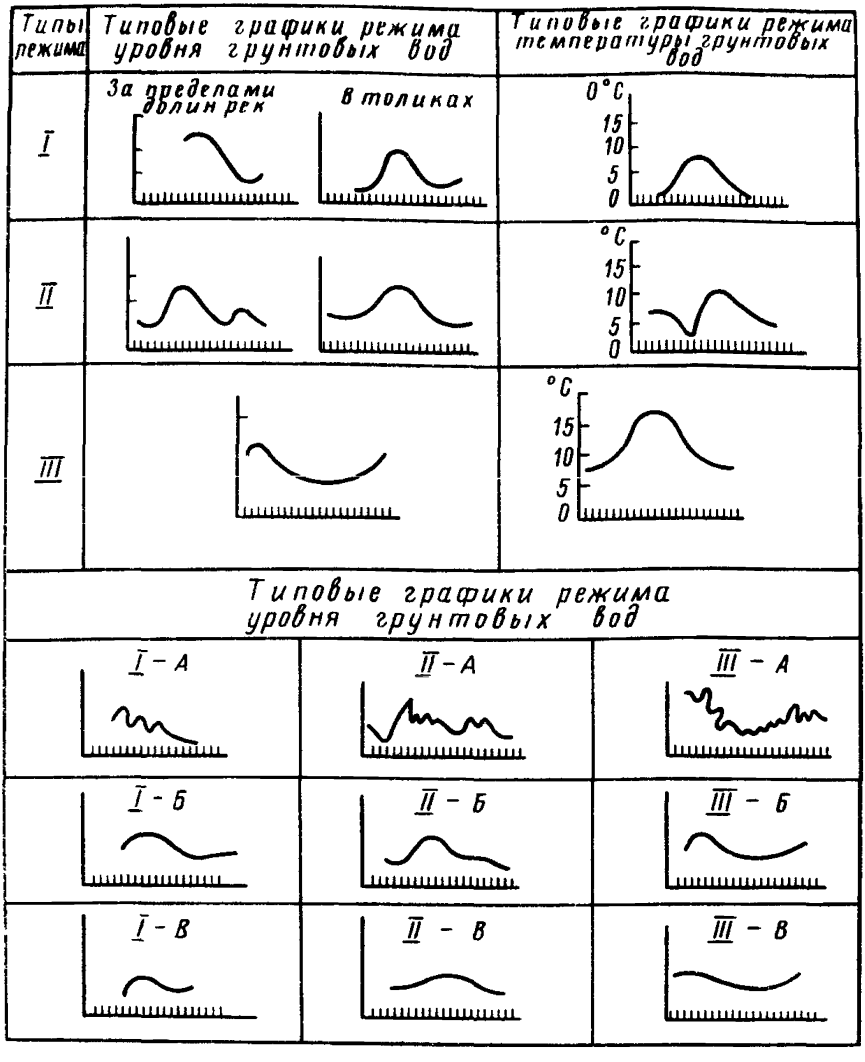


Рис. 21а. Типовые графики режима уровня и температуры грунтовых вод в соответствии со схемой районирования естественного режима

аэрации. Подъем уровня, связанный с устойчивыми оттепелями, наблюдается в ряде районов, характеризующихся маломощным сезонным промерзанием пород и хорошими их фильтрационными свойствами.

Усредненные количественные характеристики естественно уровенного режима грунтовых вод приведены в табл. 22.

8.3. Закономерности режима грунтовых вод на городских территориях определяются природными условиями и техногенными факторами, т.е. тем фоном, на котором происходит или произойдет изменение уровенного режима грунтовых вод на городских территориях, являются естественные колебания уровня грунтовых вод. Эти колебания в большей или меньшей степени трансформируются в результате изменения приходных или

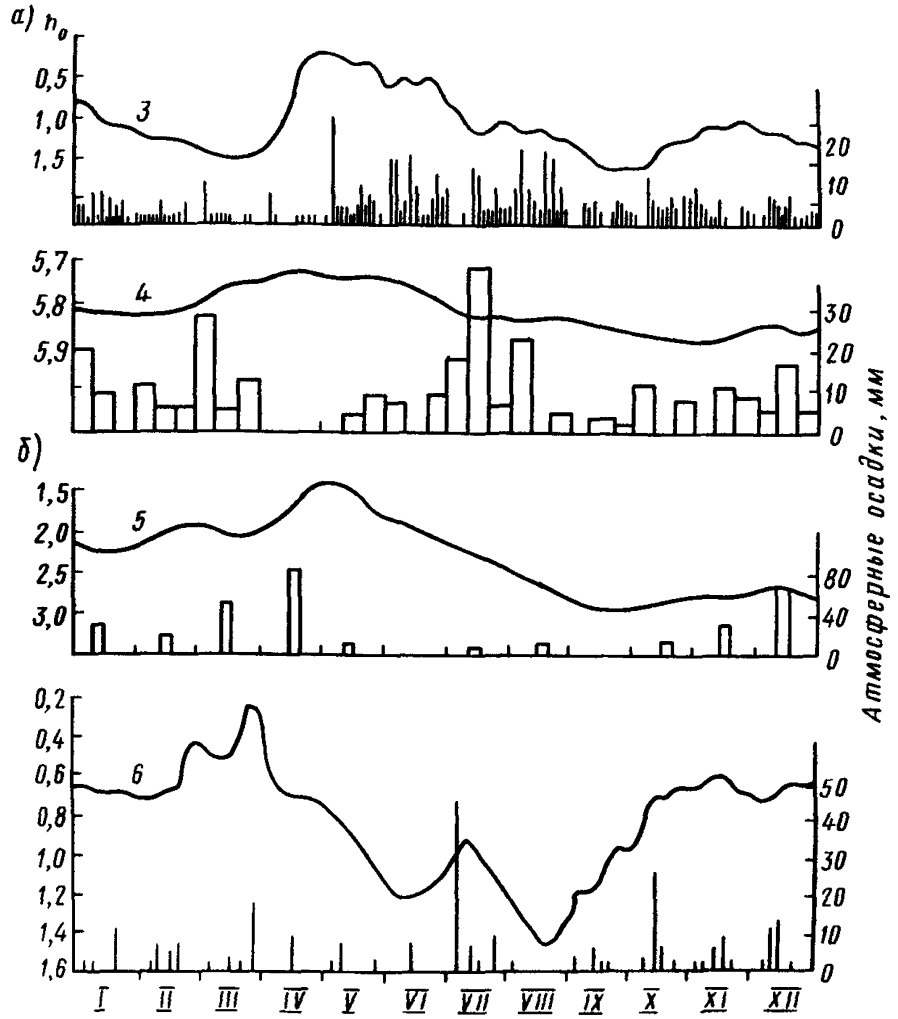


Рис. 21б. Графики колебания уровня грунтовых вод в районах распространения
а – сезонно промерзающих пород; *б* – кратковременного промерзания пород

расходных статей баланса под влиянием техногенных факторов. В случае, когда характер колебания уровня грунтовых вод резко отличается от закономерностей сезонного и годового хода естественного уровня, имея четко выраженную направленность изменения (подъем или снижение), тогда следует говорить о техногенном режиме грунтовых вод. Такой тип режима наблюдается, например, в результате интенсивной эксплуатации подземных вод в зоне формирования воронки депрессии, в зоне влияния создаваемого водохранилища или вдоль русла зарегулированных рек, где режим поверхностных вод определяется режимом попусков.

На территориях городов при анализе процессов подтопления следует различать по динамике развития техногенный установившийся и неустано-

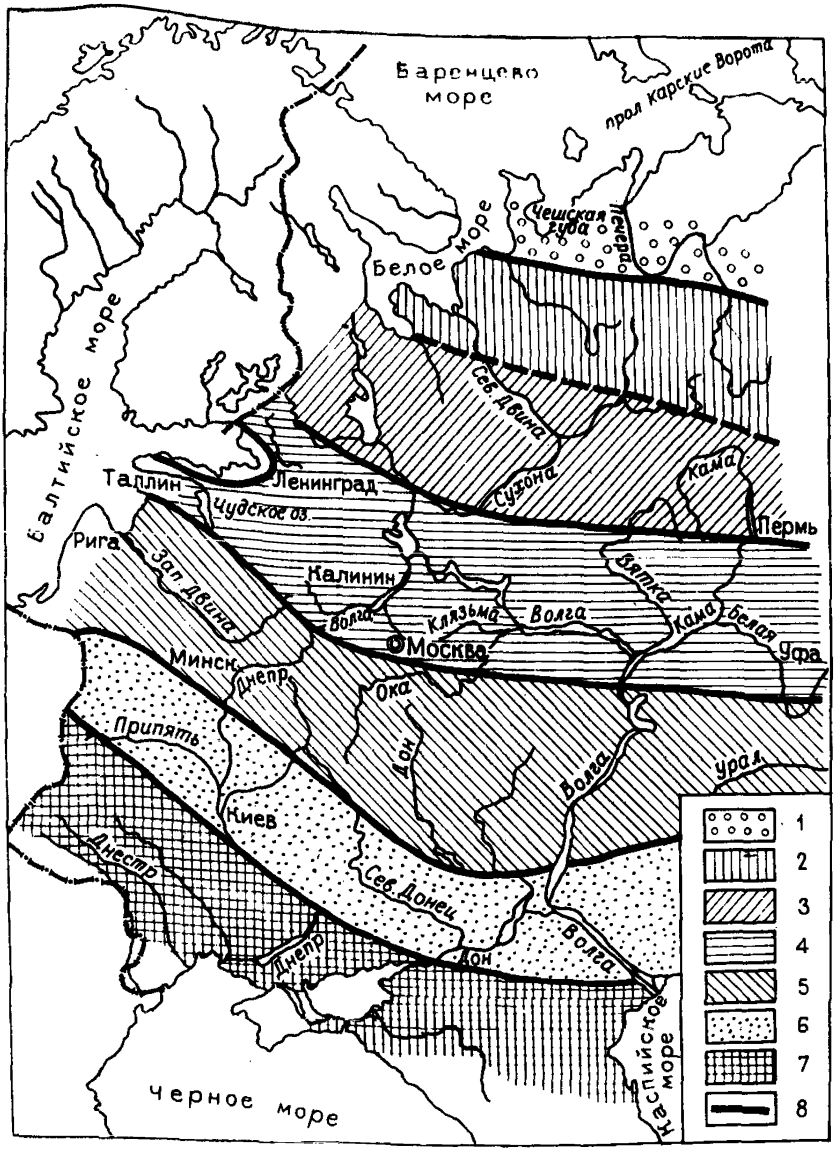


Рис. 22. Схема распределения зон с одинаковыми среднемноголетними датами начала весеннего подъема
1 – 25.IV – 10.V; *2* – 15–25.IV; *3* – 5–15.IV; *4* – 25.III – 5.IV; *5* – 5 – 25 III; *6* – 25.II – 5.III; *7* – 15.I–25.II; *8* – граница зон

вившийся режимы грунтовых вод. Установившийся режим имеет место в области сформировавшихся "куполов подтопления" при относительном равенстве приходных и расходных статей баланса. Неустановившийся режим. имеет место: при формировании техногенного водоносного горизонта (подъем уровня подземных вод); при подъеме уровня грунтовых вод

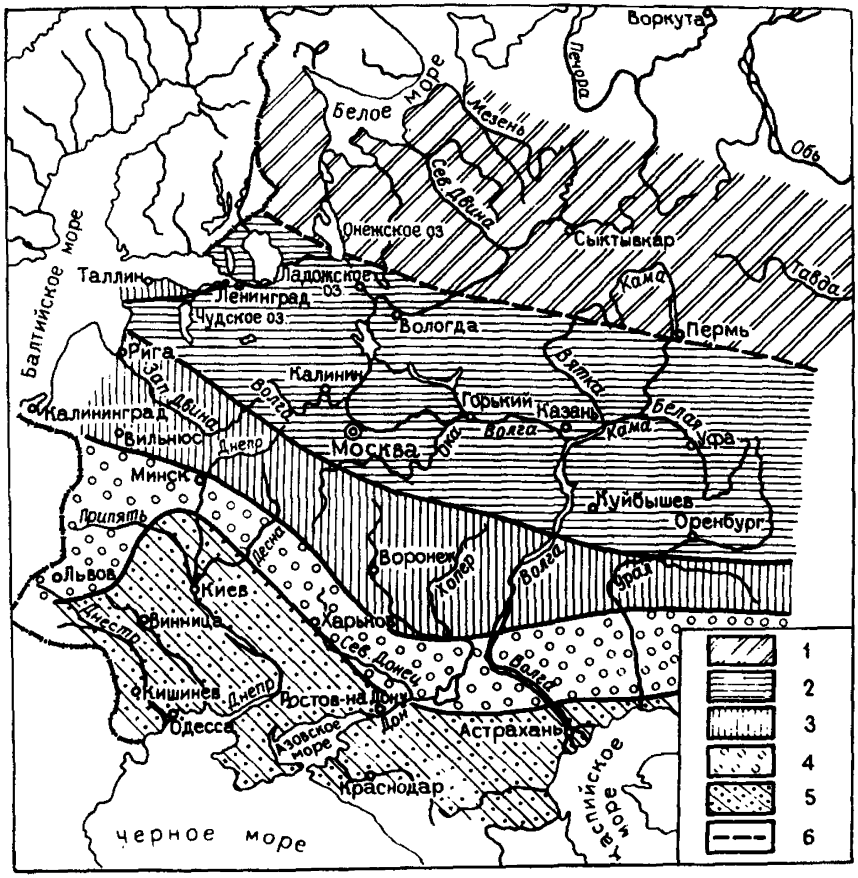


Рис. 23. Схематическая карта распределения сроков начала весеннего подъема 10%-ной обеспеченности
1 – позднее 20.III; *2* – 20.II – 20.III; *3* – 10.I – 1.II; *4* – 15.I – 1.II; *5* – ранее 15.I; *6* –предположительная граница зон

существующего водоносного горизонта в результате превышения приходных составляющих баланса (при строительстве и эксплуатации территории) над расходными.

8.4. Чаще всего на городских территориях наблюдается естественно-техногенный подкласс режима грунтовых вод. Выделение подкласса режима производится нами в соответствии с существующей классификацией естественного режима грунтовых вод.

При естественно-техногенном подклассе режима изменение приходных или расходных статей баланса грунтовых вод под действием техногенных факторов обусловливает отклонение (иногда существенные) в суточных, декадных и сезонных колебаниях уровня от типовых графиков естественного режима, в целом не изменяя характера годового изменения уровня.

Оценка влияния техногенных факторов должна выполняться следующим образом: анализируются фактические графики колебания уровня, температуры и химического состава подземных вод во всех скважинах режимной сети; составляются типовые графики для гидрогеологического участка или подучастка и сравниваются с типовым графиком естествен-

Таблица 22. **Характеристика амплитуды весеннего подъема уровня грунтовых вод и годовой амплитуды для гидрогеологических участков провинции с устойчивым сезонным промерзанием зоны аэрации (по данным Бабкина Б.А., Алешиной Н.Ф. и др.)**

Зона питания	Область питания	Изменение амплитуды уровня: весеннего подъема / годовой амплитуды, м — Основные геолого-литологические комплексы					
		пески с галькой и гравием	переслаивание песков, супесей и суглинков	суглинки и глины с прослоями песков	известняки и доломиты	песчаники, алевролиты и аргиллиты	метаморфические, интрузивные и вулканогенно-осадочные породы
А	а	0,1 – 1 0,1 – 1,2	до 1,2 до 1,2	0,8 – 1,2 1 – 1,9	1,2 – 7,6 1,3 – 8,3	–	до 1,3 до 4,5
	б	0,2 – 2 0,3 – 2	0,7 – 2,4 0,8 – 2,5	0,7 – 3,6 0,8 – 5,4	0,4 – 6,2 0,8 – 11,8	1 – 1,4 1,1 – 4,2	0,6 – 3,1 (9,9) 0,6 – 4 (10,8)
	в	1 – 2,1 1 – 2,1	–	0,9 – 4 1,2 – 4	11,2 – 14,4 12,5 – 15,2	–	8 – 16,3 8,1 – 16,5
Б	а	0,2 – 0,5 0,5 – 0,8	1 – 1,4 1,5 – 1,9	1,9 – 3,7 3 – 4,7	–	–	–
	б	0,5 – 1,4 0,6 – 1,6	0,8 – 2 0,8 – 2,1	2 – 2,4 2,6 – 3,1	0,8 – 2 0,8 – 3,4	0,5 – 1,6 0,7 – 2,8	–

ного режима для незастроенной территории, находящейся в аналогичных природных условиях.

На городских территориях, как правило, в части режимных скважин изменение уровня в отдельные сезоны года или в отдельные годы (по данным кратковременных наблюдений при изысканиях) практически не отличается от типового графика естественного режима. В многолетнем разрезе для естественно-техногенного режима грунтовых вод на подтапливаемых городских территориях характерно постепенное повышение поверхности грунтовых вод при сохранении характера сезонных колебаний уровня (см. рис. 9). В этом случае, при обычно рекомендуемой продолжительности режимных наблюдений как минимум один год, не удается выявить тенденцию подъема уровня. Этот фактор является дополнительным подтверждением необходимости организации постоянных режимных наблюдений на городских территориях.

Исходная информация по уровенному режиму для прогноза подтопления должна быть в итоге трансформирована на карту районирования территории по режиму грунтовых вод с характеристикой выявленных сезонных и многолетних закономерностей колебания уровня для каждой таксономической единицы районирования.

Районирование застроенных территорий по режиму грунтовых вод

8.5. Последующая детализация районирования гидрогеологических зон (для таксономических единиц: гидрогеологическая область – гидрогеологический участок) дается на примере зоны II-А, в пределах которой были систематизированы гидрогеологические условия на территориях городов: Архангельска, Вологды, Череповца, Ярославля, Рыбинска, Переяславль-Залесского, Ростова, Тутаева, Пикалево.

Районирование такого плана позволяет более целенаправленно типизировать гидрогеологические условия на территориях городов в аналогичных природных условиях, выполнить их схематизацию, выбрать типовые расчетные геофильтрационные схемы городских территорий для прогноза уровенного режима, получить необходимую исходную информацию при целенаправленных инженерных изысканиях для осуществления прогноза.

8.6. Рельеф гидрогеологической зоны II-А (контуры зоны показаны на рис. 20) представляет собой чередование пологосклонных возвышенностей, с максимальными отметками высот 330–340 м; обширных равнин и низменностей с абсолютными отметками поверхности 80–200 м, расчлененных широкими (до 10–15 м) речными долинами. Сток большинства крупных рек зарегулирован.

Возвышенности (дренированные области) характеризуются довольно сильно расчлененным рельефом. Густота речной сети 0,3–0,4 км на 1 км^2. Глубина эрозионного вреза речных долин 50–100 м. Дренирующее воздействие рек распространяется до глубины 150–200 м.

Равнины и низменности (слабодренированные области) представляют собой плоские и полегоголнистые, аккумулятивные поверхности и моренные плато. Для низин характерен плоский характер рельефа, широко распространены обширные заболоченные пространства с многочисленными озерами. Густота сети 0,1–0,2 км на 1 км^2. Глубина эрозионного вреза рек до 30–50 м.

Климат умеренно-континентальный; среднегодовая температура воздуха +2,4 –3,5°С; среднегодовые суммы осадков 600–800 мм, испарение с грунта 300–460 мм.

8.7. Исходя из существующего геомофологического районирования описываемого региона в масштабе 1:1 500 000 условно выделяем в пределах гидрогеологической зоны II-А следующие основные геоморфологические поверхности (соответствуют гидрогеологическим областям):

грядово-холмистый и крупнохолмистый конечно-моренный рельеф (в пределах валдайского и московского оледенений). Возвышенности сложены моренными суглинками, перекрытыми маломощным плащем водно-

ледниковых суглинков, супесей и песков. Холмы перемежаются с понижениями: обширными плоскими низинами или ложбинообразными узкими долинами (дренированная область);

пологохолмистая моренная равнина. Поверхность сложена моренными суглинками, перекрытыми: покровными суглинками на холмах; озерными, аллювиальными и водно-ледниковыми песками, супесями, суглинками, глинами, торфами на пониженных участках рельефа (слабодренированная область);

пологоволнистые или плоские и слегка волнистые озерно-ледниковые равнины, сложенные мощной толщей ледниковых отложений, в составе которых значительная доля принадлежит надморенным водно-ледниковым осадкам (слабодренированная область);

террасированная поверхность карбонового плато расчленена долинами рек (дренированная область). Этим областям соответствует класс режима грунтовых вод. Критерии выделения: орография, геолого-структурные признаки и степень дренированности территории.

8.8. Вышеприведенные критерии выделения гидрогеологических областей в результате анализа гидрогеологических условий на территориях городов [75, 78] типизированы путем введения основных (преобладающих) типов рельефа (аллювиальные террасы речных долин, озерно-ледниковые террасы, моренные плато, склоны моренных гряд) – гидрогеологических районов, которым соответствует подкласс режима грунтовых вод (табл. 23). Критерий выделения подкласса: баланс грунтовых вод и характер колебания грунтовых вод в годовом разрезе.

В пределах каждого гидрогеологического района на городских территориях выделен ряд типовых геолого-литологических разрезов [65], каждому из которых соответствует гидрогеологический участок, выделяемый по литологии водовмещающих пород или распространению первого от поверхности водоносного горизонта. На территории каждого города, как правило, выделяется три–пять гидрогеологических районов, и в пределах каждого района один–три гидрогеологических участка. Это отражает сложный характер взаимосвязи между подземными водами различных водоносных горизонтов и поверхностными водами как в плане, так и вертикальном разрезе.

8.9. Естественный режим уровня грунтовых вод в гидрогеологической зоне Д-А имеет четко выраженный сезонный характер, при этом в годовом ходе уровней отмечаются два максимума (весенний и осенний) и два минимума (предвесенний и летне-осенний) и соответственно этому весенний и осенний подъемы, зимний и летний спады. Такой внутригодовой ход уровней наиболее характерен при глубине их залегания не более двух-трех метров от поверхности земли в рыхлых и связных четвертичных отложениях. При большой глубине залегания уровней осенний максимум в отдельные годы может быть выражен весьма слабо или вообще отсутствовать. В этом случае в ходе уровня отмечаются лишь два экстремума: предвесенний минимум и весенний максимум. Фактические данные по годовой инфильтрации осадков до поверхности грунтовых вод, залегающих в торфе, супесях, песка мелко- и тонкозернистых на северо-западе РСФСР приведены в работе [25]. Инфильтрация изменяется от 70 до 372 мм (при коэффициенте инфильтрации α = 0,1–0,5. Для грунтовых вод в суглинках инфильтрация варьируется от 49 до 200 мм (α = 0,08–0,34). Установлено, что коэффициент инфильтрации существенно убывает с глубиной. Так, при глубине залегания уровня в песках тонко- и мелкозернистых 1 м $\alpha \approx 0{,}5$; при глубине залегания уровня 3,5 м – $\alpha \approx 0{,}2$; при 7,5 м $\alpha \approx 0{,}1$. Для грунтовых вод в озерно-ледниковых суглинках эти значения составляют: при глубине залегания уровня 0,5 м $\alpha \approx 0{,}3$; при 3 м $\alpha \approx 0{,}1$. При одинаковых или близких значениях мощностей зоны аэрации инфильтрация до поверхности грунтовых вод в суглинках в 2–2,3 раза меньше, чем для грунтовых вод в песках и суглинках.

А.В.Лебедевым [44] составлена таблица для обобщенных норм инфильтрации и испарения (среднемноголетние величины) с уровня грунтовых вод для северо-запада РСФСР и Прибалтики (табл. 24).

Таблица 23. **Схема районирования гидрогеологической зоны обильного питания по особенностям формирования режима подземных вод на городских территориях**

Гидрогеологические области	Гидрогеологические районы*	Гидрогеологический участок
Дренированная: конечно-моренный рельеф терраси-рованная поверхность карбонового плато, расчлененная долинами рек Слабодренированная: пологохолмистая моренная равнина озерно-ледниковая равнина	Аккумулятивные поверхности долин современных рек: пойма, высокая пойма, надпойменные террасы Моренное плато (слабоволнистая поверх-ность с ложбинами и котловинами эрозион-ного происхождения). Склоны моренных гряд, расчлененные ложбинами и балками Озерные террасы Водораздельные плато и склоны водораз-делов	Типовой геолого-литологический разрез На застроенных территориях выделено от двух до трех взаимосвязанных водо-носных горизонтов. На незастроенных территориях широко представлены под-земные воды спорадического распрост-ранения над первыми от поверхности водоупорами

*Районы выделены по геоморфологическим типам рельефа в отличие от схемы районирования Ковалевского В.С. и Коноплянцева А.А.

Таблица 24. Усредненные коэффициенты и нормы инфильтрации атмосферных осадков и испарения с уровня грунтовых вод

Среднегодовая глубина до грунтовых вод, м	Средние значения коэффициентов, %		Средние коэффициенты (по отношению к осадкам)	
	инфильтрации	испарения грунтовых вод	испарения грунтовых вод	питания грунтовых вод сверху
1	22	89	0,197	0,023
2	16,5	53	0,088	0,077
2,5	14,2	41,5	0,058	0,084
3	12,2	32	0,039	0,083
3,5	10,5	24,7	0,026	0,079
4	9,2	19	0,017	0,075
5	6,8	11,2	0,0076	0,060
6	5	6,6	0,0033	0,047
7	3,7	4,2	0,0016	0,035
8	2,7	2,6	0,0007	0,026
9	2,1	1,5	0,0003	0,021
10	1,6	0,9	0,0001	0,016

Примечание. Приведенные данные следует использовать как исходную информацию (при отсутствии постоянно действующей режимной сети) по предварительной оценке баланса грунтовых вод для указанных регионов.

8.10. Главной особенностью гидрогеологической зоны II-А является преимущественно неглубокое залегание уровня грунтовых вод на территориях городов до 4 м при годовой амплитуде колебания уровня в среднем 1–2 м, что обусловливает чаще всего сезонное подтопление застроенных территорий. Преобладающим режимом на территориях городов является естественно-техногенный. При глубине залегания уровня грунтовых вод 0,5–1 м типовые графики уровенного режима на застроенных территориях часто практически не отличаются от типовых графиков естественного режима (при частоте замера через 5–10 сут).

8.11. Рекомендуемое районирование городской территории по режиму грунтовых вод дано на примере города, расположенного в гидрогеологической зоне II-Б. Для городской территории сделан прогноз уровенного режима грунтовых вод методом математического моделирования на АВМ и ЭВМ. Районирование выполнено по материалам стационарных гидрогеологических наблюдений, проводившихся в течение 1–4 лет в пределах застроенной территории по 120-ти наблюдательным скважинам и сети гидрометрических постов.

8.12. Городская территория находится в северо-восточной части Средне-Русской возвышенности и представляет собой равнину, интенсивно расчлененную долинами рек и ручьев, оврагами и балками. Абсолютные отметки водораздельной поверхности 200–220 м, склонов водоразделов 180–200 м. Глубина относительного вреза долины реки 30–40 м. Интенсивность эрозионного расчленения 0,88–1,56 км/км^2. Ширина долины реки 2–3 км.

Климат умеренно континентальный с теплым летом и холодной зимой. Среднегодовая температуры воздуха +3,6°С. Количество атмосферных осадков изменяется от 380 до 700 мм, среднегодовая норма 585 мм. По сезонам года величины осадков составляют: III–IV–110, VI–VIII–196, IX–XI–90 мм. В течение каждого зимнего месяца отмечается одна-две оттепели, продолжительностью 1–5 дней каждая. Всего за зиму наблюдается до 50 дней с оттепелью. Снежный покров устанавливается с конца ноября, период снего-

таяния (в среднем) с 12 марта по 7 апреля. Глубина промерзания почвы (в естественных условиях) характеризуется следующими средними значениями: XI – 13, XII-35, I–66, II–III–82 см. Максимальная глубина промерзания – 142 см, в среднем – 88 см. Оттаивание грунтов на глубину 30 см происходит к 13 апреля, полное оттаивание – к 27 апреля. Средняя продолжительность морозного периода – 105 дней, переход температуры воздуха через 0° С – первая декада апреля.

Наибольшее испарение с водной поверхности 733, наименьшее – 352 мм. Среднегодовое испарение с поверхности почвы – 400 мм.

Таким образом, территория города расположена в гидрогеологической зоне умеренного питания (II–Б) провинции устойчивого сезонного промерзания зоны аэрации. Гидрогеологическая область сильно дренированная. Дренирующее воздействие реки распространяется на глубину до 150 м.

Выделение последующих таксономических районов по режиму грунтовых вод определяется геоморфологическим строением и гидрогеологическими условиями городской территории.

Геоморфологические типы рельефа: водораздельная поверхность и ее склоны, расчленены долинами ручьев, балками и оврагами; надпойменные террасы (I, II); пойма (высокая и низкая).

В региональном плане рассматриваемая территория расположена в пределах южного крыла Московского артезианского бассейна. Региональным водоупором для всей территории являются глины малевского горизонта нижнетурнейского подъяруса.

До регионального водоупора выделены следующие водоносные горизонты.

Подземные воды техногенного водоносного горизонта приурочены к насыпным грунтам. Мощность водоносного горизонта 1–6 м. Глубина залегания уровня 0,5–3 м. Амплитуда весеннего подъема уровня 0,3–1,8 м.

Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений двухслойный, он приурочен к поймам. Водовмещающие породы верхнего слоя– суглинки с линзами песков и глин, нижнего – пески. Общая мощность водовмещающих пород 3–16 м. Нижний водоупор – глины, на отдельных участках размытые. Коэффициенты фильтрации суглинков 0,03–0,6 м/сут, песков 0,5–1,7 м/сут. Грунтовые воды залегают на глубине 0,2–5 м.

Разгрузка подземных вод происходит путем дренирования в речную сеть и испарением. На участках размыва нижнего водоупора зафиксирована разгрузка в нижележащий упинский водоносный горизонт.

Водоносный горизонт верхнечетвертичных аллювиальных отложений распространен в пределах I и II надпойменных террас. Водовмещающие породы: пески и суглинки на I террасе и суглинки на II террасе. Мощность водоносного горизонта 0,5–12 м. Нижним водоупором являются глины тульского и упинского горизонта нижнекаменноугольных отложений. На отдельных участках, где водоупор размыт, наблюдается разгрузка грунтовых вод в нижележащие безнапорные водоносные горизонты. Это проявляется в резком увеличении глубины залегания уровня до 10–12 м (на остальной территории глубина залегания грунтовых вод 1,5–5 м) или даже отсутствии грунтовых вод аллювиальных отложений (участок 1 террасы). Коэффициент фильтрации суглинков – 0,1–0,2 м/сут (для опесчаненных суглинков – 0,2–0,6 м/сут), пылеватых песков –0,5–1,5 м/сут, среднезернистых песков 1,5 – 8 м/сут. Отмечается в целом резкая неоднородность фильтрационных свойств в плане и вертикальном разрезе.

Водоносный горизонт в покровных средне-верхнечетвертичных отложениях распространен на водораздельной поверхности. Водовмещающие породы– покровные суглинки, в подошве слоя – с линзами песков. Мощность водоносного горизонта 1–2,5 м. Нижний водоупор – моренные суглинки мощностью 1,5–3,5 м. Грунтовые воды до застройки территории имели спорадическое распространение. Уровень грунтовых вод на глубине 1–2,8 м. Разгрузка грунтовых вод осуществляется испарением и перетоком в нижележащий безнапорный водоносный горизонт по контуру моренных суглинков. Коэффициент фильтрации покровных суглинков – 0,15–0,25, песков 0,2–1, моренных суглинков – $1 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ м/сут.

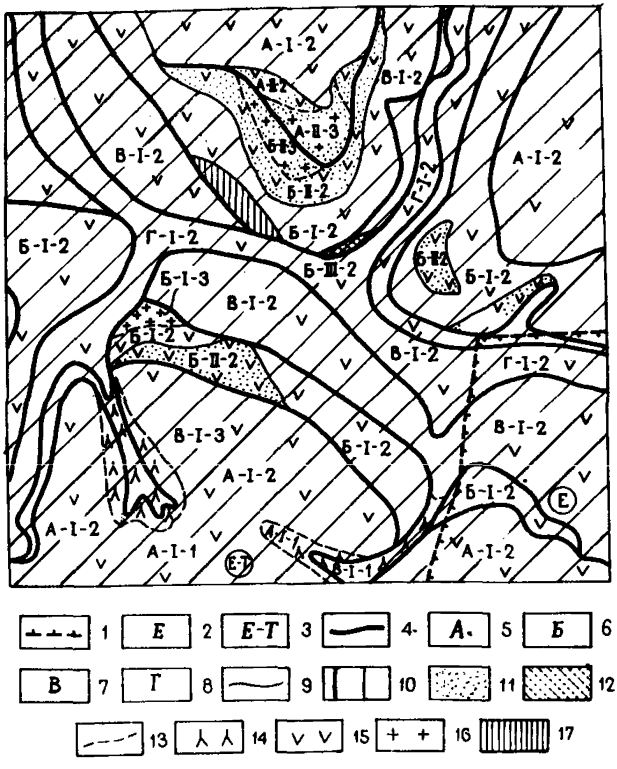


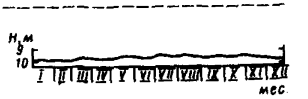
Рис. 24. Схематическая карта гидрогеологического районирования городской территории по режиму грунтовых вод

1 – граница зоны распространения естественного режима грунтовых вод; *2* – естественный режим; *3* – естественно-техногенный режим; *4* – граница гидрогеологических районов; *5* – водораздел и его склоны; *6* – надпойменные террасы; *7* – пойма; *8* – приречная часть; *9* – граница гидрогеологических участков; *10* – суглинки; *11* – пески; *12* – насыпные грунты; *13* – граница гидрогеологических подучастков; *14* – мощность зоны аэрации 0,5–1 м; *15* – мощность зоны аэрации более 4 м; *17* – зона, в которой грунтовые воды отсутствуют

Водоносный горизонт в отложениях тульского горизонта визейского яруса распространен в пределах водораздела и его склонов. Водовмещающие породы – пески тульского горизонта. Нижний водоупор – глины тульского горизонта. Подземные воды безнапорные, на участках распространения моренных суглинков водоносный горизонт является вторым от поверхности. Уровень подземных вод залегает на глубине 5–15 м. Коэффициент фильтрации песков 0,5–2,3 м/сут.

Районирование городской территории по режиму грунтовых вод выполнено на основе детального анализа природных условий (составлены карты масштаба 1:10 000 четвертичных отложений, геолого-литологическая, геоморфологическая, распространения водоупоров, гидрогеологическая, гидроизогипс) и техногенных факторов (составлен комплекс техногенных карт масштаба 1:5000 и 1:10 000). На территории площадью 20 км^2 выделено (рис. 24 и табл. 25) четыре гидрогеологических района (по основным геоморфологическим типам рельефа), семь гидрогеологических участков (по литологическому составу водовмещающих пород от поверхности

Таблица 25. **Экспликация к карте гидрогеологического районирования городской территории по режиму грунтовых вод**

Гидрогеологический район	Индекс	Гидрогеологический участок	Индекс	Гидрогеологический подучасток	Индекс	Типовые графики уровня подземных вод при естественно-техногенном режиме
Водоразделы и склоны	А	Суглинки	I	0,5–1	1	
				1–4	2	
		Пески	II	4	3	
Надпойменные террасы		Суглинки	I	1–4	2	
				4	3	
	Б	Пески	II	1–4	2	
				4	3	
				0,5–1	1	

Продолжение табл. 25

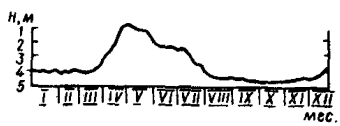
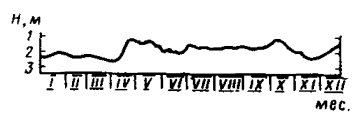
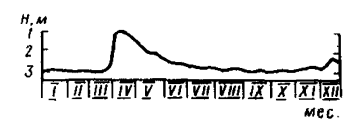
Гидрогеологический район	Индекс	Гидрогеологический участок	Индекс	Гидрогеологический подучасток	Индекс	Типовые графики уровня подземных вод при естественно-техногенном режиме
Пойма	В	Суглинки	I	1–4	2	
				4	3	
		Насыпной грунт	III	1–4	2	
Приречная часть	Г	Суглинки		1–4	2	

Таблица 26. **Характеристика годовых изменений уровня**

Номера гидрогеологических					
А-I-1	А-I-2	А-II-3	Б-I-2	Б-I-3	Б-II-2
Годовые амплитуды колебаний уровня: над чертой – минимальные					
0,4–1,2	1–4,1	0,2–0,5	0,7–2,7	0,4–2,4	0,3–2
0,8	2,4	0,4	1,7	1,4	0,8

водоносного горизонта) и двенадцать подучастков (по мощности зоны аэрации).

Для каждого гидрогеологического подучастка застроенной и застраиваемой городской территории составлены типовые графики колебания уровня грунтовых вод. Сопоставление колебания уровня на городской территории с колебаниями уровня на незастроенной территории для участков с аналогичными природными условиями, позволяет классифицировать режим как естественно-техногенный.

Характеристика режима в целом и для каждого подучастка приведена ниже в соответствии с табл. 25.

В годовом ходе уровней грунтовых вод четкая взаимосвязь их с атмосферными осадками прослеживается только при мощности зоны аэра-

ции до 1 м для водовмещающих грунтов естественного сложения и при мощности зоны аэрации до 4 м для насыпных грунтов. Для других подучастков не наблюдается четкой взаимосвязи между сроками, количеством выпадающих атмосферных осадков и колебаниями уровня грунтовых вод. В летний период года (июнь–август) при сумме осадков 200 мм (35% годовой суммы) наблюдается снижение уровня грунтовых вод, темп снижения которого в осенний период (при сумме осадков 130 мм) замедляется, реже наблюдается подъем уровня на 0,2–1 м, т.е. в балансе грунтовых вод за период июнь – октябрь преобладают его расходные статьи. При мощности зоны аэрации более 6–8 м осенние подъемы не наблюдаются.

В целом для всей территории годовая амплитуда подъема уровня грунтовых вод формируется в основном за счет весеннего максимума обусловленного таянием снега. Отношение весенней амплитуды к годовой изменяется от 0,7–до 1 (для незастроенной территории 0,9–1).

Весеннему максимуму предшествует период зимне-весеннего спада уровня грунтовых вод. На закрытых (асфальтированных, застроенных зданиями) участках, с которых осуществляется вывоз снега, темп снижения уровня выше, чем на незастроенной территории.

На его фоне в условиях естественного режима наблюдаются отдельные подъемы уровня, обусловленные зимними оттепелями. При естественно-техногенном подклассе режима такие подъемы происходят более часто с амплитудой на 0,1–0,3 м выше, чем в естественных условиях. В условиях застроенной территории кратковременные подъемы уровня (до 0,5–0,7 м при мощности зоны аэрации до 1 м и до 0,2–0,4 м при мощности зоны аэрации 1–4 м) наблюдаются на участках теплотрасс, около отдельных зданий, цехов, где промерзание зоны аэрации минимальное или оно вообще не наблюдается.

Начало весеннего подъема наблюдается за 2–10 суток до устойчивого перехода температуры воздуха через 0°С. Это, как правило, немного раньше, чем при естественном режиме, что связано с более интенсивным прогревом грунтов в условиях застроенной территории. Время формирования максимальных уровней грунтовых вод определяется мощностью зоны аэрации: апрель–май – до 4 и в июле – более 6–8 м. На закрытых территориях интенсивность подъема уровня и его максимум сдвигаются на 5–30 суток (в зависимости от плотности застройки) по сравнению с незастроенными территориями.

грунтовых вод для гидрогеологических подучастков (подвид режима)

подучастков					
Б-II-3	В-I-1	В-I-2	В-I-3	В-III-2	Г-I-2
и максимальные значения, под чертой – средние значения, м.					
0,1–1	0,3–1	0,8–3,2	0,3–2,9	0,4–2,3	1–3,3
0,5	0,6	1,9	1,4	1	2,1

Количественная характеристика годовых изменений уровня грунтовых вод приведена в табл. 26.

Районирование городской территории по режиму грунтовых вод позволяет:

обосновать границы водно-балансового участка, которые рекомендуется принимать в соответствии с границами гидрогеологического подучастка;

выполнить расчет баланса грунтовых вод с учетом фильтрации воды от поверхности земли до уровня грунтовых вод;

целенаправленно оценивать результаты идентификационных исследований для каждого водно-балансового участка.

9. УЧЕТ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Атмосферные осадки

9.1. Данные об атмосферных осадках следует получать из Справочника по климату СССР [79]; из метеорологических ежемесячников, издаваемых двенадцать раз в году всеми краевыми и областными управлениями Госкомгидромета; из БРиС (Бюро расчетов и справок) краевых и областных управлений Госкомгидромета по специальному запросу.

9.2. Среднее количество осадков для центральных областей СССР вычислено в Справочнике по климату за период с 1891 по 1961 г., или, по возможности, приведено к этому периоду. Для получения осадков после 1965 г. следует пользоваться метеорологическими ежемесячниками.

9.3. Публикуемые данные об атмосферных осадках получены на основе наблюдений по дождемеру с защитой Нифера, который был принят на сети станций и постов с 1890-х годов до начала 1950-х годов, и по осадкомеру Третьякова – с 1950-х годов по настоящее время.

Оба прибора измеряют осадки недостаточно точно, особенно зимой. Основной ошибкой обоих приборов является недоучет осадков из-за влияния ветра, создающего возмущения воздушного потока вблизи осадкомерного ведра.

Различия в показаниях двух приборов составляют в среднем для твердых осадков 10–20%, для жидких 2–5%. Коэффициенты расчета осадков даны в табл. 27.

Если в результате анализа количества атмосферных осадков окажется что по какому-либо пункту данные сомнительны, то они исключаются из расчетов или уточняются по соседним пунктам путем построения графиков связи.

В зимний период, когда ошибки в измерениях твердых осадков особенно велики, их величину при отсутствии оттепелей следует определять по разности снегозапасов на конец и начало расчетного периода с учетом испарения снега.

Количество жидких осадков оценивается толщиной слоя воды, мм, выпавшего на горизонтальную поверхность. Количество твердых осадков (снега) также измеряется толщиной слоя воды, получающегося после таяния снега.

9.4. Количество осадков меняется ежегодно; для получения устойчивой многолетней средней величины осадков длину ряда следовало бы увеличить, по мнению Главной геофизической обсерватории, по крайней мере до 150 лет [79]. Для оценки принятого периода и для характеристики изменчивости осадков приводится сравнение средних величин осадков за периоды различной длительности (табл. 28).

Атмосферные осадки могут изменяться от 0 до 0,1 м/сут. В некоторых районах СССР (Черноморское побережье, Приморский край, о. Сахалин) суточные осадки вероятностью 1% могут доходить до 0,2–0,3 м. В этих районах весьма опасны дожди, продолжающиеся несколько суток. Так, к западу от Туапсе в течение 1–4 августа 1982 г. выпало 0,4 м осадков. Тайфуны Оджен и Филлис принесли на о.Сахалин в течение 1–7 августа 1981 г. 0,4 м осадков.

Величина суточного максимума, наблюдающегося ежегодно, составляет 30–80 мм, т.е. сумму осадков, в среднем наблюдающихся в течение месяца.

Суточный слой осадков, мм, за теплый период вероятностью 1% распределяется по территории СССР примерно следующим образом:

Центральные районы европейской территории Союза (ЕТС), Урал	до 120 мм
Кавказское побережье	” 270 ”
Средняя Азия	50–100 ”
Западная и Восточная Сибирь	80–100 ”
Хабаровский край	до 200 ”
Приморский край, о.Сахалин	” 300 ”

Таблица 27. Коэффициенты для пересчета осадков, измеренных по дождемеру и осадкомеру, в зависимости от скорости ветра и защищенности установки прибора

Защищенность площадки	Средняя месячная скорость ветра, м/с						
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Площадка, окруженная сплошной непродуваемой защитой	1,08	1,1	1,12	1,15	1,17	1,18	1,19
Площадка, окруженная со всех сторон ажурной защитой	1,09	1,12	1,16	1,18	1,22	1,25	1,3
Полузащищенная площадка в населенном пункте в холмистой местности	1,1	1,15	1,18	1,21	1,25	1,3	1,33
Полузащищенная площадка, имеющая разрывы, в узкой долине (тип трубы) на окраине населенного пункта	1,12	1,16	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4
Открытая площадка с отдельными небольшими строениями или деревьями в окружении	1,15	1,18	1,25	1,30	1,35	1,4	1,45

9.5. Для получения вероятностного количества осадков следует вводить поправки к таблицам "Наибольшее и наименьшее месячное и годовое количество осадков различной обеспеченности" в Справочнике по климату. В этих таблицах приведены данные без поправок к показаниям осадкомера.

Указанные таблицы в Справочнике по климату составлены на основе рядов наблюдений продолжительностью не менее 40 лет. По этим рядам построены эмпирические кривые обеспеченности.

Вероятностные характеристики осадков рассчитываются по методу кривых суммарной вероятности или кривых обеспеченности. Под обеспеченностью следует понимать вероятность значений выше или ниже определенной величины. Исходным материалом для расчета обеспеченности служат данные наблюдений. Каждый член ряда нумеруется, и рассчитывается его суммарная вероятность (обеспеченность) по формуле

$$P_m = \frac{m - 0{,}3}{n + 0{,}4} 100\%, \qquad (20)$$

где m – порядковый номер члена ряда; n – общее число лет наблюдений.

Кривые обеспеченности строятся на специальных клетчатках (см. п. 7.7).

Опорные ряды, по которым, как правило, рассчитываются вероятностные метеорологические характеристики, имеют значительное число лет наблюдений, поэтому применяются в основном эмпирические кривые обеспеченности.

Приводимое в таблицах наибольшее и наименьшее месячное количество осадков может быть использовано только для какого-то конкретного месяца. Нельзя представить себе год, в котором каждый месяц имел бы осадки вероятностью, например, 5%. Поэтому выбор года с заданной вероятностью осуществляется по годовым осадкам. Имея годовые осадки вероятностью, например, $P = 5\%$, принимаем расчетные месячные осадки в двух вариантах. Первый вариант – берутся средние месячные осадки, вычисляется коэффициент $K = H_{5\%}/H_{50\%}$, на который умножаются все месячные средние осадки.

Таблица 28. **Среднемесячные суммы осадков (% от средних величин) за 1891–1964 гг., ст.Вышний Волочек**

Периоды	Месяцы												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
	За отдельные десятилетия												
1891–1900	97	111	107	66	125	92	94	97	116	102	88	106	100
1901–1910	108	86	95	109	95	118	132	138	84	90	91	102	108
1911–1920	113	109	92	83	71	91	89	81	91	65	76	110	89
1921–1930	105	98	102	84	107	116	95	97	100	109	152	115	106
1931–1940	103	113	122	129	83	81	100	91	111	134	125	106	105
1941–1950	92	107	91	121	96	114	87	100	103	81	84	81	97
1951–1960	97	92	83	116	108	100	120	91	105	137	97	89	104
	За отдельные тридцатилетия												
1891–1920	106	102	98	86	97	100	107	106	97	87	85	106	99
1901–1930	109	98	96	92	91	108	105	106	92	89	106	109	101
1911–1940	107	106	105	99	87	96	95	90	101	104	118	111	100
1921–1950	100	106	105	112	95	104	94	96	104	108	120	101	102
1931–1960	98	104	99	122	95	98	102	94	106	117	102	92	102

Второй вариант предусматривает случай, когда в расчет необходимо ввести какой-то неблагоприятный сезон – весенний, летний и др. Тогда по данным об осадках за конкретные годы выбирается год с общей суммой осадков примерно равной $H_{5\%}$, причем в этом конкретном году осадки неблагоприятного сезона должны быть такими, чтобы они отвечали поставленным критическим требованиям. По этому конкретному году принимаются фактически наблюдавшиеся месячные осадки.

9.6. Суточный максимум осадков различной обеспеченности, приведенный в Справочнике по климату, представляет собой наибольшие суммы осадков, выпавшие в течение метеорологических суток. До 1936 г. метеорологические сутки исчислялись с 7 ч до 7 ч следующего дня; с 1936 г. они исчисляются с 19 ч до 19 ч следующего дня. Такие границы суток соответствуют срокам наблюдений по осадкомеру.

Как установлено по записям самописцев дождя, всегда можно выбрать 24-часовой интервал времени, в котором слой осадков будет больше, чем в течение метеорологических суток. Это увеличение слоя осадков может доходить до 30%, что следует учитывать в расчетах.

Таблицы суточных максимумов осадков составлены по данным наиболее длинных рядов наблюдений, однако чаще длина ряда бывает недостаточной и тогда приходится экстраполировать кривую обеспеченности. Поэтому суточные максимумы осадков вероятностью 1 и 2% определены не вполне надежно и должны рассматриваться как ориентировочные [79], особенно в районах, где велика изменчивость осадков.

9.7. Пространственная неравномерность осадков хорошо иллюстрируется (рис. 25) на примере Москвы [50].

Неравномерность количества выпадающих осадков по территории в пределах небольших расстояний (5–20 км) может быть признана случайной. Однако в некоторых случаях эта неравномерность является закономерной, обусловленной. Вот некоторые примеры пространственной неравномерности осадков в Москве по данным многолетних наблюдений.

Москва, Межевой институт – 767 мм, Москва, Петровка – 678 мм, Москва, Горьковская ж.-д. – 667 мм. Наибольшая разница годовых сумм осадков составляет 100 мм в год.

В отдельные годы максимум и минимум осадков могут проявляться в различные месяцы, так, в Москве за 75 лет максимальные месячные осадки приходились: на апрель – 3%, май – 5, июнь – 17, июль – 35, август – 31, сентябрь – 4, октябрь – 4, ноябрь – 1%.

В работе [50] приведен анализ осадков в городах Курск и Льгов, сделан вывод, что количество осадков в этих городах возрастает по сравнению с окружающей местностью на 5–10%.

По данным работы [41], осредненные значения изменения атмосферных осадков, вызванные урбанизацией, в крупных городах европейской части СССР составляют 5–10% в сторону увеличения.

9.8. Примерно половина увеличения осадков в городах происходит за счет повышенного содержания аэрозолей в атмосфере, вторая половина – за счет изменения турбулентности воздушных масс, что вызвано имеющимися строениями. Здесь влияние строений аналогично влиянию леса, увеличивающего шероховатость поверхности. Поэтому наибольшее увеличение осадков должно происходить в городах, расположенных среди открытых степных пространств.

По Московской области в районах с лесными массивами выпадает за холодный период на 8–10%, а за теплый период на 20% осадков больше, чем на безлесных пространствах. Поверхность леса создает повышенную по сравнению с безлесными пространствами шероховатость, что вызывает торможение движения влажного воздуха, и он скапливается над лесом. С другой стороны, кроны деревьев задерживают осадки, не допуская их до поверхности земли.

Если считать, что в современном промышленном городе увеличение осадков в среднем составляет 10%, то в будущем оно должно уменьшиться примерно в два раза, так как содержание антропогенных аэрозолей будет уменьшаться до практически возможного минимума [41].

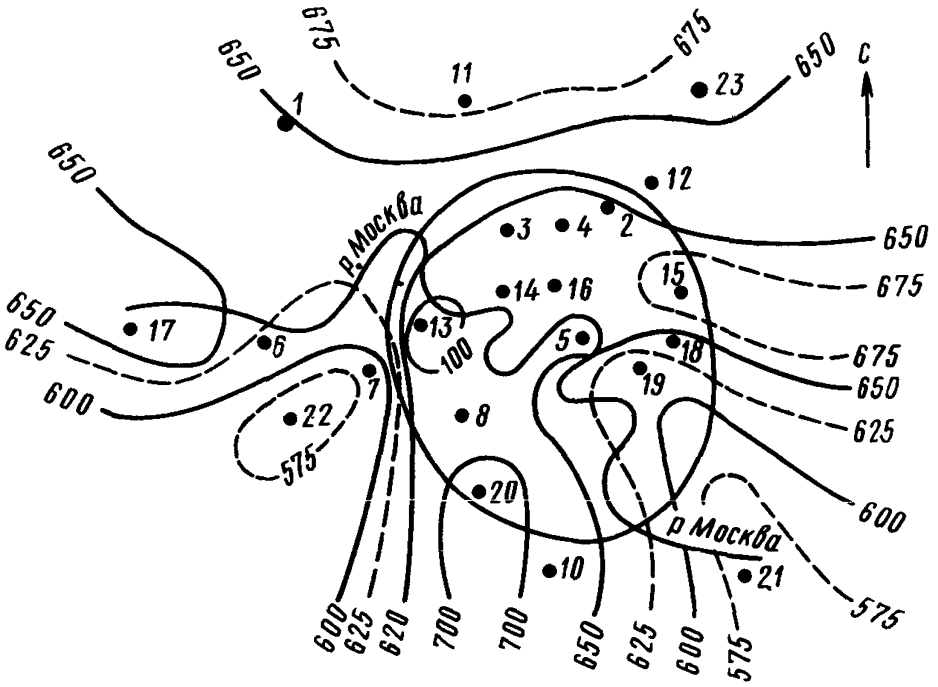


Рис. 25. Схема распространения средних годовых сумм осадков по территории Москвы и пригородов. Метеорологические станции
1 – Н.Иерусалим – 646 мм; *2* – Лосиноостровская – 609; *3* – ТСХА – 694; *4* – ВДНХ – 695; *5* – Балчуг – 659; *6* – Подмосковная – 615; *7* – Немчиновка – 576; *8* – МГУ – 694; *9* – им. Небольсина – 599; *10* – Ленино-Дачное – 673; *11* – Крюково – 697; *12* – Ватутино – 646; *13* – Хорошево – 703; *14* – Белорусский вокзал – 677; *15* – Измайлово – 686; *16* – Петровка – 624; *17* – Звенигород – 658; *18* – Карачарово – 628; *19* – ЗИЛ – 624; *20* – Теплый Стан – 707; *21* – Заозерье – 663; *22* – Перхушково – 572; *23* – Калистово – 667 мм

9.9. В горной местности склоны, обращенные к влагоносным ветрам, получают больше осадков, чем противоположные. С повышением местности над уровнем моря количество осадков увеличивается. Это объясняется тем, что возвышенности вызывают или усиливают восходящие токи воздуха. Поднимающийся по склону воздух охлаждается, что создает условия для выпадения осадков. Летом влияние рельефа оказывается менее существенным, так как облака в это время образуются на большей высоте, чем зимой.

Даже небольшие возвышенности вызывают увеличение количества осадков, такие как Валдайская, Минские высоты, Смоленско-Московская гряда, Донецкий кряж, Жигули и т.д.

Вертикальная зональность осадков проявляется особенно отчетливо. С повышением местности количество осадков резко возрастает – на 50–70 мм/год на 100 м высоты.

Возрастание происходит до определенной высоты, различной для разных горных регионов. Такие критические высоты имеют отметки 1500–3000 м (на юго-западном склоне Главного Кавказского хребта 3000–3500 м). Считается, что выше этих критических высот осадки опять начинают убывать.

9.10. Различный характер выпадения осадков оказывает влияние на процесс поверхностного стока и накопление подземных вод. При интен-

сивных дождях вода не успевает просачиваться в почву и бурными потоками стекает в речную сеть. Происходит увлажнение поверхностных слоев грунта, начинается более интенсивное испарение, до уровня грунтовых вод доходит незначительное количество осадков. При малоинтенсивных, но длительных дождях создаются благоприятные условия для инфильтрации в зону аэрации и пополнения грунтовых вод.

9.11. Продолжительность залегания снежного покрова изменяется от 240–260 дней в году на побережье Северного Ледовитого океана до трех-четырех дней на побережье Каспийского моря.

Сход снежного покрова на западе ЕТС происходит с 20 февраля по 1 апреля, в центральной полосе 10–20 апреля.

Толщина снежного покрова достигает максимума в марте, в северных районах – в апреле, в южных – в феврале, иногда в январе.

Слой воды, мм, от таяния снега можно определить по формуле Е.Г.Попова, полученной из уравнения теплового баланса поверхности снега в дневные часы

$$h_д = 7{,}1[(1-z)(t_{max} - t_{сут} - 0{,}2) - 0{,}2(t_{сут} - t_{min}) + 0{,}1V_д(t_д - 0{,}5)]; \quad (21)$$

для ночного периода

$$h_н = 7{,}1[0{,}1V_н(t_н - 0{,}5) - 0{,}2(t_{сут} - t_{min})], \quad (22)$$

где z — альбедо снега в долях; t_{max} – максимальная температура воздуха днем; $t_{сут}$ – средняя суточная температура воздуха; t_{min} – минимальная температура ; $t_д$, $t_н$ – средняя температура днем и ночью; $V_д$, $V_н$ – средняя скорость ветра на высоте флюгера, м/с.

9.12. Водоудерживающая способность (влагоемкость) снега может быть выражена в процентах или в долях единицы:

$$\gamma = \frac{h_ж}{h} 100\%$$

или

$$\gamma = \frac{h_ж}{h},$$

где $h_ж$ – количество жидкой воды, мм, в данном объеме снега; h – общее количество воды в данном объеме снега в жидкой и твердой фазах, мм.

В зависимости от погоды и степени перекристаллизации и плотности, водоудерживающая способность снега γ изменяется в пределах, приведенных ниже.

Структура	Плотность	γ_{max}
Мелкокристаллический	0,18–0,2	0,40–0,45
Мелкозернистый	0,25–0,3	0,27–0,32
Среднезернистый	0,32–0,35	0,20–0,24
Крупнозернистый	0,38–0,4	0,15–0,17

Убывание водоудерживающей способности снега от ее начального максимального значения γ_{max} зависит от количества тепла, затрачиваемого на таяние снега.

В формуле Е.Г.Попова принято, что уменьшение влагоемкости пропорционально самой ее величине. Учитывается также наличие относительно постоянного наименьшего предельного значения влагоемкости в конце снеготаяния

$$\gamma = \gamma_к + (\gamma_{max} - \gamma_к)e^{cz}, \quad (23)$$

где $\gamma_к$ – влагоемкость в конце снеготаяния; $z = x_c/x_н$, где x_c – убыль воды в снеге, $x_н$ – начальный запас воды в снеге; c – константа.

На основании обработки данных по влажности снега можно принять $\gamma_к = 0{,}06$; $c = 4$, тогда

$$\gamma = 0{,}06 + (\gamma_{max} - 0{,}06)e^{-4z} \quad (24)$$

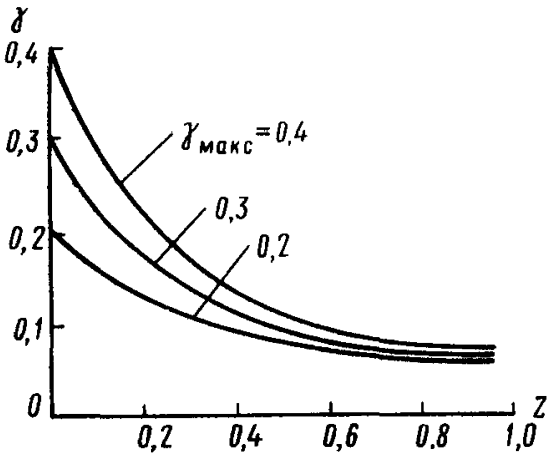


Рис. 26. Изменение влагоемкости снега в зависимости от его относительной убыли z и начальной влагоемкости γ

Вид этой зависимости представлен на рис. 26.

9.13. Убыль снега, при которой начинается водоотдача z_0, получена путем графического решения уравнения (24).

γ_{max}	0,2	0,23	0,26	0,3	0,34	0,4
z_0	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18

Изменение влажности снега в течение суток зависит от температуры воздуха. В процессе таяния промежутки между частицами снега заполняются водой, которая под действием силы тяжести достигает почвы, т.е. происходит процесс водоотдачи.

В слое снега, прилегающем к почве, при поступлении на ее поверхность воды, образуется зона капиллярного поднятия высотой, см:

для мелкозернистого снега – 5–6, для среднезернистого снега – 2–3, для крупнозернистого снега –1.

9.14. Вода, образующаяся в начале снеготаяния, вследствие влагоемкости снега поступает на почву позже момента таяния. Вода удерживается снегом до тех пор, пока не будет исчерпана полная влагоемкость снега. В дальнейшем водоотдача из снега начинает превышать количество воды, образующейся за счет снеготаяния, слой водоотдачи, см, равен

$$h_в = h_c + \gamma h_в,$$

где h_c – слой воды от снеготаяния; $\gamma = 0{,}3$ – влагоемкость снега, принимаемая постоянной в течение периода снеготаяния (см. п. 9.12).

Тогда $$h_в = \frac{h_c}{1-\gamma} = 1{,}43 h_c.$$

Если в период снеготаяния выпадают жидкие осадки, они прибавляются к водоотдаче из снега за соответствующие интервалы. На участках, где запасы снега значительны, происходит только увеличение его влагосодержания.

Поверхностный сток

9.15. Основные типы водного режима рек (по П.С.Кузину) даны в табл. 29.

Колебания уровенного режима рек зависят от:

водного потока;

влияния естественных и искусственных подпоров;

сгонно-нагонных и приливно-отливных явлений;

изменения сопротивления в русле (развития внутриводной растительности и образования ледяного покрова).

Таблица 29. Основные типы водного режима рек (по П.С.Кузину)

Основные типы водного режима рек и преобладающие типы питания	Подтипы водного режима рек в зависимости от времени формирования главных фаз
1. Реки с половодьем (снеговое питание)	Весенним
	Весенне-летним
	Летним
2. Реки с половодьем и паводками (снеговое и дождевое питание)	Весенним:
	в теплое время года
	в холодное время года
	в течение всего года
	Весенне-летним:
	в теплое время года
	в холодное время года
	в течение всего года
	в теплое время года
3. Реки с паводками (дождевое питание)	В теплое время года
	В течение всего года
	В течение всего года, преобладающими в холодное время года
	В течение всего года, преобладающими в теплое время года

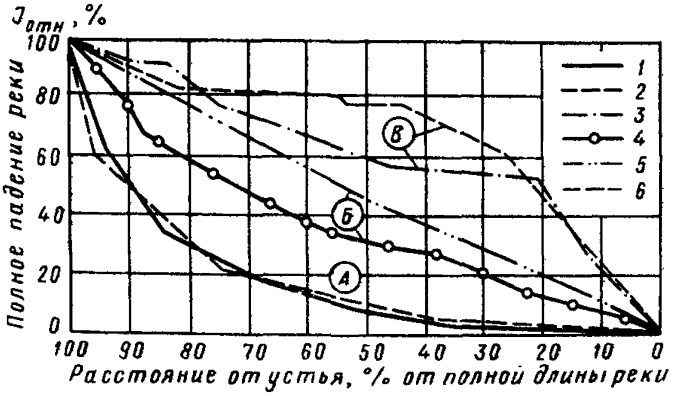


Рис. 27. Типы продольных профилей рек
1 – р. Рионн; *2* – р. Сочи; *3* – р. Топарови; *4* – р. Кама; *5* – р. Галька (бассейн Днепра); *6* – р. Лососинка (бассейн Онежского озера) *А* – плавновогнутый; *Б* – прямолинейный; *В* – выпуклый

9.16. На больших реках амплитуда колебаний уровня составляет обычно 6–12 м. На малых и средних реках (площадь бассейна менее 50 000 км^2) амплитуды обычно меньше, чем на крупных.

Типы продольных профилей рек даны на рис. 27; изменения уклонов при различных уровнях – на рис. 28.

9.17. Ширина русла B при глубине потока H, равна

$$B = B_0 H^m,$$

где B_0 – ширина русла при $H=1$; m – показатель степени, характеризующий крутость стенок русла и изменяющийся от $m=0$ (прямоугольное русло) до $m=1$ (треугольное русло); рис. 29.

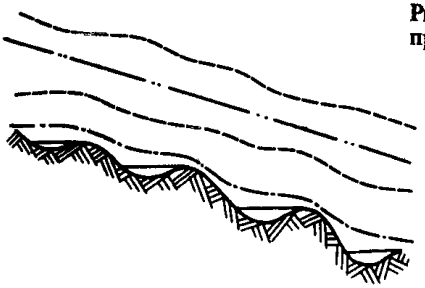


Рис. 28. Схема изменения уклонов реки при различных уровнях

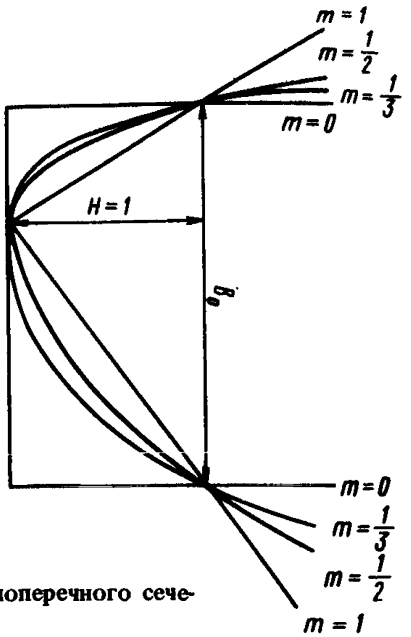


Рис. 29. Схематизация поперечного сечения русла реки

Площадь живого сечения равна

$$\omega = \int_0^H B\,dH = B_0 \int_0^H H^m dH = \frac{B_0}{1+m} H^{1+m} = \frac{1}{1+m} BH, \tag{25}$$

откуда

$$H = \left(\frac{1+m}{B_0}\right)^{\frac{1}{1+m}} \omega^{\frac{1}{1+m}}. \tag{26}$$

Средняя глубина равна

$$H_{ср} = \frac{\omega}{B} = (1+m)^{\frac{-m}{1+m}} \left(\frac{\omega}{B_0}\right)^{\frac{1}{1+m}}. \tag{27}$$

9.18. Различают абсолютную и относительную шероховатость русла, т.е. наличие неровностей его поверхности.

Абсолютная шероховатость Δ – средняя высота неровностей поверхности русла над средней плавной линией дна; относительная шероховатость $\Delta/H_{ср}$, где $H_{ср}$ – средняя глубина потока.

9.19. При использовании для гидрологических расчетов кривой $Q = f(H)$ следует иметь в виду, что часто наблюдаются деформации дна русел и каналов, которые изменяют указанную зависимость. Так, в результате прошедшего половодья или паводка русло меняет свою глубину и конфигурацию и требуется построение другой зависимости. Иногда в течение паводкового периода такие явления могут наблюдаться после каждого значительного паводка.

9.20. К естественным подпорам относятся заторы льда, возникающие в период весеннего и осеннего ледоходов, а также зажоры, наблюдающиеся осенью и зимой.

Заторы вызывают резкий подъем уровней, достигающий 2–4 м и более. Явление затора развивается в течение нескольких часов.

Зажоры возникают в результате закупорки живого сечения шугой и внутриводным льдом и вызывают существенные, но более плавные подъемы уровней. Зажорные образования более устойчивы, могут сохраняться в течение многих дней и разрушаются медленно.

Подпоры наблюдаются на реках, впадающих в более крупные реки, так как последние имеют значительно большую амплитуду колебания уровней.

9.21 Сгонно-нагонные колебания уровней возникают под воздействием ветра на водную поверхность и зависят от продолжительности действия ветра, глубины водоема и уклона дна. Наибольший нагон за последние 50 лет наблюдался на побережье Азовского моря в устье Кубани и составил 4 м плюс высота волны. Наибольший сгон наблюдался в Таганроге и составил 4,2 м. В низовьях Дона подъем уровня при нагоне доходит до 2 м, а спад при сгоне – до 2,5 м. При этом дальность распространения нагона достигает 100 км.

Приливно-отливные колебания возникают главным образом в Охотском, Беринговом и Белом морях.

9.22. При расчетах, связанных с подтоплением зданий и сооружений, важно определить максимально возможное повышение уровня подземных вод. В связи с этим в ряде случаев необходимо определить максимальные уровни поверхностных водных объектов.

При определении расчетных величин наивысших уровней воды рек следует использовать все имеющиеся материалы наблюдений Госкомгидромета. Кроме того, следует изучить литературные, архивные и летописные источники.

Вероятность экстремального уровня определяется путем:

генетического анализа, а также анализа численной структуры исследуемого ряда;

изучения и анализа всей имеющейся информации об атмосферных осадках, особенно в случаях, когда ряд наблюдений осадков больше, чем гидрологический ряд;

анализа величин отклонения выдающегося максимума от последующих, а также от его математического ожидания;

сопоставительных сравнений с другими пунктами, содержащими выделяющиеся величины;

применения метода экспертных оценок.

9.23. Максимум следует считать выдающимся в том случае, если при обработке рядов продолжительностью $n \leq 50$ лет будет определено, что он имеет повторяемость N_1 не менее 100 лет ($P \leq 1\%$). Для рядов продолжительностью $n > 50$ лет максимум надо считать выдающимся в случае, если он имеет повторяемость $N_1 > 2n$.

9.24. Расчетные уровни воды рек определяются по эмпирической кривой обеспеченности наивысших уровней. Для рек, на которых максимальные уровни воды наблюдаются в разные сезоны и обусловлены и половодьями, и дождевыми паводками, строятся две кривые обеспеченности и для расчета выбирается та, которая ставит проектируемое сооружение в более невыгодные условия.

При построении эмпирической кривой обеспеченности значение первого (и второго) выдающихся уровней наносят на вероятностную бумагу с той вероятностью, которая определена в соответствии с п. 9.22.

Значения последующих членов ряда наносятся в соответствии с вероятностью P_m, определенной по формуле $P_m = m/(1+n)$.

9.25. В связи с наблюдающимися половодьями и паводками на реке, протекающей через город, потребуются сооружения инженерной защиты. Для проектирования таких сооружений следует составить продольный профиль водной поверхности реки с нанесением на нем уровней вероятностью $P = 1–10\%$ (один раз в 10–100 лет). Такой профиль составляется на основании уровенных наблюдений на постах, их статистической обра-

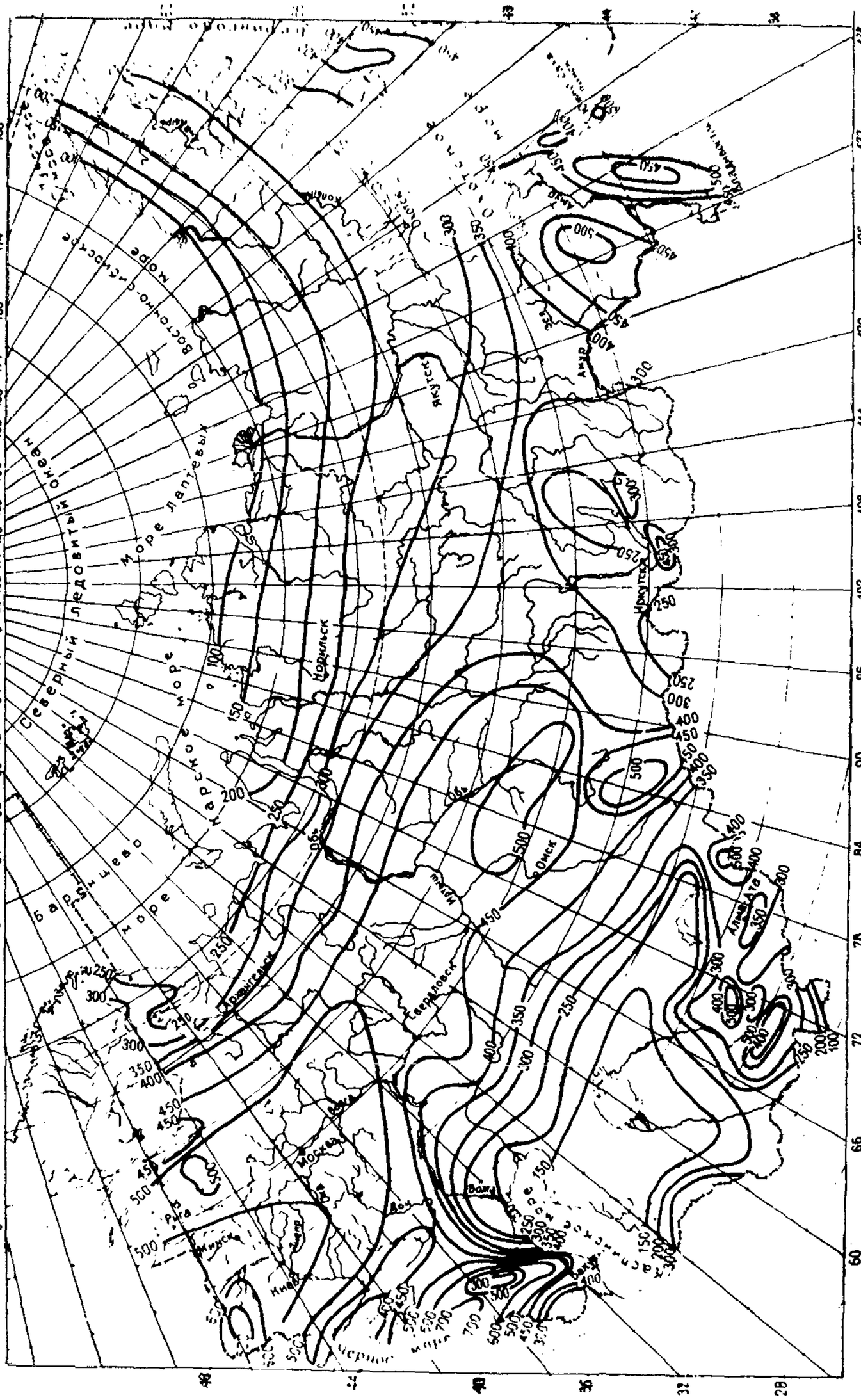


Рис. 30. Среднее годовое испарение с поверхности суши, мм

ботки с привлечением многолетних данных Госкомгидромета, а также с использованием формул гидравлики.

9.26. На городской территории или на территории промышленного предприятия расположены два типа водных объектов – естественные и искусственные.

К естественным прежде всего относится река, почти всегда имеющаяся на территории города, а также ее притоки.

К искусственным относятся сеть каналов и водоотводных лотков, сбрасывающих воду в реку и ее притоки, а также в ливневую канализацию; водоемы, фонтаны и т.п.

9.27. Гидрологические данные о режиме рек (расходы и уровни воды, ледовые условия, сток наносов) следует получать из материалов многолетних наблюдений Госкомгидромета.

В случаях, когда станции и посты многолетних наблюдений Госкомгидромета расположены не на изучаемой территории, следует открыть один или несколько временных постов. Наблюдения на этих постах производятся одновременно с наблюдениями в гидрогеологических скважинах с учетом многолетних наблюдений Госкомгидромета.

9.28. Так как сток малых рек и ручьев, протекающих по территориям городов и промышленных предприятий, состоит в основном из сбрасываемых техногенных вод, следует тщательно изучать режим этих вод, собирая сведения о том, существует ли определенное время сброса вод, меняется ли объем этих вод в течение суток, ночью или днем, как влияют сезоны года на объем и режим сбрасываемых вод.

Измеряемые гидрометрическими методами расходы воды в реках и ручьях должны сопоставляться с объемом сбрасываемых вод. Расхождения, если они будут, должны быть объяснены.

Испарение с поверхности суши

9.29. Средние величины испарения с поверхности суши даны на рис. 30.

При составлении карты испарение вычислялось в соответствии с уравнением водного баланса по разности осадков и стока. Во внимание принималась также составляющая водообмена подземным путем для тех речных бассейнов и для тех территорий, где поступлением или оттоком воды подземным путем нельзя было пренебрегать.

Средняя относительная погрешность на карте величин испарения для равнинной территории СССР составляет 10–15%, для горных районов ошибка возрастает от 20% а в слабо изученных частях этих районов может достигать 40%.

9.30. Подавляющее большинство метеорологических станций расположены на лугу, целине или залежи и характеризуют режим испарения с этих видов поверхностей. Метеорологические станции, расположенные вблизи водоемов, нерепрезентативны для определения испарения с суши. В расчет должны приниматься станции, удаленные от реки на $5B$, где B – ширина реки; от водоема шириной до 1 км – на расстояние, равное его ширине. Влияние таких водоемов, как Азовское, Черное и Каспийское моря оказывается заметным в зоне шириной до 150 км.

В зоне избыточного увлажнения, где испарение с почвы близко к испарению с водной поверхности, искажающее влияние водоема ослабляется, а размеры зоны влияния водоема уменьшаются в 2–4 раза.

9.31. Вопрос об изменчивости испарения с почвы исследован недостаточно. В качестве ориентира приводится график на рис. 31.

Инфильтрация

9.32. Величина инфильтрации определяется по формуле (7). Полученная величина соответствует тому году (или тому отрезку времени), для которого составлено уравнение.

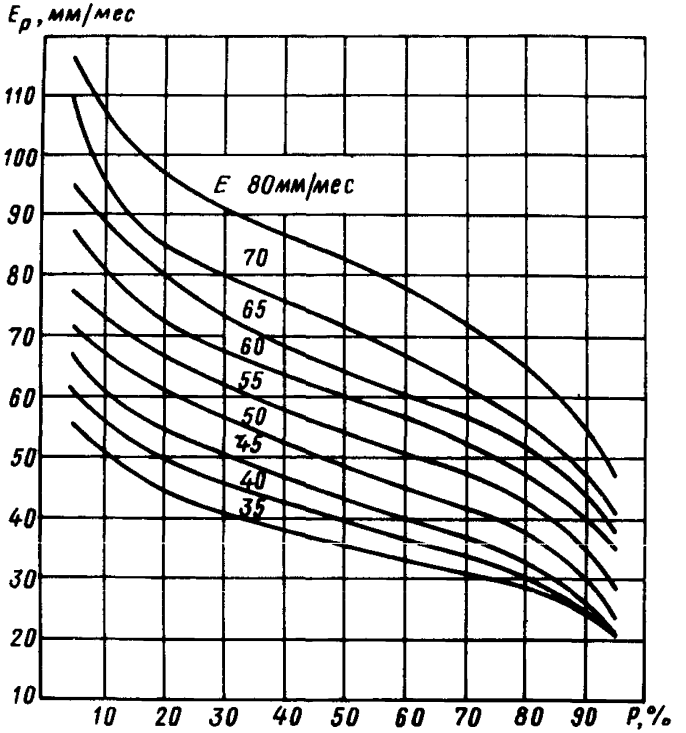


Рис. 31. Месячные величины испарения с разнотравья (луг, целина) различной обеспеченности E_p в зависимости от среднего месячного испарения E

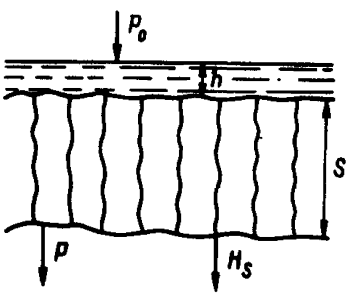


Рис. 32. Схема фильтрации воды в почву (интенсивность дождя больше скорости просачивания)

S – слой почвы, h – слой воды, P_0 – атмосферное давление, P – давление воздуха в почве, H_s – всасывающая сила капиллярных менисков

9.33. Вероятность полученной величины средней годовой инфильтрации определяется следующим образом: вычисляется инфильтрация за период не менее 20 лет, полученный ряд ранжируется и обрабатывается по методике, изложенной в разд. 7.

9.34. Под инфильтрацией понимается просачивание воды в почву и движение ее к уровню подземных вод. Просачивание происходит под действием:

силы тяжести просачивающегося столба воды S;

всасывающей силы капиллярных менисков, измеряемой высотой H_s;

давления подземного поверхностного слоя воды h;

избыточного давления воздуха в почве P по сравнению с атмосферным P_0, возникающего под нижней гранью просачивающейся воды (рис. 32).

Таблица 30. **Интенсивность впитывания для разных грунтов и почв**

Грунты и почвы	Интенсивность впитывания, мм/мин
Глина, солонцы суглинистые	0,04
Суглинки, суглинистые черноземы, глинистые сероземы	0,08
Каштановые почвы, чернозем обычный, солонцы супесчаные	0,15
Супеси с примесью гумуса в верхних слоях, задернованные супеси, серолесные почвы	0,2
Супеси без примеси гумуса в верхних слоях	0,33
Пески без примеси гумуса в верхних слоях	0,5

Примечание. По данным А.Н.Бефани, проводившего опыты на Дальнем Востоке, впитывание составляет 10 мм/сут (0,007 мм/мин).

9.35. Просачивание воды в почвогрунты может осуществляться в форме турбулентного (капельно-струйчатого) движения, когда вода идет по трещинам, ходам и порам значительных размеров и ламинарного (капиллярного) движения по каналам и порам небольшого сечения.

9.36. Может наблюдаться движение типа свободного просачивания, когда вода обтекает частицы грунта, не заполняя поры, при этом влага перемещается до уровня грунтовых вод. В данном случае капиллярные силы проявляются в большей мере, чем при следующей стадии просачивания.

Когда поверхность почвы покроется сплошным слоем и поры, хотя бы верхних слоев почвы, окажутся полностью заполненными водой, свободное просачивание переходит в напорное.

9.37. Соотношение между капельно-струйчатой и капиллярной формами движения воды в грунтах меняется в широких пределах. Это объясняется наличием в почвогрунтах пор различных размеров. Так, в условиях хорошо проницаемых лесных почв перемещение воды в виде капельно-струйчатого движения может оказаться главной формой перемещения.

Начальная стадия просачивания в почву, когда силы трения и сопротивления почвенного воздуха малы и преобладают капиллярные силы, называется впитыванием.

По мере увеличения глубины увлажнения все больше пор заполняется водой, а количество пор, имеющих поверхность раздела вода – воздух, уменьшается, что приводит к уменьшению капиллярных сил. Дальнейшее продвижение воды происходит под преобладающим действием силы тяжести.

9.38. Процесс проникновения воды в зону аэрации можно описать следующим образом.

При выпадении дождя капли воды проникают в поверхностный слой, в этом слое значительное влияние оказывают температура воздуха, солнечная радиация и ветер. С момента, когда капли воды выходят из сферы влияния метеорологических условий, они движутся вертикально вниз в форме пленок или в виде ламинарного потока по капиллярам.

9.39. Интенсивность впитывания приводится в табл. 30 по данным главы СНиП II-47-80.

9.40. Для определения влияния гидрогеологических параметров K и M на величину поднятия уровня грунтовых вод можно использовать работу [63], где выполнены примеры расчета. В табл. 31 приводятся величины подъема уровня при различных параметрах, из которых видно, что на величину поднятия уровня в наибольшей степени влияют два фактора – инфильтрация и коэффициент фильтрации грунта.

Таблица 31. **Таблица величин поднятия уровня грунтовых вод $\Delta h_ц$ при различных параметрах [63]**

Инфильтрация ω, м/сут	Мощность водоносного слоя $h_ц$, м	Коэффициент фильтрации $K_ф$, м/сут	Водоотдача μ	Расчетное время t, сут	Размеры площади $\alpha = \frac{l}{b}$	Подъем уровня в центре $\Delta h_ц$, м	Степень влияния меняющегося параметра
			Прямоугольник				
0,01	15	7,5	0,15	100 200 400 800	0,67	1,33 1,71 2 2,3	Небольшая
0,01	15	7,5	0,5 0,15 0,25	200	0,67	1,76 1,71 1,44	Малая
0,01	15	7,5 1,0 0,1	0,15	200	0,67	1,71 6,12 12,5	Очень большая
0,01	5 15 50	7,5	0,15	200	0,67	3,40 1,71 0,6	–

Инфильтрация ω, м/сут	Мощность водоносного слоя h_1, м	Коэффициент фильтрации K_Φ, м/сут	Водоотдача μ	Расчетное время t, сут	Размеры площади $\alpha = \frac{l}{b}$	Подъем уровня в центре $\Delta h_ц$, м	Степень влияния меняющегося параметра
0,01	15	7,5	0,15	200	$b = \begin{cases} 15 \\ 150 \\ 1500 \end{cases}$	40 1,71 13	Большая Очень большая
0,001	15	0,01	0,05	200	0,67	4	–
			Полоса				
0,1 0,001 0,0001	10	0,7	0,05	200	$2L = 200$	11,2 1,84 0,20	Очень большая Большая
0,001	10	7,5 0,7 0,1 0,01	0,05	200	$2L = 200$	0,74 1,84 2,6 2,88	Большая Малая
0,001 0,001	15 10	0,01 0,01	0,05 0,05	200 200	$2L = 200$ $2L = 200$	2,88 2,88	Не влияет
			Круг				
0,001	15	0,01	0,05	200	$r_0 = 138$	2,14	

Примечания: 1. Для прямоугольника влияние инфильтрации на величину $\Delta h_ц$ прямо пропорционально.
2. Принят водоносный горизонт однородный, безнапорный.

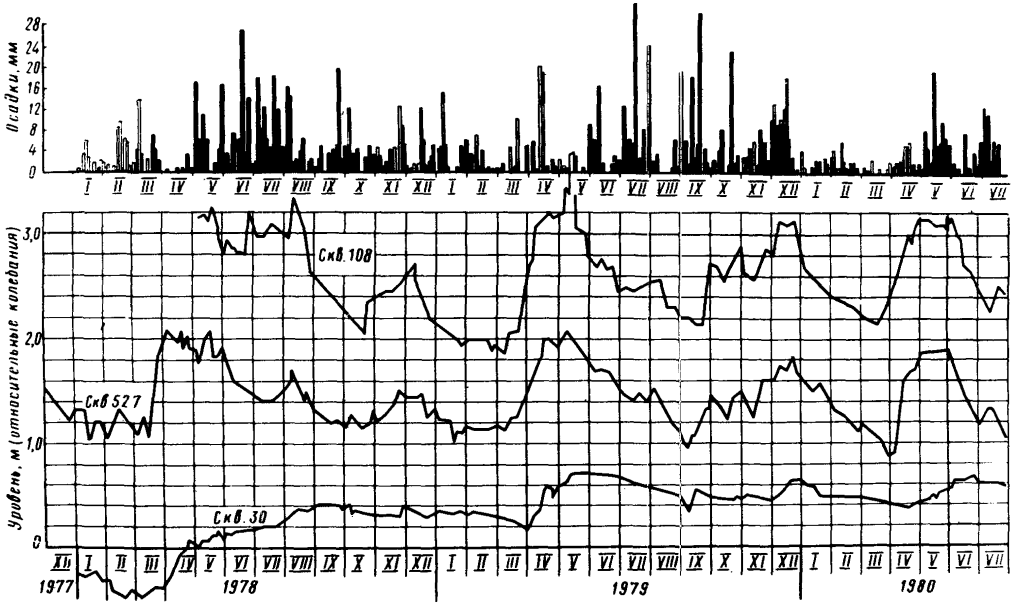

Осадки, мм
28
24
20
16
12
8
4
0
I II III IV V VI VII VIII IX X XI XII I II III IV V VI VII VIII IX X XI XII I II III IV V VI VII
Уровень, м (относительные колебания)
3,0
2,0
1,0
0
Скв.108
Скв.527
Скв.30
XII I II III IV V VI VII VIII IX X XI XII I II III IV V VI VII VIII IX X XI XII I II III IV V VI VII
1977
1978
1979
1980

Таблица 32. Ориентировочные данные о величине дополнительного инфильтрационного питания на промышленных площадках [63]

Наименование промпредприятий	Средняя годовая интенсивность инфильтрации, м/сут
Тепловые электростанции	От $1{,}1^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-3}$
Металлургические заводы	$(3-5)\ 10^{-4}$
Химические, нефтехимические и нефтеперерабатывающие заводы	$(1-2)\ 10^{-4}$
Горно-обогатительные комбинаты	От $0{,}7 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-3}$
Городские территории	$(5{,}2-5{,}8)\ 10^{-4}$

Влияние инфильтрации для прямоугольного пласта происходит по прямо пропорциональной зависимости. Для полосы и круга эта зависимость более сложная, так как здесь величина инфильтрации входит в состав аргумента при определении интеграла вероятности.

9.41. Данные о величине дополнительного инфильтрационного питания за счет техногенных факторов даны в табл. 32.

Пример 10. Сравниваются колебания уровня в трех скважинах. Скв. № 108 находится в условиях слабо нарушенных хозяйственной деятельностью; скв. № 527 – вблизи городской застройки; скв. № 30 расположена на территории крупного промышленного предприятия с плотностью застройки и водонепроницаемых покрытий более 90%.

На рис. 33 даны графики колебания уровня грунтовых вод за 2,5 года наблюдений в городе Г (пример 6).

Колебания воды в скв. № 108 и 527 совершенно идентичны: в апреле–мае отмечается весенний максимум уровней, в октябре–декабре новый максимум под влиянием летних дождей, резкий спад в январе–марте. Можно сказать, что скважины находятся под непосредственным воздействием гидрометеорологических факторов. Этому способствуют и фильтрационные свойства грунтов зоны аэрации – коэффициент фильтрации здесь равен 5–10 м/сут.

Совершенно иной характер носят колебания в скв. № 30. Эта скважина, находящаяся в условиях активных техногенных воздействий, имеет другой характер колебаний уровней – значительно сглаженный. Если в скв. № 108 и 527 весенний подъем доходит до 2 м, то в скв. №30 он не превышает 0,5 м. Сильные дожди июня–октября 1979 г. вызвали в этой скважине подъем всего до 20 см. В скв. № 108 и 527 нельзя заметить направленного повышения уровня (трэнда), тогда как в скв. №30 трэнд имеет выраженный характер и за 2,5 года составляет 1 м.

Все эти явления объясняются тем, что техногенные факторы, и прежде всего большие величины водозабора и водосброса (до 400 000 $м^3$/сут), имеют основное влияние на режим уровней в скв. №30.

9.42. Инфильтрация в русло реки определяется следующим образом. На том участке реки, где требуется определить инфильтрацию, разбивают два гидрометрических створа, в начале и в конце участка. Затем выполняется тщательное определение расхода воды в реке в обоих створах, по возможности одновременно. Если расход реки в нижнем створе меньше, чем в верхнем, происходит потеря воды $Q_п$ из реки в русло.

$$Q_п = Q_в - Q_н ,$$

где $Q_в$, $Q_н$ – расходы воды в реке в верхнем и нижнем створах.

Следует учитывать, что расход потерь $Q_п$ должен находиться в соотношении с $Q_в - Q_в \leq 20 Q_п$.

Время фильтрации (сутки) речной воды через кольматированный слой русла A_o определяется по формуле

$$A_0 = \frac{m_0}{k_0} = \frac{H_{ср} F}{Q_п},$$

где m_0 – толщина слоя, м; k_0 – коэффициент фильтрации, м/сут; $H_{ср}$ – средняя глубина реки на участке, м; $F = LB$, L – длина участка реки, м; B – средняя ширина реки, м, на длине L, при глубине $H_{ср}$.

Чтобы судить о величине инфильтрации в русло реки, можно привести в качестве примера реку Сочи. Здесь инфильтрация составляет 1,7 м^3/сут на 1 м^3. Тогда расход инфильтрации

$$Q_п = 1{,}7 H_{ср} LB.$$

На один километр длины реки при ширине $B = 60$ м и $H_{ср} = 1$ м расход инфильтрации составит $1{,}7 \times 1 \times 1000 \times 60 = 100\,000$ м^3/сут $= 1{,}16$ м^3/с

10. ОЦЕНКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР ИХ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

10.1. Одними из основных исходных данных для моделей прогноза подтопления являются гидрогеологические параметры, характеризующие фильтрационные свойства грунтов (горных пород) или гидродинамические свойства водоносных горизонтов.

Гидрогеологические параметры (их перечень дан в п.п. 10.4–10.12) рассчитываются по данным опытно-фильтрационных работ (ОФР) и стационарных гидрогеологических наблюдений на всех стадиях гидрогеологических исследований, результирующим этапом которых является составление окончательной расчетной геофильтрационной схемы, наиболее полно и достоверно отражающей гидрогеологические условия территории, в том числе пространственную изменчивость фильтрационных свойств.

10.2. При полевых исследованиях определяются "фактические" (локальные) значения параметров в отдельных точках пласта или в пределах опробываемого массива. Творческий характер этих работ затрудняет их регламентацию и требует от исполнителя исследовательского, конкретного подхода к их постановке, проведению и интерпретации. Особенно важно, чтобы анализ данных ОФР производился непосредственно во время их проведения, что позволяет выполнить целенаправленную корректировку опыта и значительно повысить его информативность.

В то же время при составлении расчетных геофильтрационных схем прогноза обычно используются расчетные параметры, характеризующие значительно большие по площади участки водоносного горизонта с плановой изменчивостью фильтрационных свойств.

10.3. При выборе методов проведения и интерпретации ОФР и стационарных гидрогеологических наблюдений необходимо иметь в виду, что эти методы не равнозначны в конкретных природных условиях и имеют определенные границы применения. Поэтому в настоящем разделе даны только методические основы методов определения и расчета параметров, принципы схематизации, отражающие природную фильтрационную неоднородность. Конкретные сведения по оценке параметров и выбору их расчетных значений приведены в литературе, ссылки на которую даны в тексте.

Характеристика гидрогеологических параметров

10.4. Коэффициент фильтрации k – показатель водопроницаемости, принимаемый для инженерных расчетов численно равным скорости фильтрации подземных вод при градиенте давления, равном единице. Коэффициент фильтрации k, см/с или м/сут, связан с коэффициентом проницаемости C зависимостью

$$k = \alpha C \gamma / g, \qquad (28)$$

где α – коэффициент размерности (при k, см/с, $\alpha = 1$; при k, м/сут, $\alpha = 864$); C – коэффициент проницаемости, дарси (1 дарси $= 1{,}02 \cdot 10^{-8}$ см^2); γ – плотность воды, кгс/см^3; g – коэффициент динамической вязкости, сП (1 сП $1{,}02 \cdot 10^{-8}$ кгс·с/см^2).

Методы полевых определений проницаемости или коэффициента водопроводимости (фильтрации) регламентированы ГОСТ 23278–78.

10.5. Коэффициент водопроводимости (km или T) – показатель водопроводимости, численно равный произведению коэффициента фильтрации на мощность водоносного горизонта (слоя). Единица измерения – м^2/сут.

10.6. Коэффициент водоотдачи μ – показатель водоотдачи[1], характеризующий величину изменения количества воды в грунте (горной породе) при гравитационном осушении, численно равный отношению объема воды, которую может отдать водонасыщенный грунт (горная порода), к полной влагоемкости. В литературе этот коэффициент иногда называют коэффициентом гравитационной емкости породы, характеризующий емкостные свойства горных пород в безнапорных пластах.

По балансовой сущности величина μ – это изменение емкости гравитационной зоны ΔV_o в единичном элементе безнапорного пласта (т.е. в элементе с единичной площадью поперечного сечения), отнесенное к изменению уровня свободной поверхности потока ΔH [49]:

$$\mu = \Delta V_o / \Delta H. \qquad (29)$$

При опускании свободной поверхности уровня грунтовых вод эта величина соответствует коэффициенту водоотдачи $\mu_в$, а при повышении свободной поверхности – коэффициенту недостатка насыщения – $\mu_н$.

Обычно величина водоотдачи принимается равной активной пористости n_o за вычетом объема, занимаемого связной водой. Балансовую структуру коэффициентов водоотдачи или недостатка насыщения можно представить формулой

$$\mu_в = n_o - \omega_{з.в} - \omega_{ст}\ ; \qquad (30)$$
$$\mu_н = n_o - \omega_{з.в} - \omega_c\ ,$$

где $\omega_{з.в}$ – относительное объемное содержание защемленного воздуха; $\omega_{ст}$ – влажность стыковой воды (в углах пор); ω_c – влажность грунта под свободной поверхностью.

Формирование гравитационной емкости представляет собой довольно сложный динамический процесс, поскольку при нестационарной фильтрации происходит переформирование капиллярной зоны, связанное с необходимостью передачи воды из верхней части ее на свободную поверхность гравитационной зоны. Так при понижении уровня капиллярная зона в начальный период постепенно растягивается, а при достаточно длительном равномерном снижении уровня наступает динамическое равновесие капиллярной зоны, когда эпюра влажности по ее высоте не изменяется, а лишь опускается параллельно самой себе со скоростью опускания свободной поверхности. Этот процесс приводит к тому, что в начальный период нестационарного режима водоотдача имеет замедленный характер, так что коэффициент водоотдачи в данный период постепенно увеличивается, достигая своего предельного значения при стабилизации формы эпюры влажности в капиллярной зоне.

Особенность снижения уровня при откачках в безнапорных пластах, когда происходит резкое выполаживание графика прослеживания в процессе формирования гравитационной водоотдачи, получила название "эффекта Болтона" [12, 49]. Продолжительность этого периода, называемого ложностационарным режимом, может составлять несколько суток, что предъявляет особые требования к методике откачек и их интерпретации.

10.7. Коэффициент упругой водоотдачи μ^* – показатель упругой водоотдачи[2] численно определяемый количеством воды, которое может быть получено с единицы площади водоносного горизонта при понижении напора на 1 м:

$$\mu^* = \Delta\beta^* m\ , \qquad (31)$$

---

[1] Водоотдача – способность водонасыщенного грунта (горной породы) отдавать воду под действием гравитационных сил.

[2] Упругая водоотдача – свойство напорного водоносного горизонта отдавать воду при снятии напора.

где Δ – объемный вес воды, для пресной воды принимают $\Delta = 1$; β^* – коэффициент упругоемкости пласта, характеризующий количество высвобождающейся воды с единицы объема пласта при понижении давления на 1 кгс/см^2; m – мощность пласта.

10.8. Коэффициент уровнепроводности[1] a_y, м^2/сут, характеризующий скорость распространения колебания уровня, численно равен отношению коэффициента водопроводимости к коэффициенту водоотдачи

$$a_y = T/\mu. \tag{32}$$

10.9. Коэффициент пьезопроводности a, м/сут, – показатель пьезопроводности, характеризующий скорость распространения давления напорных вод, численно равный отношению коэффициента водопроводимости к коэффициенту упругой водоотдачи

$$a = T/\mu^*. \tag{33}$$

Поскольку в основные расчетные зависимости обычно вместо коэффициента водоотдачи входит коэффициент уровнепроводности (пьезопроводности), на практике в качестве основных гидрогеологических параметров обычно определяют коэффициенты водопроводимости (фильтрации) и уравнепроводности (пьезопроводности).

10.10. Параметр перетекания B характеризует взаимосвязь водоносных горизонтов и определяется соотношением водопроницаемостей основного пласта и разделяющих слабопроницаемых слоев. Если перетекание происходит через слои, лежащие в кровле и подошве водоносного горизонта, то параметр B определяется по формуле

$$B = \sqrt{\frac{km}{(k_1/m_1)+(k_2/m_2)}}, \tag{34}$$

где k, k_1, k_2 – коэффициенты фильтрации основного водоносного горизонта и слабопроницаемых слоев, лежащих в кровле и подошве; m, m_1, m_2 – соответствующие значения мощностей.

10.11. Коэффициент сопротивления заиленного слоя A_0 и коэффициент перетекания A характеризуют степень гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод, определяемой суммарным сопротивлением русловых отложений, обусловленных несовершенством вреза реки в водоносный горизонт, наличием слабопроницаемого заиленного слоя и неоднородностью русловых отложений.

Параметры A_0 и A определяются по следующим зависимостям [12]:

$$A_0 = m_0/k_0; \tag{35}$$

$$A = 1/A_0 km, \tag{36}$$

где k_0 и m_0 – соответственно коэффициент фильтрации и мощность заиленного слоя.

10.12. В практических расчетах для условий установившейся фильтрации наибольшее распространение получил метод учета общего сопротивления русловых отложений, предложенный В.М.Шестаковым и основанный на увеличении истинного расстояния от водозабора до реки на величину Δl (при этом принимается, что дополнительное сопротивление, связанное с увеличением длины потока на величину Δl будет эквивалентно сопротивлению русловых отложений).

---

[1] Уровнепроводность – способность водоносного горизонта передавать колебания уровня безнапорных подземных вод.

Основные полевые методы изучения фильтрационных свойств грунтов (горных пород)

10.13. Основные полевые методы целесообразно разделить на две группы: методы, применяемые для изучения фильтрационных свойств водоносных горизонтов (пластов) или грунтов зоны аэрации.

10.14. Основной метод изучения фильтрационных свойств водоносных горизонтов – откачка воды из скважины. Откачки подразделяются на три вида: пробные, опытные и опытно-эксплуатационные.

10.15. Пробными откачками опробуются все гидрогеологические скважины, пробуренные в процессе изысканий. Эти откачки производятся для предварительной оценки коэффициентов фильтрации и водопроводимости водовмещающих пород, химического состава подземных вод для получения сравнительной характеристики различных участков и зон водоносного горизонта. Опробование одиночных скважин имеет ряд ярко выраженных специфических черт, обусловливаемых резкой интенсификацией потока вблизи опробуемой скважины, а также проявлениями более сложного характера потока в прискважинной зоне и в самой скважине.

10.16. Опытные откачки – основной вид гидрогеологических работ. В зависимости от наличия или отсутствия наблюдательных скважин опытные откачки подразделяются на кустовые или одиночные. Кустовые откачки – основной вид опытных работ при изысканиях, когда основной задачей является определение гидрогеологических параметров и изучение граничных условий.

10.17. ГОСТ 23278–78 предусматривает определение коэффициента водопроницаемости (фильтрации) кустовыми испытаниями (в сложных гидрогеологических условиях и для ответственных объектов) и одиночными (в простых гидрогеологических условиях и преимущественно на ранних стадиях исследований). При этом необходимо иметь в виду, что в процессе одиночных испытаний определяется только k, km или T. Следовательно, кустовые испытания для определения других параметров должны применяться для любых гидрогеологических условий и любых объектов при условии, что изыскатель не может принять эти параметры для расчетов по аналогии с изученными территориями.

Определение гидрогеологических параметров кустовыми испытаниями регламентируется СНиП II-9-78 (прил. 6).

10.18. Вспомогательными методами полевых испытаний по ГОСТ 23278–78 являются: нагнетание воды в скважины (для скальных трещиноватых пород) и расходометрия (определение фильтрационных характеристик для слоистых грунтов происходит по распределению скорости движения воды – расходу по стволу скважины при откачке или наливе). Технология проведения расходометрии и используемая при этом аппаратура рассмотрены в работе [18].

10.19. Допускаемые к применению методы – налив воды в скважины в грунтах с коэффициентом фильтрации не менее 1 м/сут и стационарные гидрогеологические наблюдения. Следует отметить, что достоверность оценки k, km по данным экспресс-налива (откачки) в значительной степени зависит от сохранности прискважинной зоны, поэтому для их применения требуется доказательство незначительного влияния сопротивления прискважинной зоны.

10.20. Мироненко В.А. и Шестаков В.М. [49] считают, что "экспресс-методы" мало пригодны для надежного определения гидрогеологических параметров. Это объясняется, в частности, масштабными эффектами, скин-эффектом и практически полным отсутствием объективных критериев для выделения представительного участка индикаторного графика. Поэтому на практике экспресс-опробования часто превращаются в быстрый метод определения неверных значений параметров. Вместе с тем экспресс-опробования помогают выполнить качественную оценку водообильности пласта или прифильтровой зоны скважины.

Экспресс-налив, например, может быть использован [64]:

для быстрого и без больших затрат средств и времени определения

величин коэффициента фильтрации или водопроводимости обводненных пород на поисковой и предварительных стадиях разведки (для целей водоснабжения);

для определения фильтрационных свойств пород призабойной зоны скважины или небольших участков, непосредственно примыкающих к опытной скважине;

для оценки состояния ранее пробуренных скважин;

для оценки состояния и инерционности наблюдательных скважин;

для определения степени несовершенства скважин.

10.21. Основной метод изучения фильтрационных свойств грунтов зоны аэрации – налив воды в шурф. Методы, основанные на теории установившегося движения воды в грунте – Болдырева, Нестерова, Гиринского. Методы, основанные на теории неустановившегося движения воды – Биндемана, Веригина. Методика по проведению опытов и расчета коэффициента фильтрации дана в работах [8, 17, 48, 55, 84].

10.22. Вспомогательные методы – нагнетание воды в скважины. Допускаемые методы – налив воды в скважины [64].

Типизация расчетных схем и условий проведения опытно-фильтрационных работ для расчета гидрогеологических параметров

10.23. Многообразие природных условий и технологических схем проведения опытов обусловливают необходимость типизации расчетных схем, к которым может быть сведена реальная природная обстановка при гидрогеологической схематизации для интерпретации результатов опыта. Интерпретация должна основываться на глубоком анализе гидрогеологических условий. При этом предварительную схематизацию необходимо выполнять уже при проектировании опыта по данным предшествующего комплекса полевых работ. Основным содержанием интерпретации опыта является доказательство соответствия опытных закономерностей изменения уровней принятым для обработки математическим зависимостям.

10.24. Остановимся на характеристике пространственной изменчивости (неоднородности) фильтрационных свойств водоносных горизонтов. Существующие классификации неоднородности, приведены в табл. 6, дифференцируются по оценке степени неоднородности водоносных горизонтов при переходе от локальных значений параметров к расчетным параметрам пласта и степени неоднородности с учетом масштабов опробования для оценки локальных значений параметров при интерпретации результатов опытов.

Неоднородность как высшего, так и низшего (структурная неоднородность) порядка, обычно не препятствует рассмотрению неоднородных водоносных горизонтов в пределах области воздействия возмущения как однородной среды, а проявление эффективной (хаотической) фильтрационной неоднородности существенно сглаживается по мере роста области влияния возмущения (например, при кустовых откачках).

Влияние неоднородности низшего порядка или структурной неоднородности при интерпретации кустовых откачек учитывается современными методами расчета параметров для нижеприведенных типовых расчетных схем [7, 12, 48, 49, 53, 69].

10.25. По особенностям режима движения подземных вод (осушение пласта в безнапорных водоносных горизонтах или упругий режим фильтрации в напорных горизонтах), по строению водоносных горизонтов в плане или вертикальном разрезе, по характеру внешних границ области фильтрации выделяют следующие типовые схемы:

А. Неограниченные водоносные горизонты (область фильтрации имеет значительные размеры, причем источники возмущения настолько удалены от границ области, что влиянием этих границ можно пренебречь), условно однородные по водопроводимости:

1. Напорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях, изолированные в кровле и подошве.

2. Безнапорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях, изолированные в подошве.

3. Напорные и безнапорные водоносные горизонты в трещиноватых породах.

Б. Полуограниченные водоносные горизонты (источник возмущения находится вблизи одной какой-либо границы области, другие границы удалены на значительное расстояние и могут не учитываться). Границей области фильтрации является контур постоянного напора ($H=const$ частный случай граничного условия первого рода) или непроницаемый контур $Q=0$ – частный случай граничного условия второго рода.

В. Ограниченные водоносные горизонты (область фильтрации имеет относительно небольшие размеры, в связи с чем источник возмущения находится в зоне влияния границ области с нескольких сторон), условно однородные по водопроводимости. Границы области фильтрации двух видов : $H=const$ и $Q=0$. Они могут быть разнородными или однородными. Упрощенные схемы: пласт-полоса, пласт-квадрант, пласт-угол, пласт-круг.

Г. Водоносные горизонты в слоистых толщах (двуслойное строение или многослойное строение). В работе [7] расчетные схемы для слоистых пластов детализированы.

Д. Водоносные горизонты неоднородные в плане по водопроводимости и (или) водоотдаче.

Е. Водоносные горизонты с локальными очагами питания или разгрузки в зоне источника возмущения.

По степени вскрытия водоносного горизонта опытной скважиной выделяются скважины совершенные и несовершенные. Степень вскрытия водоносного горизонта существенно определяет структуру фильтрационного потока при опыте и схему его интерпретации.

По изменению фильтрационного процесса во времени выделяют опыты в стационарном и нестационарном режимах.

По режиму возмущения выделяют опыты с постоянным или изменяющимся по известному закону дебитом.

10.26. Наливы в шурфы являются основным методом определения гидрогеологических параметров (k, $\mu_н$) зоны аэрации. При инфильтрации из шурфа поток имеет чрезвычайно сложный характер, в значительной степени определяемый неоднородностью строения зоны аэрации, в связи с чем не представляется возможным составить расчетную схему фильтрации из шурфа. Поэтому для практических расчетов принимается расчетная схема вертикального просачивания. Пласт рассматривается как однородный. Учет анизотропии грунтов (по коэффициенту фильтрации) производится по данным лабораторных анализов слоев грунта ниже плоскости налива [48].

Наливы в шурфы можно применять в тех случаях, когда уровень грунтовых вод находится от дна шурфа на глубине не менее суммы возможной мощности зоны промачивания, образующейся в процессе проведения опыта и высоты капиллярного поднятия. Практически эта глубина принимается равной 5 м [48, 55].

10.27. При мощности зоны аэрации 5–10 м рекомендуется выполнять наливы в несовершенные скважины (из-за технических трудностей при наливах в шурф при его глубине более 5–10 м), размещенные внутри исследуемого пласта или у его водоупорной кровли (подошвы). В этих случаях необходимо, чтобы напор, измеряемый от верха рабочей части скважины, в 10–12 раз превышал радиус насыщения породы водой [17].

10.28. При слоистом строении зоны аэрации, когда в ней имеются песчано-супесчаные слои мощностью несколько метров, подстилаемые глинистыми слоями, опробование может производиться наливом через скважины в песчаный слой. При этом поток растекается в опробуемом (песчаном) слое, одновременно просачиваясь через подстилающий (глинистый)

слой. Такое опробование дает принципиальную возможность определить горизонтальную проницаемость опробуемого слоя и вертикальную проницаемость подстилающего слоя. Методика проведения опыта и интерпретация его результатов даны в работе [84].

Основные методы расчета гидрогеологических параметров

10.29. Современные методы расчета гидрогеологических параметров по данным ОФР базируются на уравнениях неустановившегося движения подземных вод. В частных случаях, при стационарном или квазистационарном режимах фильтрации параметры k и km могут определяться по формулам Дюпюи.

Наиболее распространены следующие методы расчета параметров:

метод подбора или метод произвольных точек [48, 49, 53, 54];

метод прослеживания изменения понижения уровня во времени и по площади или графоаналитический [12, 48, 49, 69];

метод эталонных кривых [48, 53, 54];

метод интегрального баланса [9, 49].

10.30. Метод подбора для расчетной схемы опыта А.1 основан на уравнении Тейса, по которому определяется понижение напора

$$S = (-Q/4\pi km)E_i(-r^2/4at), \tag{37}$$

где Q – дебит откачки; km – коэффициент водопроводимости; r – расстояние от скважины, где определяется понижение напора через время после начала откачки; a – коэффициент пьезопроводности; E_i – интегральная показательная функция, значения приведены в работах [12, 49, 53, 54].

Метод заключается в том, что по известному отношению понижений уровня на два момента времени t_1 и t_2 подбором определяется a

$$S_1/S_2 = E_i(-r^2/4at_1)/E_i(-r^2/4at_2), \tag{38}$$

а затем вычисляется km:

$$km = \frac{Q}{4\pi S_{1-2}} E_i\left(-\frac{r^2}{4at_{1-2}}\right). \tag{39}$$

Длительность периода наблюдений, в течение которого следует пользоваться формулами (38, 39), определяется возможностью замены функции E_i ее логарифмическим приближением

$$t_0 > (2{,}5r^2/a). \tag{40}$$

Недостаток этого метода – соответствие применяемых зависимостей реальным природным условиям практически не контролируется, а расчеты проводятся всего по двум точкам.

10.31. Метод прослеживания изменения понижения уровня во времени и по площади (метод Джейкоба) находит широкое применение для периода откачки, когда функция E_i (37) становится близкой к логарифмической

$$S = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{2{,}25at}{r^2}. \tag{41}$$

Время, по истечении которого допустима замена интегральной функции логарифмической, получило название времени наступления квазистационарного режима, а зона, в которой справедлива логарифмическая зависимость между понижением и временем, – зоны (области) квазистационарного режима. Отличительной особенностью зоны является одинаковый темп снижения уровня во всех точках, расположенных в ее пределах. Радиус r_0 зоны квазистационарного режима определяется по формуле

$$r_0 = 0{,}63\sqrt{at}. \tag{42}$$

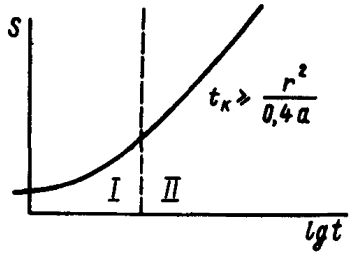


Рис. 34. Типовой график изменения понижения при откачке из напорного, неограниченного, однородного пласта

Таким образом, в напорном изолированном пласте понижение уровня через определенное время после начала откачки связано с логарифмом времени прямолинейной зависимостью. Это послужило основой графоаналитического метода расчета параметров путем анализа графиков $S-\lg t$. Ход изменения уровня в напорном изолированном пласте в полулогарифмическом масштабе показан на рис. 34. На графике $S-f(\lg t)$ выделяется два участка. На участке I точки этого графика не ложаться на прямую линию. Этот участок отвечает периоду времени, когда логарифмическая зависимость между понижением уровня и временем отсутствует.

II прямолинейный участок графика отражает закономерности изменения понижения при квазистационарном режиме.

10.32. Для расчета параметров графоаналитическим методом (п. 10.25) (А.1) опытные данные по понижению представляются в виде графиков $S-\lg t$, $S-\lg r$, $S-\lg(t/r^2)$ при постоянном дебите скважин. Для нахождения участка графика, отвечающего квазистационарному режиму, существует контрольное время $t = r^2/0,4a$. Формулы для расчета параметров даны в табл. 33.

Таблица 33. Способы обработки откачек при $Q=\text{const}$

$S-\lg t$	$S-\lg r$	$S-\lg t/r^2$
$km=\frac{0,183Q}{C_t}$	$km=\frac{0,366Q}{C_r}$	$km=\frac{0,183Q}{C_к}$
$\lg a=2\lg r-0,35+\frac{A_t}{C_t}$	$\lg a=\frac{2A_r}{C_r}-0,35-\lg t$	$\lg a=\frac{A_к}{C_к}-0,35$

Начальная ордината A – это отрезок, отсекаемый графиком на оси ординат соответственно при $\lg t=0$, $\lg r=0$, $\lg(t/r^2)=0$. Угловые коэффициенты графиков прослеживания определяются отношением $C=(S_2-S_1)/(\lg t_2-\lg t_1)$ для временного, $C=(S_2-S_1)/(\lg r_2-\lg r_1)$ для площадного и $C=(S_2-S_1)/[\lg(t_2/r_2^2)-\lg(t_1/r_1^2)]$ для комбинированного прослеживания.

10.33. Рассмотрим обработку откачек на стадии восстановления уровня. Полезным свойством информации, получаемой на стадии восстановления уровня, является ее меньшая по сравнению со стадией понижения зависимость от нерегулярных изменений дебита. Излагаемые далее приемы обработки данных восстановления уровня игнорируют эффект заполнения емкости скважины ввиду незначительной величины погрешностей, связанных с этим явлением [12]. Обработка восстановления после откачки с постоянным дебитом производится по уравнению

$$S=\frac{0,183Q}{km}\lg\frac{T+t}{t}, \qquad (43)$$

где T – продолжительность опыта, t – продолжительность восстановления.

Временной график прослеживания восстановления строится в координатах $S^* - \lg[t/(T+t)]$. При временном прослеживании удобнее использовать обратную величину сложного времени $t/(T+t)$ для того, чтобы иметь график привычного вида – возрастание S^* с возрастанием сложного времени. Ординатой служит повышение уровня, т.е. разность между динамическими уровнями в данный момент восстановления и в конце откачки.

Коэффициент водопроводимости определяется по формуле

$$km = \frac{0{,}183Q}{C}; \tag{44}$$

$$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{S_{max}}{C} - \lg T, \tag{45}$$

где C – угловой коэффициент графика $S^* - \lg[t/(T+t)]$;
S_{max} – максимальное восстановление уровня.

При условии $t \leq 0{,}1T$ влиянием "наследства" откачки можно пренебречь. Тогда обработка данных восстановления производится как для понижения.

Пределы применимости способов прослеживания восстановления определяются контрольным временем. Должно выполняться условие

$$T \geqslant t_к = \frac{r^2}{0{,}4a} \quad и \quad t > t_к. \tag{46}$$

Игнорирование "наследства" первой стадии возмущения при обработке данных восстановления уровня способом временного прослеживания приводит к погрешности, величина которой зависит от отношения t/T. Например, при $t/T=2{,}5$ погрешность достигает 45% в сторону завышения km.

Условия применимости уравнения Тейса–Джейкоба (41) предполагают: постоянство дебита, напорный режим опробуемого неограниченного в плане водоносного горизонта, его однородность по фильтрационным свойствам и мощности.

Обработка результатов опытных работ при сложном характере возмущения (остальные условия применимости сохраняются) на стадиях понижения или восстановления уровня дана в работах [12, 53].

10.34. Критерии применимости графоаналитического метода в ограниченных напорных пластах (расчетные схемы опыта: Б,В,Г,Д) следующие:

для обработки опытных данных при опробовании ограниченных пластов в плане можно пользоваться данным методом при следующих ограничениях: а) для способа временного и комбинированного прослеживания используются наблюдательные скважины, расположенные в радиусе не более $0{,}3l$ (где l – расстояние от возмущающей скважины до границы пласта) от возмущающей скважины; б) для способа площадного прослеживания используются наблюдательные скважины в радиусе не более $0{,}45l$. При данных ограничениях погрешность за счет игнорирования влияния границ пласта не превышает 10%;

в связи с тем, что опытная информация, получаемая на стадиях понижения и восстановления, не является равноценной, основной для определения параметров считается информация, получаемая на стадии понижения.

10.35. Графоаналитический метод (метод Джейкоба) применим для обработки результатов опробования напорных пластов, мощность и водоотдача которых остаются постоянными в продолжении опытных откачек. Безнапорные водоносные горизонты отличаются от напорных тем, что их мощность при понижении уровня является величиной переменной. Однако фактом изменения мощности можно пренебречь в тех случаях, когда величина понижения к концу откачки не превышает 20% начальной мощности водоносного горизонта. При большем понижении обработка опытных данных производится на основе формулы (41) в координатах $(2H-S)S \lg t$.

Расчетные формулы для a_y останутся по виду теми же, что и для напорного пласта, а в формулах для k, в отличие от формулы для km, увеличиваются в два раза численные коэффициенты. Обработка данных восстанов-

ления уровня производится способами прослеживания величины $(2H - S^*)S^*$, где S^* – повышение от динамического уровня в конце откачки.

10.36. На основе современных представлений о механизме фильтрации в безнапорных водоносных горизонтах и по результатам анализа опытных данных можно сделать следующие выводы [12]:

закономерности изменения уровня, получаемые при опробовании безнапорных водоносных горизонтов, имеют участки, описываемые уравнением Тейса–Джейкоба. Последние, являясь асимптотическими, формируются с запаздыванием от начала опыта по сравнению с закономерностями, получаемыми при опробовании напорных горизонтов. Величина запаздывания изменяется от нескольких минут до нескольких суток. Она зависит от неизвестных параметров и поэтому является величиной практически непрогнозируемой;

в зависимости от величины запаздывания асимптотических квазистационарных участков все случаи интерпретации подразделяются на простые, при которых запаздывание не наблюдается или наблюдается незначительно, и сложные, при которых запаздывание значительно. Поскольку асимптотические квазистационарные участки даже в сложных случаях, при постановке опытных работ необходимо стремиться к выявлению участков, аппроксимирующихся уравнением Тейса–Джейкоба Ориентируясь на вероятность сложного случая, необходимо регулировать продолжительность опыта с помощью оперативной документации;

при наличии асимптотических квазистационарных участков обработка опытных данных может производиться методом Джейкоба. Способы и приемы обработки будут зависеть от вида получаемых закономерностей изменения уровня. При отсутствии эффекта Болтона и понижении меньше 20% начальной мощности водоносного горизонта обработка производится так же, как и для напорных пластов, при отсутствии эффекта Болтона, а так же при наличии его и понижении больше 20% начальной мощности, обработка производится с использованием сложной ординаты $(2H - S)S$. Обработка опытных данных в присутствии эффекта Болтона связана с необходимостью поиска предварительного расчетного участка.

Интерпретация простых случаев при сложном характере возмущения и в ограниченных пластах опирается на приемы и критерии, рекомендованные для напорных пластов. При сочетании эффекта Болтона с влиянием граничных факторов аномальности интерпретация опирается на форму комбинированного графика и результаты контроля способом площадного прослеживания;

для обработки сложных случаев рекомендуются способы комбинированного и площадного прослеживания изменения уровня. Признаком представительности асимптотических участков на комбинированных графиках является выход графиков нескольких наблюдательных скважин на общую асимптоту. Влияние граничных факторов аномальности выражается в том, что асимптотические участки не достигают общего графика или отклоняются от него с увеличением времени. Площадное прослеживание производится на моменты времени, попадающие на конечные участки получаемых закономерностей изменения уровня и в пределы общего комбинированного графика. Близость значений параметров, рассчитанных площадным и комбинированным способами, является доказательством того, что избранный участок графика аппроксимируется уравнением Тейса–Джейкоба, а полученные на его основе гидрогеологические параметры являются действительными величинами.

10.37. Методика расчета параметров по данным кустовых откачек методом Джейкоба для всех расчетных схем приведена в работах [12, 49, 53].

10.38. Метод эталонной кривой основан на уравнении Тейса (37). Эталонная кривая представляет собой график зависимости функции E_i от безразмерного времени на логарифмической бумаге. График строится по любым заданным значениям величин, входящих в безразмерное время. Для определения km и a эталонная кривая совмещается с эмпирической, которая представляет собой график зависимости опытного понижения от времени на логарифмической бумаге в масштабе эталонного графика. Совмещение

производится до удовлетворительного совпадения эталонной и эмпирических кривых при условии сохранения параллельности координатных осей. По сдвигам осей определяются параметры. Пределы применимости метода ограничиваются малыми диапазонами времени $t \leq 100 r^2/a$. Надежность определения параметров определяется степенью совмещения. Если не удается добиться хорошего совмещения, что имеет место при действии различных факторов, вызывающих деформации опытных закономерностей, дальнейшая интерпретация опытных данных этим методом становится неопределенной.

10.39. Метод интегрального баланса основан на обработке комбинированного прослеживания при кустовых откачках из совершенных скважин на основе уравнения для определения понижения напора $S(r, t)$ в планово-радиальном потоке, полученном методом интегрального баланса [9, 49]

$$S(r, t) = Q/2\pi T\,[\ln(R/r) - 1 + (r/R)] = W_R Q/4\pi T, \qquad (47)$$

где R — радиус зоны влияния.

При наличии нескольких наблюдательных скважин данные площадного прослеживания на конечный момент откачки для различных пар пьезометров представляются в виде зависимости отношения $\sigma_r = \Delta S/\Delta \lg r$ от отношения $\Delta r/\Delta \lg r$; где ΔS — разница понижений в двух пьезометрах, расположенных на расстояниях r_i и r_{i+1} от центральной скважины, $\Delta r = r_{i+1} - r_i$, $\Delta \lg r = \lg(r_{i+1}/r_i)$.

Исходя из вида уравнения (47), график такой зависимости должен быть прямолинейным и отсекать на оси σ_r ординату σ_r°, по которой находится проводимость пласта

$$T = 0{,}366 Q/\sigma_r^\circ. \qquad (48)$$

После этого ведется обработка временного (комбинированного) прослеживания, для чего на различные моменты по опытным данным находят значения $W_R = 4\pi TS/Q$, а по таблице [49] определяют соответствующие значения R^2/r^2. Анализ зависимости $R^2(t)$ позволяет получить параметры емкости.

10.40. При стационарном (квазистационарном) режиме фильтрации коэффициент фильтрации (водопроводимости) по данным кустовых откачек может определяться по нижеследующим формулам Дюпюи–Тима с учетом поправок Веригина на несовершенство скважин.

Напорные воды

Центральная и наблюдательная скважины:

$$k = \frac{0{,}366Q[\lg(r_1/r_0) + 0{,}217(\xi_0 - \xi_1)]}{m(S_0 - S_1)}. \qquad (49)$$

Две наблюдательные скважины:

$$k = \frac{0{,}366Q[\lg(r_2/r_1) + 0{,}217(\xi_1 - \xi_2)]}{m(S_1 - S_2)}. \qquad (50)$$

Безнапорные воды

Центральная и наблюдательная скважины:

$$k = \frac{0{,}73Q[\lg(r_1/r_0) + 0{,}217(\xi_0 - \xi_1)]}{(2H - S_0 - S_1)(S_0 - S_1)}. \qquad (51)$$

Две наблюдательные скважины:

$$k = \frac{0{,}73Q[\lg(r_2/r_1) + 0{,}217(\xi_1 - \xi_2)]}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)}, \qquad (52)$$

Таблица 34. Расчет величин фильтрационных сопротивлений

$\frac{l}{m}$	m/r									
	0,5	1	3	10	30	100	200	500	1000	2000
0,1	0,00391	0,122	2,04	10,04	24,3	42,8	53,8	69,5	79,6	90,9
0,3	0,00297	0,0908	1,29	4,79	9,2	14,5	17,7	21,8	24,9	28,2
0,5	0,00165	0,0494	0,656	2,26	4,21	6,5	7,86	9,64	11	12,4
0,7	0,000546	0,0167	0,237	0,879	1,69	2,67	3,24	4,01	4,58	5,19
0,9	0,000048	0,0015	0,0251	0,128	0,3	0,528	0,664	0,846	0,983	1,12

где S_0, S_1, S_2 – понижения уровня соответственно в центральной, первой и второй наблюдательных скважинах; r_1 и r_2 – расстояния до первой и второй наблюдательных скважин от центральной; ξ_0, ξ_1, ξ_2 – величины фильтрационных сопротивлений, учитывающие несовершенство скважин. Для совершенных скважин формулы записываются без величин фильтрационных сопротивлений.

Величины фильтрационных сопротивлений представлены в табл. 34 в зависимости от отношения длины рабочей части фильтра центральной скважины l к мощности водоносного горизонта m и отношения m к r.

При определении величины ξ для безнапорных водоносных горизонтов мощность водоносного горизонта H уменьшается на половину понижения в центральной скважине. В том случае, если фильтр центральной скважины незатопленный, его длина l уменьшается на половину длины осушенной части фильтра. Несовершенство наблюдательных скважин, если они расположены на расстояниях, примерно равных или превышающих мощность водоносного горизонта, очень незначительно и его можно не учитывать.

Приведенные выше формулы справедливы для неограниченных пластов с учетом вышеприведенных факторов, осложняющих интерпретацию опыта. Однако если расстояние от центральной до наблюдательных скважин меньше, чем расстояние до реки, эти формулы обеспечивают достаточную точность при определении k и для полуограниченных пластов. Если же расстояние до реки меньше, то для расчета k следует применять формулы Форхгеймера и Бабушкина, учитывающие влияние реки.

10.41. Рассмотрим способы определения коэффициента фильтрации (водопроводимости) по возмущающим скважинам.

Для совершенных по степени и характеру вскрытия водоносных горизонтов используются формулы Дюпюи:

напорные воды

$$k = 0{,}366Q \lg(R_n/r_c)/mS_0 ; \qquad (53)$$

безнапорные воды

$$k = 0{,}73Q \lg(R_n/r_c)/(2H - S_0)S_0 , \qquad (54)$$

где R_n – приведенный радиус влияния скважин, м. Для учета несовершенства по степени вскрытия используются формулы (53), (54) с поправками Веригина. В то же время, так как поправки на несовершенство скважин по степени вскрытия не учитывают дополнительных сопротивлений, связанных с характером вскрытия, расчеты по формулам (53), (54) дают в большинстве случаев (для пористых грунтов) заниженные результаты. Для трещиноватых и закарстованных пород, наоборот, возможно завышение km.

Размеры прискважинной зоны с измененными фильтрационными свойствами обычно относительно невелики и зависят в основном от литологического состава горных пород, а также от способа бурения и освоения скважины. Максимальная степень кольматации обычно отмечается при бурении с промывкой глинистым раствором. В песчаных породах раствор может проникать на расстояние до нескольких десятков сантиметров, в гравийно-галечниковых и трещиноватых породах – до нескольких десятков метров. Минимальная степень нарушения проницаемости пород прифильтровой зоны отмечается при ударно-канатном способе бурения, а также

при бурении с обратной промывкой. Чаще всего, в связи с относительно малыми размерами зоны нарушения естественной водопроницаемости (по сравнению с зоной опробования), влияние подобного нарушения может рассматриваться как эффект тонкого слоя (оболочки) фильтрационных пород, примыкающих к стенке скважины – "скин–эффект". Следует отметить, что сопротивления, связанные с характером вскрытия горизонта, могут быть определены только по данным кустовых откачек.

Оценка величины R_n производится по данным кустовой или одиночной откачки с учетом характера режима фильтрации в процессе опыта.

Усредненные значения R_n для различных водовмещающих пород требуют уточнения в каждом конкретном случае.

Расчеты водопроводимости по зависимостям установившейся фильтрации целесообразно выполнять по формулам [12]:

$$km = Aq; \tag{55}$$

$$kH = Aq/(1-S_0/2H_0), \tag{56}$$

где q – удельный дебит скважины; km и kH – соответственно коэффициенты водопроводимости напорного и безнапорного пласта; S_0 – понижение в центральной скважине; H_0 – мощность безнапорного горизонта; A – коэффициент.

Величину A для напорных горизонтов можно принимать равным 100–150, а для безнапорных горизонтов порядка 80–100, если удельный дебит измерять в литрах в 1 с, km – в м^2/сут. Минимальные значения A относятся к слабоводообильным отложениям, максимальные – к водообильным. В среднем для напорных горизонтов $A = 130$. Более надежно величина коэффициента A может быть определена по данным кустовых откачек при установлении корреляционной связи между значениями водопроводимости, рассчитанными по опытной и наблюдательной скважинам. Тогда эта величина будет включать в себя и среднее значение поправки на несовершенство скважины.

10.42. Наиболее целесообразным способом определения k (km) по данным опробования возмущающих скважин с использованием зависимостей неустановившейся фильтрации является временное прослеживание [12]. Как показывает практика пробных откачек, для них характерны нерегулярные изменения дебита, особенно при эрлифтном подъеме воды. Частые и незакономерные колебания дебита обусловливают рассеяние точек на графиках временного прослеживания понижения. Во многих случаях по рассеянным совокупностям точек на временных графиках бывает трудно судить об их форме, а тем более об их линейности. По этой причине рекомендуется пользоваться данными восстановления уровня.

10.43. Необходимо иметь ввиду, что оценка коэффициента водопроводимости горизонта по графикам $S'' - \lg t\{S'' - \lg[t/(t+t)]\}$ часто оказывается сопряженной со значительными ошибками. На графике восстановления довольно часто выделяются два сопрягающихся прямолинейных участка, первый из которых характеризуется уклоном, отвечающим проводимости горизонта в призабойной зоне, а второй – проводимости самого горизонта. Очень часто может оказаться, что изменения уровня в скважине, отвечающие второму участку, не удовлетворяют прямолинейной аппроксимации формулы Тейса ввиду влияния группы осложняющих факторов.

10.44. В качестве примера, иллюстрирующего ограниченные возможности оценки коэффициента водопроводимости по данным о восстановлении *уровня при одиночных откачках, приведем результаты кустовой откачки* продолжительностью 7 сут ($Q = \text{const}$) в безнапорном водоносном горизонте, приуроченном к среднезернистым пескам мощностью около 40 м [49]. Коэффициент водопроводимости надежно определен по наблюдательным скважинам ($kH = 750$ м^2/сут). На графике восстановления для центральной скважины диаметром 12″, пройденной вращательным способом с промывкой глинистым раствором, выделяют три прямолинейных участка.

Расчетные значения kH, полученные по уклонам разных участков, составляют $kH^1 = 90$ м^2/сут, $kH^2 = 800$ м^2/сут и $kH^3 = 3700$ м^2/сут. Величина kH^1, рассчитанная по участку I (для $t < 10$ мин), отражает влияние "скин-эффекта" и отвечает проводимости прифильтровой зоны скважины. Величина kH^2 примерно соответствует истинной проводимости пласта (участок от $t = 10$ мин до $t = 2$ ч). Наконец, значение kH^3 явно завышено, что обусловлено выполаживанием графика вследствие эффектов упругого гравитационного режима, а также влияние истории откачки. В частности, с учетом разницы в расчетных значениях a при откачке ($a = 10^4$ м/сут) и восстановления ($a = 10^5$ м^2/сут), верхний предел допустимости прямолинейной аппроксимации формулы Тейса по участку восстановления отвечает времени 0,1 сут.

Так как "скин-эффект" является не единственным фактором, влияющим на наклон графика прослеживания, а все эти факторы "включаются" и "выключаются" в разное время, то уверенное выделение расчетного прямолинейного участка всегда требует какой-то дополнительной информации. При одиночных откачках такая информация отсутствует.

10.45. По данным наблюдений за уровнем подземных вод могут быть определены гидрогеологические параметры $k, T, \mu, \Delta L$.

Постановка стационарных гидрогеологических наблюдений должна опираться на глубокое понимание природных условий, факторов формирования режима и баланса рассматриваемого подземного потока с учетом его границ.

Наблюдения ведутся в режимных скважинах, удаленных от внешних границ водоносного пласта (рек, водохранилищ, озер, каналов, водозаборов, дренажа и т.п.), где происходят резкие изменения напора, и находящихся вблизи таких границ.

10.46. В удалении от границ водоносных пластов колебание уровней подземных вод имеет циклический характер и обусловлено периодическими изменениями факторов, непосредственно влияющих на режим подземных вод (осадков, поверхностного стока, испарения, инфильтрации). Здесь колебания уровня вызываются преимущественно сезонными и многолетними модулями питания подземных вод [17].

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_r , \tag{57}$$

где ε_a – модуль атмосферного питания ($\varepsilon_a = \varepsilon_{инф} + \varepsilon_{кон} - \varepsilon_{исп} - \varepsilon_{тр}$); ε_r – модуль глубинного питания для безнапорного и напорного пластов

$$\varepsilon_r = k(H_п - h)/m_п ; \qquad \varepsilon_a \neq 0; \tag{58}$$

$$\varepsilon_r = k_к(H_к - h)/m_к + k_п(H_п - h)/m_п ; \quad \varepsilon_a = 0; \tag{59}$$

$\varepsilon_{инф}$, $\varepsilon_{кон}$ – скорости инфильтрации и конденсации атмосферных осадков, а также избыточных поливных, техногенных и других вод; $\varepsilon_{исп}$ – скорость испарения подземной воды с ее поверхности; $\varepsilon_{тр}$ – транспирация; h – напор в пласте; $k_к, m_к$ – коэффициенты фильтрации и мощность малопроницаемого слоя, залегающего в кровле пласта; $k_п$, $m_п$ – то же, для малопроницаемого слоя, залегающего в подошве пласта; $H_к$ и $H_п$ – напоры в соседних водоносных пластах, находящихся над кровлей и под подошвой пласта.

Для подземных вод со свободной поверхностью ε_r определяется перетеканием только через подошву пласта (58), а для напорных подземных вод – через подошву и кровлю пласта (59).

При малых различиях k и $k_к$, а также $k_п$, т.е. при $k/k_к$ и $k/k_п \leq 10$–20, разности напоров $H_к - h$ и $H_п - h$ изменяются мало и поэтому можно считать $\varepsilon_r = \text{const}$. При $k/k_к$ и $k/k_п > 20$ величины напоров $H_к$ и $H_п$ изменяются слабо, и тогда модуль ε_r линейно зависит от напора h.

10.47. Методика интерпретации данных наблюдений изложена в работах [10, 17, 25, 31, 44, 48, 54, 83, 84]. Для связи с методикой интерпретации важно соблюдение принципа [83] методической обоснованности наблюдений, согласно которому структура наблюдательной сети должна

задаваться в соответствии с требованиями соответствия методики интерпретации данных наблюдений.

Следует подчеркнуть необходимость внимательного учета структуры потока при постановке и анализе материалов наблюдений, особенно потому, что это требование нередко нарушается. В частности, обычно рекомендуется [48, 54, 58] и широко практикуется использование данных режимных наблюдений по створу наблюдательных скважин, располагаемых по направлению потока. Вместе с тем анализ натурных материалов показывает, что такое упрощенное представление о структуре потока часто приводит к неправильным результатам при интерпретации режимных данных. Поэтому створный принцип построения наблюдательной сети ни в коем случае не следует рассматривать как универсальный и его применение требует обстоятельного обоснования на ключевых участках с площадным расположением скважин [83].

При постановке наблюдений вблизи несовершенных (не полностью врезанных) водотоков следует учитывать зону резкой вертикальной деформации потока, которая образуется под водотоком и захватывает некоторую область потока вблизи водотока. Для изучения планового потока необходимо размещать наблюдательную сеть скважин за пределами зоны вертикальной деформации потока, размеры которой следует предварительно оценивать моделированием, а затем проверять этажными замерами напоров в натуре на обоснованных моделированием ключевых участках. При использовании этажных пьезометров для наблюдения за процессами перетекания требует проверки предпосылка о вертикальном направлении потока а покровных и разделяющих пластах. Проявление вертикального перетекания обусловливает различие между понижениями уровня свободной поверхности и напора в нижнем пласте.

Приведенные соображения приводят к выводу, что в большинстве случаев организацию ключевых участков с более подробной расстановкой пунктов режимной сети можно рассматривать, как обязательное условие достоверности наблюдений.

Методически обоснованная сеть должна по своей структуре соответствовать определенной методике обработки материалов. В частности, для применения конечно-разностных уравнений в плановом потоке для учета изменчивости проводимости необходимо располагать минимум пять скважин по схеме "креста", причем расположение наблюдательных скважин принимается таким, чтобы направление изменения проводимости совпадало с направлением одного из створов (ось X или ось Y). Вместе с тем, при расчетах с применением моделирования это требование не обязательно, а расположение пьезометров должно соответствовать элементам неоднородности потока и зонам наибольшей чувствительности гидродинамического режима к определяемым параметрам. В другом случае, например, для определения параметра ΔL крупной реки или водохранилища по конечно-разностным уравнениям, участок наблюдений должен состоять, как минимум из четырех наблюдательных скважин, располагаемых по схеме "полукреста" (рис. 35). Обычно для таких расчетов используются данные по створу, проходящему по нормали к водотоку. Однако расчеты по одному створу обязательно требуют обоснования, поскольку, как показывает опыт наблюдений, вблизи водотоков поток может существенно деформироваться в плане. При изучении режима подземных вод вблизи водотоков необходимо получать возможно большую информацию о режиме и балансе водотоков, причем особенно важно получать представление о расходах потока, например, с применением гидрометрических замеров на водотоках.

10.48. Для рационального проведения наблюдений существенным представляется также соблюдение принципа неравномерности наблюдений [83], который исходит из условия целесообразности их размещения и выбора времени наблюдений, отвечающих требованию наиболее рельефного влияния искомых геофильтрационных параметров. Исходя их этого положения можно утверждать, что рациональными являются наблюдения неравномерные как в пространстве, так и во времени.

Рис. 35. Расположение наблюдательных скважин по схеме "полукрест"

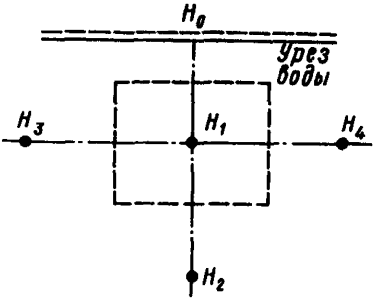


Таблица 35. Выбор типа решения для расчета параметров по данным стационарных наблюдений

Используемые решения	Строение потока	Расположение скважин
Аналитические	Плановый одномерный	По створу вдоль потока локальное упорядоченное ("крест")
Конечно-разностные уравнения	Плановый неоднородный	
"Унифицированных алгоритмов" и аппроксимационное	Плановый однородный	Локальное неупорядоченное
Моделирование	Плановый и профильный, неоднородный	Неупорядоченно разбросанное по области потока

Рекомендуемые решения изложены в работах [16, 51, 83].

Применительно к пространственной постановке наблюдений этот принцип заключается в обоснованной неравномерности распределения наблюдательной сети по изучаемой области с сосредоточением ее на ключевых участках, на которых поток изучается значительно более подробно с проверкой всех принимаемых допущений о его формировании (например, возможность принятия предпосылок о плановом или линейном характере потока).

Принцип неравномерного проведения наблюдений во времени требует детализации наблюдений в выделяемые наиболее характерные периоды водного режима (например, при колебаниях уровней в водотоке, начале поливов).

При выборе типа решения, используемого для интерпретации наблюдений, рекомендуется пользоваться табл. 35 [83].

О выборе расчетных значений гидрогеологических параметров

10.49. Различные категории фильтрационной неоднородности требуют различных способов ее учета в прогнозных расчетах, исходя из тесной связи с конкретной прогнозной задачей (см. разд. 4) и при обработке опытных данных для определения локальных параметров.

Неоднородность низшего порядка учитывается граничными условиями и имеет закономерную (трэнд) составляющую. Эффективная неоднородность учитывается эффективными параметрами.

10.50. Существует два способа получения эффективных параметров. Первым способом эффективный параметр выражается мерой среднего по выборке из частных значений одиночных опытов, определяемых по относительно равномерной сети скважин, размещенных в исследуемой фильтрационной области.

Одним из существенных моментов при использовании статистических методов для описания фильтрационной неоднородности является выявление закона распределения. Для этого требуется значительное число единичных замеров, обычно большее, чем для определения математического ожидания или дисперсии с принятой на практике точностью [19]. Поэтому объем кустовых откачек, как правило, не дает основания для выявления закона распределения и различные эмпирические обобщения базируются главным образом на одиночных экспериментах.

Например, многими исследователями показано, что фактическое распределение показателей проницаемости чаще всего не противоречит логнормальному закону [12, 56]. Обращает на себя внимание тот факт, что фильтрационные параметры, определенные по данным кустовых откачек, в отличие от одиночных, часто подчиняются нормальному закону; вероятнее всего, это связано с разницей масштабов опробования [61].

Влияние масштаба опробования находит свое отражение и в показателях степени неоднородности – среднеквадратическом отклонении или коэффициенте вариации. Замечено, например, что дисперсия проводимости по кустовым откачкам часто существенно меньше, чем по одиночным [4, 61].

На практике одиночные значения для каждой выборки получают по одиночным кратковременным возмущениям. Для этих целей обычно используются такие статистические показатели, как среднеквадратичное отклонение логарифмов водопроводимости $\sigma_{\lg T}$ и коэффициент вариации W. Характерные значения $\sigma_{\lg T}$ для различных типов горных пород приведены в табл. 36 [12].

Из таблицы видно, что пространственная изменчивость параметров k или T даже в пределах одного комплекса может быть весьма существенной, достигая нескольких порядков. Характерно, что для сходных литологических комплексов в близких условиях залегания степень изменчивости обычно растет с уменьшением абсолютных значений водопроводимости.

Изменчивость емкостных свойств, которая в целом оказывается менее резкой, заметно различается для безнапорных и напорных пластов. Гравитационная водоотдача, которая обычно определяется изменением литологии и механического состава покровных отложений, характеризуется относительно большим разбросом значений, лежащих, как правило, в пределах одного порядка.

Классификация неоднородности дана в таблице 37 [12].

Вследствие неизбежных погрешностей, возникающих при одиночном опробовании, статистическая оценка среднего оказывается смещенной, т.е. получаем приближенное значение эффективного параметра [12]. В работе [49] указано, что применение статистических методов осреднения локальных параметров возможно только с учетом следующих ограничений: должна быть проверена и доказана случайность и независимость локальных определений; необходимо убедиться в выполнении условия равномасштабности и равноточности единичных определений, в которых должны также отсутствовать серьезные систематические ошибки; должна быть оценена представительность выборки. Кроме того, использование стандартного статистического анализа результатов ОФР ограничивается, вероятно, лишь задачей ориентировочного сравнения отдельных водоносных горизонтов по степени их фильтрационной неоднородности, чаще всего изменчивости проводимости или удельного дебита.

Второй способ – способ относительно длительных кустовых откачек, обеспечивающий в продолжение опыта представительный набор элементов эффективной неоднородности, выражающийся в обобщенной закономерности изменения уровня. Несмотря на то что опытные откачки охватывают сравнительно небольшой участок водоносного горизонта, получаемые в условиях эффективной неоднородности параметры можно квалифицировать как эффективные и экстраполировать в качестве расчетных на всю область эксплуатационного возмущения независимо от ее размеров и степени неоднородности.

Таблица 36. Связь σ_{lgT} с типом коллектора

Литологический состав	Преобладающее значение σ_{lgT}
Аллювиальные пески	0,05–0,2
Меловые пески и слабые песчаники	0,2–0,4
Трещинные и трещинно-карстовые карбонатные коллекторы	0,2–0,8
Гравийно-галечниковые отложения	0,2–0,4
Трещинные некарбонатные коллекторы	0,4–1,3

Таблица 37

Степень неоднородности	σ_{lgT}	W, %
Однородные	<0,2	<40
Неоднородные	0,2–0,4	40–80
Весьма неоднородные	0,4–0,75	80–150
Крайне неоднородные	>0,75	>150

При надежной интерпретации результаты кустовых опытов в пластах с эффективной неоднородностью оказываются настолько близкими, что каждый из них может быть принят в качестве эффективного параметра, а необходимость в осреднении практически отпадает. Однако использование этого способа определения параметров возможно при заведомо известном эффективном типе неоднородности.

Как показывает анализ данных опытных откачек и результаты моделирования [12], в конкретных условиях вполне реальными являются случаи, когда даже при длительном возмущении размеры элементов неоднородности соизмеримы с размерами области возмущения. Особенно это характерно для безнапорных горизонтов. В этих случаях параметры, определяемые по графикам $S-\lg T$ и $S-\lg r$, уже не являются эффективными и их нельзя распространять на всю область в качестве расчетных параметров при составлении окончательной геофильтрационной схемы прогноза. Таким образом, для второго способа оценки локальных значений параметров следует иметь в виду, что при достаточно больших масштабах возмущения наклон графиков $S-\lg t$ определяется средней величиной водопроводимости пласта (т.е. величиной, отвечающей математическому ожиданию для конкретного закона распределения водопроводимости). Отсюда возникает ряд важных ограничений, недоучет которых затрудняет или исключает достоверность оценки влияния эффективной неоднородности второго порядка на результаты опытных откачек [49]: среда должна быть случайно неоднородной, причем размеры элементов неоднородности должны быть во много раз меньше размеров области эффективного влияния откачки (а также размеров области между опытной скважиной и границами пласта); осреднение должно проводиться в соответствии с определенным законом распределения; допустимость осреднения доказана лишь с точки зрения влияния неоднородности по водопроводимости на наклон графика $S-\lg t$ при откачке (через какое-то время после начала опыта график можно использовать для определения коэффициента водопроводимости, не обращая внимания на действительное ее распределение в пределах зоны влияния).

11. ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННЫХ ФЕКТОРОВ ПОДТОПЛЕНИЯ

11.1. Данные по обследованию и сбору материалов по техногенным фактором (см. табл. 2), вынесенные на техногенные карты, позволяют оценить объем воды, подаваемой (отводимой) на единицу площади поверхности земли или различные глубины зоны аэрации (в зависимости от глубины застройки или в отдельную точку территории. Определенная часть объема подаваемой (отводимой) воды поступает через зону аэрации на уровень грунтовых вод. Минимальный объем воды, поступающий в зону аэрации, может быть оценен по нормативным утечкам; условно осредненный – по различным классификационным таблицам, приведенным в работах [2, 5, 63], и в настоящих Рекомендациях.

11.2. В общем случае интенсивность (расход) инфильтрационного питания грунтовых вод $Q_{\text{инф.п.}}$ или величину водообмена между зоной аэрации и грунтовыми водами можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{инф. п}} = WF, \tag{60}$$

где W – инфильтрация воды (техногенные воды, атмосферные осадки, конденсация) на единицу площади зеркала водоносного горизонта в единицу времени; F – площадь области питания.

11.3. Количество поступающей воды на уровень грунтовых вод интегрально отражается в колебаниях уровня грунтовых вод. Поэтому количественная оценка $Q_{\text{инф.п.}}$ на городской территории может быть выполнена только по данным стационарных гидрогеологических наблюдений на пунктах режимной сети.

11.4. Определение величины W производится в лизиметрах [24, 43, 44, 54]. Однако распространение лизиметрических наблюдений на всю область питания может быть сделано довольно условно, так как поглощение воды, поступающей на поверхность или непосредственно в зону аэрации, зависит от целого ряда факторов: микрорельефа, характера почвенного покрова или плотности закрытия территории, растительности, распределения в плане техногенных источников питания, геолого-литологического состава грунтов зоны аэрации и глубины залегания уровня грунтовых вод.

Длительность лизиметрических наблюдений не укладывается в обычные сроки изысканий, между тем только многолетние (3–5 лет) наблюдения, проведенные при этом в различных геоморфологических, гидрогеологических геоботанических условиях, могут дать более или менее надежные результаты. Но так как постоянно действующие комплексные режимные сети на городских территориях в настоящее время нигде не организованы, в качестве основных методов определения W рекомендуются методы, основанные на интерпретации данных режимных наблюдений в скважинах. Безусловно, что при длительных гидрогеологических изысканиях (2–3 года) или при организации постоянно действующей режимной сети необходимо предусматривать в составе режимной сети балансовые участки, оборудованные лизиметрами.

11.5. В существующей литературе предлагается определять W тремя основными методами:

водно-балансовыми расчетами [25, 42–44, 62];

аналитическими методами по данным режимных наблюдений [25, 31, 42–44, 51, 54, 62, 84];

методами моделирования, реализуемыми на АВМ И ЭВМ [21, 46, 51, 65, 84].

11.6. Определение W водно-балансовыми расчетами сводится к решению уравнения (11) для элементов потока в пределах гидрогеологического подучастка относительно средней за время Δt величины интенсивности питания грунтовых вод сверху при известных изменениях уровня ΔH.

Величины притока Q_1 и оттока Q_2 должны быть отнесены к соответствующим элементам. Приток и отток принимаются средними на границах элементов потока за выбранный промежуток времени Δt.

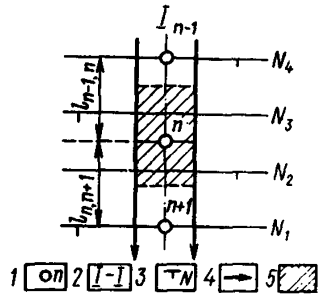


Рис. 36. Створ наблюдательных скважин при плоском (одномерном) потоке грунтовых вод
1 – наблюдательная скважина и ее номер; *2* – створ наблюдательных скважин; *3* – гидроизогипсы; *4* – линии тока; *5* – элемент грунтового потока

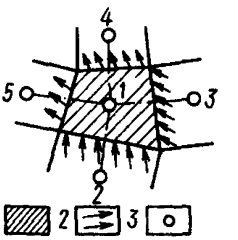


Рис. 37. Элемент грунтового потока при произвольном расположении наблюдательных скважин
1 – элемент потока; *2* – линии тока; *3* – скважина

Для определения W в качестве расчетных выбирают створы наблюдательных скважин, которые совпадают с направлением движения потока грунтовых вод (рис. 36). Между крайними скважинами $n-1$, $n+1$ (где $n-1$, $n+1$ номера сечений или скважин, считая их вниз по потоку) выделяют расчетные элементы потока, которые с боков ограничиваются средними плоскостями при плоском потоке и средними поверхностями, нормальными к водоупору, при неплоском движении.

Часто на застроенных подтапливаемых территориях поверхность грунтовых вод имеет сложную форму. В плане движения вод характеризуется не выдержанными по простиранию и не устойчивыми во времени направлениями, что не позволяет считать поток плоским. Линии тока в пространстве образуют сложные поверхности. Для этого более общего случая предлагается следующая схема расположения скважин (рис. 37). Балансовое уравнение для данного элемента потока приведено в работе [43].

Перед расчетом W необходимо фактический график колебания уровня по средней скважине разбить на ряд периодов с различными Δt. Выбор интервалов производится так, чтобы в пределах каждого из них наблюдался более или менее равномерный подъем (спад) уровня. Необходимо сопоставлять между собой графики колебания уровня по всем расчетным скважинам в пределах гидрогеологического подучастка, выделенного в результате районирования по режиму грунтовых вод с учетом установленных закономерностей сезонных колебаний уровня при естественном и естественно-техногенном режимах. При техногенном режиме на графиках подъема уровня грунтовых вод (при подтоплении) выделяются участки с различной интенсивностью подъема уровня.

Обычно для оценки техногенного инфильтрационного питания выбираются периоды весеннего, зимнего или осеннего минимумов, когда влияние атмосферных осадков, конденсации и испарения невелико. В пределах таких периодов по всем скважинам выбираются интервалы, наиболее часто встречающиеся в одни и те же календарные сроки. Длина расчетного интервала может приниматься от нескольких до 30 суток.

11.7. Методика определения W по водно-балансовым расчетам дана в работах [43, 62] для следующих расчетных схем: одномерный (профильный) поток, однородный в плане; двумерный в плане поток; двухслойный пласт (в верхнем слое, сложенном слабопроницаемыми грунтами, движение воды принимается вертикальным, в нижнем проницаемом слое – горизонтальным); пласт ограниченной или неограниченной мощности.

11.8. Для условий установившегося движения потока грунтовых вод, если известны уровни воды в трех скважинах, расположенных по потоку,

величина инфильтрационного питания определяется по формуле для однородного пласта

$$W=\frac{k}{L-x}\left(\frac{h_2^2-h_1^2}{x}-\frac{h_3^2-h_2^2}{L}\right), \qquad (61)$$

где k – коэффициент фильтрации; L – длина створа между крайними скважинами; x – расстояние между скважинами 1 и 2; h_1, h_2, h_3 – мощности потока грунтовых вод.

Если скважины расположены на равных расстояниях, т.е. $x=L/2$, то

$$Wx=k\frac{h_2^2-h_1^2}{2x}-k\frac{h_3^2-h_2^2}{2x}. \qquad (62)$$

Левая часть уравнения (62) выражает количество воды, поступающей в единицу времени путем инфильтрации на поверхность грунтовых вод. Правая часть – это разность оттока и притока к элементу потока.

Для неоднородности пласта формула (62) записывается следующим образом:

$$Wx=k_1\frac{h_2^2-h_1^2}{2x}-k_2\frac{h_3^2-h_2^2}{2x}. \qquad (63)$$

Величина инфильтрации, если ее определять по формуле (63), пропорциональна разности расходов, поэтому для ее расчета требуется весьма высокая точность определения коэффициентов фильтрации, что в условиях плановой неоднородности не всегда возможно.

11.9. Наблюдения за режимом грунтовых вод позволяют применять для расчета W формулы неустановившегося движения в конечных разностях. В этом случае возможная ошибка от незнания или недостаточно точного учета неоднородности пласта менее существенна. Величина W определяется по формуле

$$W=\frac{\mu\Delta H}{\Delta t}-\frac{k}{2\Delta x^2}\left(h_1^2+h_3^2-2h_2^2\right), \qquad (64)$$

где ΔH – изменение уровня, происходящее за отрезок времени Δt; Δx – расстояния между сечениями 1–2 и 2–3.

Для неоднородного пласта

$$W=\frac{\mu\Delta H}{\Delta t}+\frac{1}{\Delta x}\left(k_1\frac{h_2^2-h_1^2}{2\Delta x}-k_2\frac{h_3^2-h_2^2}{2\Delta x}\right). \qquad (65)$$

Выражение в скобках представляет собой разность расходов воды, оттекающей от элемента потока и притекающей к нему. В отличие от формулы установившегося движения, эта разность при неустановившемся движении входит в формулу не множителем, а слагаемым. Абсолютное значение первого слагаемого в формуле (65) в периоды резкого повышения уровня грунтовых вод значительно больше, чем второго. Поэтому неточность определения коэффициентов фильтрации пласта в этих условиях влияет меньше на определяемую величину W. Основное значение имеет точность определения водоотдачи. С уменьшением μ уменьшается и абсолютная погрешность W, причем часть этой погрешности, обусловленная неточностью водоотдачи или недостатка насыщения, в 4–20 раз выше другой части погрешности, которая возникает в результате ошибки замера уровня грунтовых вод [43].

При отсутствии разности между притоком и оттоком грунтовых вод, когда величина питания их сверху выражается величиной $\mu\Delta H/\Delta t$, относительная погрешность $\Delta W\Delta H/\mu\Delta H$ расчетной величины питания резко уменьшается с увеличением μ. Эта погрешность максимальная при минимальном значении μ и минимальная при высоких μ. При $\mu=0{,}25$ и $0{,}15$ относительная погрешность величины W, выраженная $\Delta W\Delta t/\mu\Delta H$, находится в пределах 5–8%.

В работе [62] дана методика расчета W по данным режимных наблюдений при неустановившемся режиме фильтрации на примере промышлен-

ных площадок удлиненных, прямоугольных и круглых в плане форм в однородных, неограниченных в плане водоносных пластах.

11.10. Моделирование инфильтрационного питания на АВМ осуществляется подачей соответствующей силы тока на поверхность грунтовых вод. Методика моделирования на сплошных и сеточных моделях дана в работах [21, 46, 47, 84].

При задании инфильтрации интенсивностью W на сеточных моделях плановых потоков в каждом блоке площадью F (при прямоугольной разбивке $F = \Delta x \cdot \Delta y$) должен моделироваться инфильтрационный поток заданием соответствующей силы тока в соответствующую узловую точку. Анализ погрешностей дискретного задания инфильтрации показывает, что при допустимой погрешности $\delta_W = 1-3\%$ достаточно между границей и сечением максимальных напоров задавать 3–4 узловые точки. Задание тока может осуществляться через инфильтрационное сопротивление.

11.11. В тех случаях, когда моделируется наложение влияния техногенных факторов (водохранилищ, каналов, дренажей) на естественный поток, а интенсивность W остается такой же, как и в естественных условиях, эффективным приемом учета инфильтрации является использование принципа сложения течений (суперпозиции). На основании принципа суперпозиции решение инфильтрационной задачи можно представить в виде [46]

$$H = H_W + \Delta H, \qquad (66)$$

где H_W – решение инфильтрационной задачи (для заданного W при любых граничных условиях); ΔH – решение плановой задачи без инфильтрации при граничных условиях, определяемых их разностью для H и H_W.

Такой прием применим только в тех случаях, когда дифференциальные уравнения можно считать линейными, т.е. для потока постоянной проводимости, однородного на горизонтальном водоупоре (схема Дюпюи) и горизонтально-слоистого (схема Гиринского).

11.12. При идентификационных исследованиях, в случае неизменного инфильтрационного питания в качестве H_W целесообразно принимать напоры естественного потока. В такой постановке результирующий поток получается путем наложения на естественный дополнительного потока, возникающего за счет влияния техногенных факторов; при этом дополнительный поток моделируется без учета инфильтрационного питания, которое автоматически учитывается уровнями естественного потока. В частности, для потока постоянной проводимости напора результирующего H находят сумму напоров естественного H_e и дополнительного ΔH потоков, а напоры на границах дополнительного потока – как разность напоров H и H_a на этих границах, причем формы границ принимаются такими, какими они оказываются в условиях результирующего потока. Следует иметь в виду, что применение метода сложения течений не исключает необходимости учета фильтрационной неоднородности в плане.

11.13. Принципиальная сложность определения W в плановом стационарном потоке заключается в том, что параметры W и T действуют совместно. Достоверные представления о поле проводимости, как правило, получаются только при практическом отсутствии площадного питания в пределах рассматриваемой области потока. Способы решения такой задачи основываются на анализе градиентов потока по линиям тока.

В этом случае принципиально можно найти только распределение относительной проводимости вдоль каждой ленты тока, поскольку изменения абсолютных значений проводимости по любой ленте тока не влияют на распределение потенциалов. Следовательно, для решения такой задачи необходимо иметь достаточно представительный материал режимных наблюдений за распределением поля напоров в исследуемом потоке, чтобы на его основании можно было построить гидродинамическую сетку. Особенно эффективным может быть решение такой обратной задачи при наличии данных о расходах потока подземных вод по данным гидрологических работ в пределах балансового элемента.

11.14. При изучении режима грунтовых вод широкое распространение имеют обратные задачи по оценке [46], причем наиболее реальным яв-

ляется решение задач при заданном заранее поле проводимости пласта, которое устанавливается по данным опытно-фильтрационных работ, распространяемых по площади потока в соответствии с представлениями о литологическом строении водоносного пласта.

В такой постановке поле потока заранее известно, и на его электрической модели остается подобрать такое площадное распределение силы тока, которое обеспечивало бы наилучшее согласование потенциалов модельного потока с уровнями воды в наблюдательных скважинах. Площадное задание силы тока осуществляется при этом дискретно – по сетке.

При построении такой модели целесообразно исключать из нее границы, проходящие по рекам, каналам и озерам и прочим водоемам, поскольку на этих границах поток может быть существенно искажен за счет влияния сопротивления ложа водоема. В связи с этим на таких границах должно быть задано распределение уровня грунтовых вод в соответствии с данными режимных наблюдений.

После построения модели следует задаться максимальными и минимальными значениями напора H_{max} и H_{min} и подсчитать значения относительных потенциалов U в контрольных точках, соответствующих месту расположения наблюдательных скважин с напором H. Далее задача сводится к тому, чтобы, варьируя значениями потенциалов U_W, подаваемых на сопротивления R_W, подобрать такую комбинацию, при которой расчетные значения потенциалов в контрольных точках совпадут с замеренными на модели.

Для подбора значений W можно также использовать способ единичных функций [46].

11.15. Решение идентификационных задач на ЭВМ по определению инфильтрационного питания ведется в постановке воспроизведения стационарного и нестационарного режимов фильтрации грунтовых вод [66, 72].

Путем воспроизведения стационарного режима уточняются величины утечек, формирующихся техногенными факторами, а также kH, B, A_0. Решение осуществляется в четыре этапа.

На I этапе подбираются параметры, при работе с которыми гарантируется точность решения и скорость сходимости. Решение ведется в многовариантном воспроизведении стационарного режима фильтрации при различных значениях критерия остановки итерационного процесса ε и итерационного параметра $\tau_{опт}$ [72].

На II этапе осуществляется фрагментирование исследуемой области фильтрации в соответствии с характером отклонения природной поверхности уровней грунтовых вод от модельной, полученной в результате воспроизведения стационарного режима фильтрации при исходных значениях всех расчетных параметров и граничных условий (в том числе техногенных факторов – внутренних источников возмущения).

Выделенные фрагменты необходимы для проведения факторно-диапазонного анализа на основе исследования функций влияния от изменения каждого расчетного параметра и всех видов граничных условий, представленных в виде имитационной модели рассматриваемого геофильтрационного процесса.

На III этапе осуществляется факторно-диапазонный анализ по оценке влияния на изменение уровенной поверхности грунтовых вод различных значений величины утечек из водонесущих коммуникаций, B, A_0 и других. При построении на ЭВМ имитационных моделей соответствующих геофильтрационных процессов для возможности оперативного задания варьируемых значений по каждому фактору внутри фрагментов выделяются зоны, к которым приурочены участки со сравнительно однородными по своей величине значениями соответствующих факторов (характеристик). Величины варьируемых значений, по которым строятся имитационные модели, должны быть рассмотрены в возможных пределах их изменений при различном сочетании внутренних и внешних граничных условий. В результате решения получаем представление о степени влияния в отдельности каждого из расчетных параметров и граничных условий в пределах их экстремальных значений на величину изменения уровенной поверхности

грунтовых вод, а также о размерах областей, внутри которых распространяется влияние оцениваемого фактора.

На IУ этапе на ЭВМ осуществляется совместная корректировка параметров, величин утечек и других типов граничных условий. Корректировка ведется одновременным изменением характеристик по всей моделируемой области фильтрации в соответствии с результатами построения для каждого фрагмента имитационной модели геофильтрационного процесса, обусловленного диапазоном изменения соответствующего фактора (расчетного параметра и граничного условия). Корректировка факторов заканчивается при достижении заданного критерия совпадения модельных и натурных значений уровней грунтовых вод, а также при получении поточечного баланса с минимальной погрешностью. Критерий может контролироваться как по всем блокам сеточной модели, так и по наблюдательным скважинам в данной области. Обычно в качестве критерия оценки точности полученного на ЭВМ решения принимается величина расхождения между модельными и природными отметками уровней грунтовых вод, равная 1–5% от разности экстремальных значений последних.

11.16. В качестве примера рассмотрим схему решения задачи по оценке величины инфильтрационного питания за счет техногенных факторов на городской территории площадью 40 км^2 (см. рис. 3).

В результате выполненной дискретизации составлена плановая сеточная модель области фильтрации, состоящая из 2148 блоков. Минимальный размер ячейки сетки по горизонтали – 60 м, по вертикали – 40 м. Максимальный размер ячейки по горизонтали – 250 м, по вертикали – 160 м. Число блоков, моделирующих ГУ-I рода – 88, ГУ-II рода – 2083, из них: утечки из водонесущих коммуникаций и на промплощадках – 710; инфильтрация атмосферных осадков ("незакрытые" территории) – 470; испарение ("незакрытые" территории – 903); ГУ-III – 241.

На I этапе идентификационных исследованиий на ЭВМ ЕС-1022 многократно воспроизведен стационарный режим фильтрации со значениями коэффициента ε –0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01 и ускоряющего параметра τ –1,5; 1,6; 1,68; 1,7; 1,72; 1,74; 1,8. В результате были выбраны значения ε=0,02 и τ=1,7.

На II этапе выделено пять фрагментов А,В,С,Д и Е. Критерии выделения фрагментов при воспроизведении стационарного режима фильтрации (внешние границы – ГУ-I рода): характер отклонения (+ или –) фактической уровенной поверхности грунтовых вод от модельной; характер застройки (селитебная, промышленная, незастроенные территории); плотность каналов и водоемов (внутренние граничные условия – ГУ-I рода).

На III этапе для фрагментов выполнен факторно-диапазонный анализ по оценке влияния расчетных параметров и граничных условий на изменение уровенной поверхности грунтовых вод. Построены имитационные модели идентификации величин утечек, коэффициентов перетока, фильтрационных проводимостей подрусловых отложений поверхностных водотоков и водоемов, водопроводимостей первого от поверхности двуслойного водоносного горизонта. Имитационные модели содержат в каждом блоке сеточной модели величины отклонений фактических уровней от модельных, полученных путем пофрагментного воспроизведения на ЭВМ соответствующего геофильтрационного процесса в стационарной постановке.

При идентифицировании величин утечек выделено 119 зон. Построение имитационной модели выполнено последовательным воспроизведением стационарного процесса в следующих условиях:

ГУ-I на внешних и внутренних границах при задании варьируемых величин утечек: раздельно в каждой зоне фрагмента А,В,С,Г,Д,Е; совместно во все фрагменты;

ГУ-II (Q=0) на непроницаемых внешних боковых границах, проведенных по нормали к потоку грунтовых вод и ГУ-I на остальных границах раздельно по фрагментам А, В, С, Д, Е;

ГУ-I на внешних границах и изоляция каналов при задании варьируемых утечек раздельно и совместно по фрагментам;

непроницаемые внешние боковые границы и изоляция каналов при задании варьируемых утечек раздельно и совместно по фрагментам.

Задаваемые в блоках модели величины утечек изменялись:

при воспроизведении стационарных процессов раздельно в каждой зоне фрагмента А и совместно во всех зонах этого фрагмента от 5-кратного до 500-кратного увеличения их исходных значений (от 0,1 м^3/сут до 50 м^3/сут);

при воспроизведении геофильтрационных процессов раздельно в каждом фрагменте А,В,С,Е от полного исключения утечек (фрагмент В) до 100-, 200- 500- и 1000-кратного увеличения их исходных значений (от 0,1 м^3/сут до 100 м^3/сут) в остальных фрагментах, а во фрагменте Д от нормативных утечек до 20%-ных от водоподачи;

при воспроизведении геофильтрационных процессов совместно во всех фрагментах в соответствии с вышеприведенными градациями для фрагментов А,В,С,Д,Е.

Построенная таким образом имитационная модель идентификации утечек представлена в виде атласа, состоящего из 54 карт величин отклонений замеренных отметок уровней грунтовых вод от модельных.

Анализ этих данных позволил: обосновать возможность пофрагментной идентификации величин утечек; оценить чувствительность области к инфильтрационному питанию; принять в блоках селитебной застройки утечки в размере до 10 м^3/сут (в зависимости от размера блока), а на территориях промплощадок – до 15% от водоподачи.

На IV этапе осуществлена совместная корректировка величин утечек, фильтрационных проводимостей подрусловых отложений и водопроводимостей в соответствии с данными, приведенными в имитационных моделях их идентификации. При этом было выполнено 62 варианта воспроизведения с различными величинами корректируемых параметров. В результате расхождения между фактическими и модельными уровнями грунтовых вод составили не более 5%, а погрешности поточечного баланса –0.

В качестве эталонных величин были сохранены значения параметров, рассчитанные по данным ОФР.

11.17. При воспроизведении на ЭВМ нестационарного режима фильтрации грунтовых вод уточняются параметры и граничные условия, определяющие развитие исследуемого фильтрационного процесса во времени. К таким параметрам относятся μ, μ^*; инфильтрация атмосферных осадков (при определенных условиях инфильтрационное питание, определяемое техногенными факторами) и испарение с уровня грунтовых вод.

На I этапе устанавливается эпигнозный период, т.е. такой временной интервал, в течение которого воспроизводится наблюдаемый фильтрационный процесс. В динамике формирования уровенного режима в эпигнозный период необходимо участие наряду с параметрами водоносного пласта всех видов внутренних и внешних граничных условий. Внутренние граничные условия: уровенный режим поверхностных водотоков и водоемов (искусственных и естественных), инфильтрация и испарение. Необходимо в пределах эпигнозного периода выделение интервалов времени с самостоятельным независимым влиянием на уровенный режим подземных вод каждого вида граничного условия. Поэтому обычно продолжительность такого периода принимается равным одному году.

На II этапе выбираются наиболее экономичная вычислительная схема и временной шаг. Подбор ведется путем многовариантного воспроизведения на ЭВМ нестационарного режима фильтрации в течение эпигнозного периода по всем запрограммированным вычислительным схемам с различными временными шагами счета и параметром ε.

На III этапе исследуемая область фильтрации районируется на зоны независимого влияния искомых параметров и граничных условий. Районирование выполняется в следующей последовательности. Вначале выделяются зоны относительно определяющего фактора с учетом его площадного размещения или приуроченности к тем или иным природным и техногенным условиям рассматриваемой территории. Затем путем многократного воспроизведения на ЭВМ нестационарного режима при задании различных

значений определяющего фактора последовательно в каждой зоне, сопутствующего фактора во всей области, уточняются границы зон.

На IV этапе осуществляется факторно-диапазонный анализ для выделенных зон. Функции влияния представляются в виде имитационных моделей. Диапазон варьируемых значений должен охватывать реально возможные величины оцениваемых факторов при различных видах внешних плановых границ. В результате получаем позонную оценку степени раздельного влияния водоотдачи, инфильтрационного питания и испарения, а также их совместного влияния на формирование уровенной поверхности грунтовых вод.

На V этапе осуществляется совместная корректировка параметров, аналогично этапу IV, при решениях для стационарной фильтрации. Натурные амплитуды изменения уровня грунтовых вод осредняются в течение времени Δt в соответствии со ступенчатой аппроксимацией непрерывной функции изменения граничных условий, заданных на ЭВМ.

12. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЮ СТАЦИОНАРНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ

12.1. Основные задачи наблюдений следующие:

изучение режима грунтовых вод (уровень, температура, химический состав) в естественных и нарушенных условиях. В случае, если установлена или предполагается взаимосвязь грунтовых вод с подземными водами нижележащих водоносных горизонтов, наблюдения должны выполняться за подземными водами этих горизонтов. Химический состав подземных вод должен оцениваться не только по стандартным показателям, но также и по специфическим компонентам для различных отраслей промышленности [70];

изучение взаимосвязи грунтовых вод с поверхностными водами;

изучение баланса грунтовых вод в естественных и нарушенных условиях.

Решение двух первых задач осуществляется путем стандартных наблюдений по сети режимных скважин (одиночные наблюдательные скважины, многоярусные кусты скважин) и на гидрометрических постах, организованных на поверхностных водотоках и водоемах.

12.2. Основным методом исследования баланса является комплексный метод, включающий водно-балансовые и гидродинамические исследования для всех водно-балансовых участков, выделяемых в пределах исследуемой территории на основании районирования водосборного бассейна (см. п. 5.3) и районирования территории по режиму грунтовых вод (см. разд. 8).

Методика оценки метеорологических факторов для поверхностей стоковых участков или поверхности всего водосборного бассейна в естественных условиях и на городской территории дана в разд. 5, 6 и 9.

12.3. Элементы водного баланса для II (зона аэрации) и III (водоносный горизонт) ярусов стоковых участков в пределах выделенных водно-балансовых участков должны быть определены тремя методами:

экспериментальными наблюдениями за водообменом грунтовых вод с зоной аэрации: на приборах, установках различных типов и конструкций, устанавливаемых на поверхности земли, в шурфах и наблюдательных скважинах режимной сети;

гидродинамическими расчетами по данным опытно-фильтрационных работ и режима уровня подземных вод в наблюдательных скважинах режимной сети;

решением идентификационных задач методами математического моделирования, реализуемыми на АВМ и ЭВМ.

Точность расчетов и моделирования зависит от достоверности расчетной схемы и достоверности принятых расчетных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов и грунтов зоны аэрации.

На водно-балансовых участках изучаются поверхностный и подземный сток, перетекание из других водоносных горизонтов, испарение с поверхности земли и с зеркала грунтовых вод, расход влаги на транспирацию растениями, инфильтрация атмосферных осадков, конденсация водяных паров в естественных условиях и на закрытых территориях, динамика и баланс влаги в зоне аэрации.

Количественные связи элементов баланса грунтовых вод с действующими техногенными факторами, изученные в отдельных точках, экстраполируются на весь водно-балансовый участок, в пределах которого выполняются наблюдения за уровнями грунтовых вод в наблюдательных скважинах для изучения генетических связей величины питания грунтовых вод с этими элементами.

12.4. Организация стационарных гидрогеологических наблюдений на городских территориях должна выполняться в последовательности, изложенной в п. 1.22.

12.5. Для организации целенаправленных режимных наблюдений на городской территории при сборе материалов в стационарных гидрогеологических режимных партиях и станциях Мингео СССР, Минводхоза СССР и союзных республик уточняется по району исследований степень изученности естественного и нарушенного режима подземных вод; продолжительность наблюдений; закономерности колебания уровня подземных вод (сезонные и многолетние); выявляются локальные закономерности режима, характерные для территории исследований и для незастроенных участков с аналогичными природными условиями (участки-аналоги). Участки-аналоги выбирают на основе существующего районирования режима подземных вод для территории СССР. Если режимные наблюдения в районе не выполнялись или невозможно выбрать участки-аналоги, то целесообразно использовать для предварительной оценки уровенного режима вероятностно-статистические карты, выпускаемые Мингео СССР. Эти карты позволяют получить в начале работ исходную информацию по следующим элементам естественного режима подземных вод с характеристикой их обеспеченности: глубина до воды, амплитуда колебания, величины инфильтрационного питания, испарения и подземного стока.

12.6. При слабой гидрогеологической изученности режима подземных вод на исследуемой территории, что в целом характерно для большинства городов, необходимо выполнение рекогносцировочного обследования. Рекогносцировка включает: маршрутные наблюдения, бурение гидрогеологических скважин и опробование подземных вод.

При маршрутных наблюдениях:

описываются все водопункты (родники, колодцы, скважины), вскрывающие подземные воды. В них замеряются уровни подземных вод, отбираются пробы воды, уточняются расходы и понижения в эксплуатируемых водопунктах. Путем опроса водопользователей выясняются факты повышения (снижения) уровня подземных вод и изменения качества воды;

описываются естественные и искусственные поверхностные водоемы и водотоки;

обследуются существующие водопонизительные системы (эксплуатационные и строительные дренажи);

по каждому водопункту, поверхностному водотоку или водоему оценивается возможность организации стационарных гидрогеологических наблюдений для изучения уровенного режима и расчета гидрогеологических параметров;

путем выборочного обследования зданий, сооружений выявляется роль техногенных факторов в развитии процесса подтопления, загрязнения подземных вод и оценивается эффективность выполняемых защитных мероприятий от подтопления.

Глубина и конструкция гидрогеологических скважин устанавливается исходя из необходимости: выявления мощности зоны аэрации; вскрытия полной мощности первого от поверхности водоносного горизонта (в случае, если она не установлена при предыдущих изысканиях); выполнения наблюдений за уровенным режимом грунтовых вод по 1–3 опорным попе-

речникам; опробования каждого первого от поверхности водоносного горизонта пробными откачками (в одной точке), если отсутствуют данные по гидрогеологическим параметрам этих горизонтов.

12.7. В результате сбора и анализа материалов, проведения рекогносцировки выполняется гидрогеологическое районирование территории, составляется программа работ на первый этап комплексных гидрогеологических изысканий для предварительной оценки гидрогеологических условий территории. В программе предусматривается комплекс работ по строительству первой очереди режимной сети и продолжению стационарных гидрогеологических наблюдений, которые были начаты на опорных поперечниках.

12.8. Принципы размещения наблюдательных пунктов первой очереди режимной сети, с учетом специфики застройки городской территории, рекомендуются, исходя из необходимости решения сформулированных выше основных задач стационарных гидрогеологических наблюдений.

В зонах селитебной застройки скважины должны располагаться по разреженной, неупорядоченной сети (в среднем 2–3 скважины на 1 км^2 территории) с учетом плотности застройки и густоты водонесущих коммуникаций, отображенных на соответствующих техногенных картах. Кроме этого по одной скважине закладывается в насыпных (намывных) грунтах в зоне каждой, ранее существовавшей, естественной дрены (балка, овраг).

На площадях промышленных предприятий с "мокрым" технологическим процессом, ТЭЦ и городских водопотребляющих производств (станции очистки воды, очистные сооружения канализации и др.), если положение уровня грунтовых вод неизвестно, должно быть заложено 1–10 скважин (в зависимости от размеров площади). Скважины располагаются в точках зафиксированных постоянных утечек или там, где они предполагаются. В условиях подтапливаемой площадки размещение скважин осуществляется в соответствии с рекомендациями [63]. При этом необходимо иметь в виду, что на данном этапе на площадке закладывается разреженная сеть скважин, если этому не предшествовали специальные исследования по выявлению утечек и фиксированию положения уровня грунтовых вод.

12.9. Кроме учета специфики застройки необходимо учитывать и природные условия.

Наблюдательные скважины должны быть заложены на всех геоморфологических элементах рельефа и на типичных формах микрорельефа. При однородном строении водоносного горизонта на каждом геоморфологическом элементе следует предусматривать бурение двух-трех скважин. Например, на аллювиальной террасе: первая скважина у ее бровки, вторая – в центральной части, третья – у тылового шва. При неоднородном (в плане) строении водоносного горизонта количество скважин увеличивается с учетом необходимости изучения режима грунтовых вод водовмещающих пород с различными фильтрационными свойствами. При наличии верховодки или слоистом строении первого от поверхности водоносного горизонта необходимо закладывать кусты скважин, фильтры которых устанавливаются в каждом водоносном слое (рис. 38). К конструкции наблюдательных скважин режимных кустов предъявляются особые требования – выше и ниже интервала установки каждого фильтра производится изоляция фильтровой колонны, чтобы исключить возможность взаимодействия опробываемого слоя с ниже и вышележащими водоносными слоями.

На подтапливаемых территориях, где геолого-литологический разрез зоны аэрации представлен лессовидными суглинками мощностью до 20–50 м (в условиях формирования техногенного водоносного горизонта), необходимо заложение кустов наблюдательных скважин с интервалом установки фильтра каждой скважины (в зоне аэрации) через 5–10 м от вскрытого уровня техногенного водоносного горизонта (рис. 39). Кроме того, скважины, не вскрывшие уровни подземных вод, оборудуются для замера влажности геофизическим способом с помощью нейтронного индикатора НИВ-2 тензометрами.

12.10. Для решения задач, связанных с фильтрацией подземных вод через разделяющие слои, необходимо получение параметров, характери-

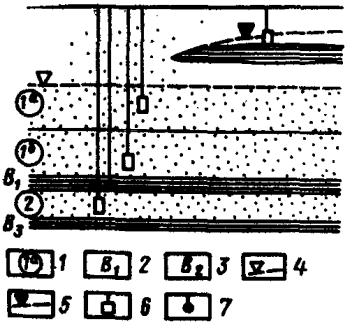


Рис. 38. Схема куста наблюдательных скважин при слоистом строении водоносного горизонта
1 – номер водоносного горизонта; *а* – верхний слой; *б* – нижний водоупор второго от поверхности (напорного или безнапорного) водоносного горизонта; *4* – уровень грунтовых вод; *5* – уровень верховодки; *6* – наблюдательная скважина, оборудованная фильтром; *7* – наблюдательная скважина, оборудованная "точечным" фильтром или датчиком порового давления

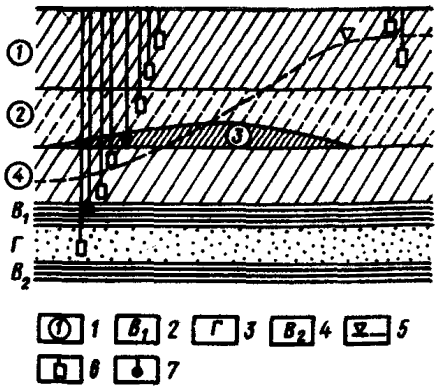


Рис. 39. Схема куста наблюдательных скважин при слоистом строении зоны аэрации
1 – номер слоя слабопроницаемых грунтов; *2* – местный водоупор в основании разреза слабопроницаемых грунтов; *3* – первый от поверхности водоносный горизонт (напорный или безнапорный); *4* – региональный водоупор; *5* – уровень подземных вод формирующегося техногенного водоносного горизонта; *6* – наблюдательная скважина оборудованная фильтром; *7* – наблюдательная скважина, оборудованная "точечным" фильтром (датчиком порового давления или тензиометрами)

зующих емкость слабопроницаемых отложений. Такие определения наиболее целесообразно проводить с использованием наблюдений за изменением напора в самом разделяющем слое. При этом следует учитывать, что проведение наблюдений за изменением напора в слабопроницаемых слоях позволяет более надежно установить условия взаимосвязи водоносных горизонтов, так как реакция на возмущение изучаемого (опробываемого) водоносного горизонта в раздельном слабопроницаемом слое наступает значительно быстрее. Наблюдения за изменением напора в слабопроницаемых слоях проводятся в открытых наблюдательных скважинах. При замерах уровня в скважинах возникают гидродинамические погрешности, связанные с их инерционностью [12, 49], поэтому обязательным является опробование наблюдательных скважин экспресс-наливами для оценки их инерционности. Инерционность накладывает определенные ограничения на выбор диаметра фильтра, особенно в слабопроницаемых слоях. Для наблюдательных скважин, пройденных на разделяющие слои, может осложниться и выбор длины фильтра, поскольку для повышения точности расчетных оценок она должна быть малой в сравнении с мощностью слоя, однако ее сокращение увеличивает инерционность фильтра. В связи с этим для замеров напора в слабопроницаемых пластах можно рекомендовать [12, 49] наряду с обычными наблюдательными скважинами – скважины, оборудованные датчиками порового (пластового) давления.

12.11. На первом этапе организации режимной сети на каждом постоянно и временно действующем водотоке (реке, канале) оборудуются два гидрометрических поста (входной и выходной по отношению к внеш-

ним границам исследуемой области фильтрации). У гидрометрических постов закладываются (нормально к урезу воды в реке) по одному створу наблюдательных скважин для расчета, по данным последующих наблюдений, параметра A_σ, выявления ширины зоны резкой деформации потока грунтовых вод и оценки питания или дренирования водотоком грунтовых вод. В створе делают 3–5 скважин (в зависимости от фильтрационных свойств водоносного горизонта). Первая скважина располагается около уреза воды, две последующие – на расстоянии 5–20 см от первой. Расстояние скважин от уреза воды определяется не только фильтрационными свойствами водовмещающих пород, но и амплитудой колебания уровня воды в водотоке.

Кроме того, для оценки параметра A_σ, в русле реки следует пробурить одну скважину.

У каждого поверхностного водоема следует оборудовать один гидрометрический пост со створом скважин.

12.12. Для экспериментального наблюдения за водообменом грунтовых вод с зоной аэрации для оценки составляющих баланса грунтовых вод в пределах каждого стокового участка (при мощности зоны аэрации 3–5, 5–10 и более метров) целесообразна организация по одной балансовой площадке в зонах завершенной застройки и незастроенных территорий, оборудованной комплексом приборов и установок [24, 25, 42–44, 83].

12.13. Во всех скважинах и поверхностных водотоках (водоемах) частота замера уровня, температуры и отбора проб определяется специальной программой. Рекомендуемая частота измерений уровня – 1 раз в 5–6 сут; в периоды формирования сезонных максимумов – через 1–3 сут.

12.14. По данным единовременных замеров уровня во всех наблюдательных пунктах строятся карты гидроизогипс на характерные периоды положения уровня (*min* и *max*). При единовременных замерах необходимо подключить все водопункты, не вошедшие в постоянно действующую режимную сеть.

Анализ результатов режимных наблюдений на пунктах первой очереди режимной сети является основой для предварительной оценки гидрогеологических условий на исследуемой территории. По данным такой оценки проектируется расширение сети (II очередь): на опорных режимных профилях; на ключевых участках для детализации оценки природных и техногенных режимообразующих факторов; на подтапливаемых участках в зонах селитебной и промышленной застройки.

Как показывает опыт гидрогеологических изысканий на городских территориях для целей прогноза подтопления, общее количество наблюдательных пунктов на этом этапе работ увеличивается на 40–50%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С. и др. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве. – М.:Стройиздат, 1978.–177с.

2. Алексеев В.С., Ароштам М.Г., Астрова Н.В. и др. Подтопление территорий грунтовыми водами при строительстве и их инженерная защита. – В кн.: Итоги науки и техники. Сер. гидрогеология, инженерная геология. М.. ВИНИТИ, 1982, т.8.–112 с.

3. Анпилов В.Е. Формирование и прогноз режима грунтовых вод на застраиваемых территориях.– М.: Недра, 1976.– 183 с.

4. Антонов В.В., Мироненко В.А. Сравнительный анализ расчетных гидрогеологических параметров, определяемых одиночными и кустовыми откачками. – Разведка и охрана недр, 1975, №3, с.45–49.

5. Арцев А.И. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования для водоснабжения и водоотведения.–М.:Недра, 1979.–285 с.

6. Бабкин В.И., Воскресенский К.П., Васильева Л.А. и др. О точности расхода водных балансов речных бассейнов за короткие интервалы времени. – Водные ресурсы, 1979, №2, с. 5–20.

7. **Бабушкин В.Д., Плотников И.И., Чуйко В.М.** Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. – М.:Недра, 1974.–206 с.

8. **Бадов В.В.** Основные этапы развития и современные представления об инфильтрации из шурфов. – Советская геология, 1975, №4, с.80–88.

9. **Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа.–М.:Недра, 1972.–288 с.

10. **Биндеман Н.Н., Язвин Л.С.** Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. – 2-е изд. –М.: Недра, 1970.–215 с.

11. **Бондарик Г.К.** Основы теории изменчивости инженерно-геологических свойств горных пород. –М.:Недра, 1971.–272 с.

12. **Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.** Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек.– М.: Недра, 1979.– 326 с.

13. **Булдей В.Р.** Моделирование гидромелиоративных систем.–Киев: Наукова думка, 1973.–199 с.

14. **Вольфцун И.Б.** Расчеты элементов баланса грунтовых вод.–Л.: Гидрометеоиздат, 1972.–272 с.

15. **Гавич И.К.** Применение моделирования к обработке гидрогеологической информации. –М.: ВИЭМС, 1971.–89 с.

16. **Гавич И.К.** Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. –М.:Недра, 1980.–358 с.

17. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород /Под ред. Н.Н.Веригина.– М.: Недра, 1977.– 271 с.

18. **Гринбаум И.И.** Расходометрия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин.–М.:Недра, 1975.–271 с.

19. **Гуревич Ю.М.** Количественная оценка закарстованности горных пород.– В кн.: Методические рекомендации по изучению режима поверхностных и подземных вод в карстовых районах. Л., 1969, с. 110–116.

20. Дзекцер Е.С. Уравнения водного баланса подтопляющих территорий.–В кн.: Материалы Всесоюз. совещания в Ставрополе. М., 1970, с. 119–122.

21. **Жернов И.Е., Шестаков В.М.** Моделирование фильтрации подземных вод.–М.:Недра, 1974.–224 с.

22. **Залесский Ф.В.** Формирование дождевых паводков в районах многолетней мерзлоты.–Тр.Всесоюз.гидрогеол.съезда, 1975, т.3, с.40–44.

23. **Залесский Ф.В.** Рекомендации по методике определения экстремальных гидрометеорологических характеристик.– М.: Стройиздат, 1981.– 44 с.

24. **Зальцберг Э.А.** Определение элементов баланса грунтовых вод на отдельных участках территории г.Ленинграда.–Тр, ВСЕГИНГЕО, 1970, вып. 27, с.44–57.

25. **Зальцберг Э.А.** Режим и баланс грунтовых вод зоны избыточного увлажнения.–Л.:Недра, 1980.–207 с.

26. **Зильберг В.С., Слинко О.В.** Направленность инженерных изысканий по прогнозу уровенного режима грунтовых вод на городских территориях методами математического моделирования.– Инж.-строит. изыскания, 1979, №3 (55), с. 4–7.

27. **Зильберг В.С., Великина Г.М., Красс М.С., Слинко О.В.** Методология исследования формирования уровенного режима грунтовых вод на застроенных и осваиваемых территориях с использованием АВМ и ЭВМ.– Инж.-строит.изыскания, 1979, №4 (56), с. 9–11.

28. **Зильберг В.С., Великина Г.М., Слинко О.В.** Методология гидрогеологических прогнозов при развитии процесса подтопления городских территорий. Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов.–Материалы I Всесоюз. гидрогеол. конференции.–М.:Наука,1982, т.2, с. 266.

29. **Зильберг В.С., Великина Г.М., Лившиц В.М., Слинко О.В.** Имитационные модели процесса подтопления городских территорий.–В кн.: Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инж.-хоз. деятельности. I Всесоюз. семинар/Ин-т литосферы АН СССР. М., 1981, с. 68–72.

30. **Зильберг В.С., Слинко О.В.** Картирование процессов самоподтопления городских территорий.–В кн.: Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инж.-хоз. деятельности.–В кн.: I Всесоюз.семинар/Ин-т литосферы АН СССР. М., 1981, с. 173–175.

31. **Киселев П.А.** Гидродинамические принципы количественной оценки питания подземных вод на основе анализа их режима.– В кн.: Режим и баланс подземных вод. Минск: Наука и техника, 1967, с. 3–92.

32. **Ковалевский В.С.** Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод.–М.: Недра, 1973.–152 с.

33. **Ковалевский В.С.** К вопросу об определении многолетних амплитуд колебания уровней подземных вод.–В кн.:Изучение и картирование ресурсов подземных вод. М.:Наука, 1974, с. 75–93.

34. **Ковалевский В.С.** Основы прогнозов естественного режима подземных вод.–М.:Стройиздат, 1974.–208 с.

35. **Ковалевский В.С.** Учет многолетней изменчивости ресурсов подземных вод при обосновании оптимальных форм их использования.–Материалы I Всесоюз.гидрогеол.конференции. М.:Наука, 1982, т. 2, с. 25–28.

36. **Ковалевский В.С.** Закономерности формирования режима подземных вод как основа его прогнозов.–Материалы I Всесоюз.гидрогеол.конференции. М.: Наука, 1982, т.I, с. 310–314.

37. **Койда А.Н., Слинко О.В.** Изучение подтопления грунтовыми водами территории города (на примере г.Тулы). – Стр-во и архитектура. Сер. I. Инж. изыскания в стр-ве. Научн.-техн.реф.сб./ВНИИИС Госстроя СССР. М., 1981, вып. 6, с. 3–4.

38. **Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М.** Естественный режим подземных вод и его закономерности.–Тр. ВСЕГИНГЕО. Новая серия, 1963.–231 с.

39. **Коноплянцев А.А., Семенов С.М.** Прогноз и картирование режима грунтовых вод.–М.: Недра, 1974.–216 с.

40. **Куканов Н.В., Лапшин Н.Н.** Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения.–Стр-во и архитектура. Сер. I. Инж. изыскания в стр-ве. Научн.-техн.-реф. сб. /ВНИИИС Госстроя СССР. М., 1981, вып. 6, с. 16–18.

41. **Куприянов В.В.** Гидрологические аспекты урбанизации.–Л.: Гидрометеоиздат, 1977.–184 с.

42. **Лебедев А.В., Семенова С.М., Фрейдина Н.Н.** Методические рекомендации по изучению баланса и режима подземных вод в условиях взаимосвязи водоносных горизонтов.–М.:ВСЕГИНГЕО, 1971.–162 с.

43. **Лебедев А.В.** Методы изучения баланса грунтовых вод.–М.: Недра, 1976.–223 с.

44. **Лебедев А.В.** Формирование баланса грунтовых вод на территории СССР.–М.:Недра, 1980.–287 с.

45. **Львович М.И., Черногаева Г.М.** Преобразование водного баланса территории г.Москвы.–Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1976, №3, с. 52–60.

46. **Лукнер Л., Шестаков В.М.** Моделирование геофильтрации.–М.: Недра, 1976.–407 с.

47. **Лялько В.И., Шнейдерман Г.А.** Формирование и прогноз ресурсов подземных вод засушливых районов.–Киев: Наукова думка, 1965.-187 с.

48. Методическое руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям для мелиоративного строительства /ВСЕГИНГЕО, Союзводпроект.–М., 1972, вып. 3.–130 с.

49. **Мироненко В.А., Шестаков В.М.** Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ.–М.:Недра, 1978.–325 с.

50. **Михайлов И.В.** Влияние городов на атмосферные осадки.–Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1980, №6, с. 88–94.

51. **Невечеря И.К.** Определение гидрогеологических параметров по результатам наблюдений за режимом подземных вод.–В кн.: Гидрогеология и инженерная геология: Обзор/ВИЭМС. М., 1980.–48 с.

52. **Огильви Н.А., Великина Г.М., Красс М.С.** Модели гидрогеологических условий территорий на основе аппроксимации физических и геологических полей полиномами.–Водные ресурсы, 1976, №1, с. 30–38.

53. Опытно-фильтрационные работы /Под ред. Шестакова В.М., Башкатова Д.Н.–М.:Недра, 1974.–203 с.

54. Основы гидрогеологических расчетов /Ф.М.Бочевер, И.В.Гарманов, А.В.Лебедев, В.М.Шестаков.–М.: Недра, 1969.–368 с.

55. Определение водопроницаемости неводоносных горных пород опытными наливами в шурфы. И-41-68.–М.: Энергия, 1969.–62 с.

56. **Ильин Н.И., Чернышев С.Н., Дзекцер Е.С.** и др. Оценка точности определения водопроводимости горных пород.–М.: Наука, 1971.–150 с.

57. **Перцовский В.В., Чаповский А.Е.** О методике осреднения параметров фильтрации неоднородного в плане пласта.–Изв.вузов. Геология и разведка, 1974, вып. 2, с. 108–111.

58. Принципы размещения сети гидрогеологических наблюдательных пунктов в естественных и нарушенных условиях: (Метод. рекомендации).– М.: ВСЕГИНГЕО, 1974.–73 с.

59. Подземный сток на территории СССР/Под ред. Б.И.Куделина.– М.: МГУ, 1966.–362 с.

60. **Рац М.В.** Неоднородность горных пород и их физических свойств.– М.: Наука, 1968.–107 с.

61. **Рац М.В.** Структурные модели в инженерной геологии.– М.: Недра, 1973.–216 с.

62. Рекомендации по изучению режима и баланса грунтовых вод на подтапливаемых промышленных площадках. – Инженерная геология /ВОДГЕО, ПНИИИС, М., 1973.–96 с.

63. Рекомендации по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами.– Инженерная геология/ВОДГЕО, ПНИИИС, М., 1976, – 324 с.

64. Рекомендации по определению фильтрационных параметров горных пород и грунтов методом экспресс-налива в несовершенные скважины/ВНИИВОДГЕО.– М., 1979.–78 с.

65. Рекомендации по методике оценки и прогноза гидрогеологических условий при подтоплении городских территорий.–М.:Стройиздат, 1983.– 240 с.

66. Рекомендации по решению на ЭВМ задач геофильтрации для трехслойного потока подземных вод при подтоплении городских территорий /ПНИИИС.–М.: Стройиздат, 1984.– 40 с.

67. **Рождественский А.В.** Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик.–Л.: Гидрометеоиздат. – 272 с.

68. Руководство по решению на ЭВМ нестационарной краевой задачи геофильтрации для однослойного безнапорно-напорного в плане потока.– М.: Стройиздат, 1981.– 40 с.

69. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки.– М.: Энергоиздат, 1981.– 124 с.

70. Руководство по инженерным изысканиям для строительства /ПНИИИС. – М.:Стройиздат, 1982.–144 с.

71. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.– Л.: Гидрометеоиздат, 1973.– 112 с.

72. Руководство по решению на ЭВМ стационарной краевой задачи геофильтрации для однослойного двумерного в плане потока /ПНИИИС.– М.: Стройиздат, 1981.– 32 с.

73. **Саваренский А.Д.** Проблемы водохозяйственных гидрогеологических исследований и расчетов применительно к требованиям сельского хозяйства и мелиорации. – Тр. 3 Всесоюз. гидролог. съезда, 1959, т.4, с. 192–203.

74. **Семенов С.М.** К вопросу о вероятной изменчивости уровня грунтовых вод.– Тр. ВСЕГИНГЕО, 1979, вып. 129, с. 33–39.

75. **Слинко О.В.** Принципы классификации застроенных территорий городов и промышленных узлов европейской части РСФСР по потенциальной подтопляемости.– В кн.: Прогноз изменения гидрогеологических условий застраиваемых территорий /ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1980, с. 93–116.

76. **Слинко О.В.** Принципы типизации территорий городов европейской части РСФСР для прогнозирования изменения гидрогеологических условий.– Стр-во и архитектура. Сер. 15. Инж.изыскания в стр-ве. Науч.-техн. реф. сб./ЦИНИС Госстроя СССР. М., 1979, вып. 7, с. 10–12.

77. **Слинко О.В.** Методика составления карт застройки территории и водонесущих коммуникаций для воспроизведения и прогноза на АВМ и ЭВМ процесса подтопления городских территорий.– Стр-во и архитектура. Сер. 15. Инж. изыскания в стр-ве. Науч.-техн. реф. сб./ВНИИИС Госстроя СССР. М., 1980, вып. 6, с. 17–18.

78. **Слинко О.В.** Прогноз изменения гидрогеологических условий на территориях городов для гидрогеологического обоснования проектов защитных мероприятий и охраны геологической среды.– Инж. геология, 1983, №1, с. 108–115.

79. Справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967, ч.4, вып. 8.–360 с.

80. **Чаповский А.Е., Перцовский В.В.** Экспериментальное исследование неоднородности горных пород в плане. – Разведка и охрана недр, 1972, №1, с. 45–49.

81. **Чеботарев А.И.** Общая гидрология.– Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 544 с.

82. **Челидзе Ю.Б., Леви В.Л.** К методике составления вероятностных прогнозов – оценок колебаний уровней подземных вод. – Водные ресурсы, 1979, вып. 2, с. 179–183.

83. **Шестаков В.М.** Методика интерпретации опытно-фильтрационных наблюдений.– М.: Изд-во МГУ, 1982.–52 с.

84. **Шестаков В.М., Пашковский И.С., Сойфер А.М.** Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. – М.: Недра, 1982.– 244 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

Введение 3

1. Общие положения формирования и исследования процесса подтопления городских территорий 4

2. Имитационные модели процесса подтопления городских территорий 13

3. Исходная фактическая информация, характеризующая природные условия и техногенные факторы подтапливаемых городских территорий, динамику процесса подтопления 20

4. Типовые расчетные схемы для прогноза подтопления 27

5. Балансовые соотношения поверхностных и подземных вод в естественных условиях 38

6. Балансовые соотношения поверхностных и подземных вод на застроенных территориях 43

7. Методика статистической обработки многолетних наблюдений над уровнем подземных вод 55

8. Характеристика уровенного режима грунтовых вод на застроенных территориях 63

Основные типы режима 63

Районирование застроенных территорий по режиму грунтовых вод 71

9. Учет гидрологических и метеорологических параметров 80

Атмосферные осадки 80

Поверхностный сток 86

Испарение с поверхности суши 91

Инфильтрация 91

10. Оценка гидрогеологических параметров и выбор их расчетных значений 98

Характеристика гидрогеологических параметров 98

Основные полевые методы изучения фильтрационных свойств грунтов (горных пород) 101

Типизация расчетных схем и условий проведения опытно-фильтрационных работ для расчета гидрогеологических параметров 102

Основные методы расчета гидрогеологических параметров 104

О выборе расчетных значений гидрогеологических параметров 113

11. Оценка техногенных факторов подтопления 116

12. Основные требования к организации и проведению стационарных гидрогеологических наблюдений на городских территориях 123

Список литературы 127

Нормативно-производственное издание

ПНИИИС Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПРОЦЕССА ПОДТОПЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией *Л.Г.Бальян*

Редактор *Э.И.Федотова*

Мл. редактор *М.А.Шиффер*

Тех. редактор *Н. Н. Аксенова*

Корректор *С. А. Зудилина*

Н/К

Подписано в печать 15.08.86 Т – 13562 Формат 84x108/32
Бумага кн.-журн. Печать офсетная Усл. печ. л. 7,14
Усл. кр.-отт. 7,35 Уч.-изд. л. 11,46 Тираж 5000 экз.
Изд. № XII – 1247 Заказ № 2030 Цена 55 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская 23а

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46.

gost.e-ecolog.ru