

Разработка геофильтрационной модели территории г. Ростова Великого

Докладчик: В.В. Соловьев, директор ООО ИФ «Интергео»

Введение

Территория г. Ростова Великого подвержена подтоплению подземными водами. Развитие процессов подтопления негативно влияет на функционирование городской инфраструктуры и устойчивость оснований памятников архитектуры, расположенных в исторической части города. В рамках концепции защиты города от подтопления обосновывается необходимость создания геофильтрационной модели территории города, которая должна способствовать решению следующих задач:

- количественная оценка гидрогеологической ситуации территории города, сложившейся под влиянием естественных и искусственных факторов формирования режима и баланса подземных вод;
- прогнозирование влияния различных инженерных решений на изменение режима подземных вод;
- оптимизация и развитие системы мониторинга подземных вод территории города.

Работа по данной тематике выполнялась в три этапа:

1. Сбор и систематизация геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и других материалов по району исследования с целью оценки природных и техногенных условий территории г. Ростова как основы разработки геофильтрационной модели;
2. Полевые работы: устройство режимной сети, наблюдения за уровнем и химическим составом подземных вод, опытно-фильтрационные исследования;
3. Детализация гидрогеологических условий на основе обработки результатов предыдущих этапов, схематизация природных и техногенных условий и разработка стационарной региональной геофильтрационной модели территории г. Ростова Великого.

1 Информационное (инженерно-геологическое и гидрогеологическое) обеспечение геофильтрационной модели г. Ростова Великого

1.1 Общие сведения о районе исследований

Исследуемая территория относится к Русской равнине Европейской части России. Административно это Ростовский муниципальный район Ярославской области.

Административный центр – город Ростов располагается на берегу озера Неро. Расстояние от г. Ростова до областного центра (г. Ярославль) 58 км. Из промышленных предприятий здесь имеются: оптико-механический завод, предприятия легкой, пищевой и местной промышленности. Город Ростов является крупным туристическим центром, входящим в «Золотое кольцо» России.

Климат района умеренно-континентальный, с теплым и влажным летом и умеренно-холодной зимой.

В орографическом отношении район располагается, в основном, в пределах грядово-холмистого и холмистого конечно-моренного рельефа; в котловине озера Неро и по рекам – озерные и речные террасы, в северной и восточной частях выделяются слаборасчлененная пологоволнистая зандровая равнина. Абсолютные отметки поверхности от 93 м (урез оз.Неро) до 189 м (отдельные холмы).

В гидрографическом плане изучаемая территория принадлежит бассейну реки Волги. Здесь протекают реки Сара, Устье, Векса, Которосль и другие более мелкие. Площадь водного зеркала озера Неро 54,4 км². Впадает в него 15 рек и речек, вытекает одна – Векса, которая, сливаясь с р. Устье, образует р. Которосль.

1.2 Геологическая характеристика района работ

В тектоническом отношении описываемая территория располагается в центральной части Московской синеклизы. Кристаллический фундамент здесь залегает на глубинах 1,8–2,6 км. Поверхность фундамента разбита разломами различного направления и амплитуд и имеет блоковое строение.

Слои более молодых пород, несогласно лежащие на кристаллическом фундаменте, имеют, большей частью, горизонтальное залегание.

В геологическом строении изучаемой территории принимают участие породы кристаллического фундамента, отложения протерозойской группы: кембрийской, ордовикской, девонской, каменноугольной, пермской, триасовой, юрской и меловой систем. Мезозойские образования залегают под четвертичными отложениями на глубине 30–250 м от поверхности земли.

Территория города расположена в пределах Ростовской низины, которая представляет собой экзарационную котловину, выполненную ниже- средне- и верхнечетвертичными отложениями ледникового, водноледникового, озерно-ледникового, озерно-аллювиального и озерного генезиса. Площадь низины составляет 700 км², в южной части расположено озеро Неро. Общая мощность четвертичных отложений, которые являются основой зоны хозяйственного освоения территории г. Ростова, составляет 50–100 м. Коренные породы, залегающие в основании четвертичной толщи, представлены песчано-глинистыми образованиями нижнего и верхнего мела (K_{1+2}).

Территория г. Ростова расположена в пределах первой озерной террасы оз. Неро на абсолютных отметках 96,0–103,0 м. В геологическом строении территории г. Ростова до глубины зоны хозяйственного освоения принимают участие следующие отложения (снизу вверх по разрезу) (см. рис. 1):

Московско-днепровский горизонт (нерасчлененный) представлен красновато-коричневыми ленточными глинами ($lg \Pi^{ms-dn}$) и серыми, разнотернистыми, плотными песками ($f \Pi^{ms-dn}$). Вскрытая мощность 15 м.

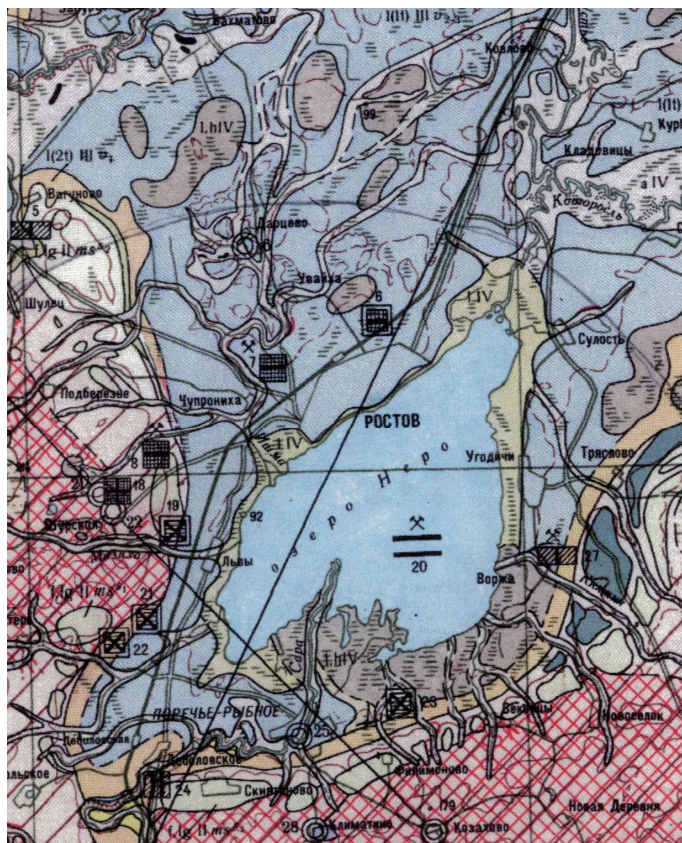
Московский горизонт ($g, lg \Pi^{ms}$) сложен моренными суглинками ($g \Pi^{ms}$) красновато-коричневого цвета, с гравием и галькой до 10%. Моренные суглинки линзообразно залегают в северной и северо-восточной части городской застройки и выклиниваются в сторону акватории озера Неро. Ленточные глины ($lg \Pi^{ms}$), залегающие как на моренных суглинках, так и на флювиогляциальных песках, развиты, главным образом, в северной части города. Мощность 0,3–5,0 м.

Микулинский горизонт ($l \Pi^{mik}$) представлен черными и плотными темно-серыми глинами, участками с раковинами моллюсков, заторфованными. Отложения микулинского горизонта широко развиты в центральной части г. Ростова, на окраинах городской застройки мощность их резко уменьшается, вплоть до выклинивания. Максимальная вскрытая мощность 10 м.

Ниже- и средневалдайский горизонт (нерасчлененный, $l \Pi_{vd1+2}$) представлен серыми суглинками и глинами, иловатыми, с примесью растительных остатков. Суглинки и глины, мощностью до 10 м, фациально замещаясь и образуя единый в генетическом отношении горизонт, распространены повсеместно.

Верхневалдайский горизонт ($pr \Pi_{vd3}$) сложен буровато-серыми суглинками и с генетической точки зрения представляют собой зону (на глубину 2–3 м) гипергенеза вышеописанных валдайских суглинков и глин.

Современные отложения – образованы насыпными грунтами ($t IV$), болотными ($h IV$), аллювиальными ($a IV$) и озерными ($l IV$) отложениями. *Насыпные грунты* распространены повсеместно в пределах городской застройки до глубины 3–7 м. *Болотные отложения* мощностью до 2–3 м представлены торфами и развиты в пониженных участках первой надпойменной террасы и поймы оз. Неро. *Аллювиальные образования* мощностью до 3 м представлены разнотернистыми песками русловой фации рек, впадающих в озеро Неро (р. Ишня и др.). *Озерные отложения* представлены пылеватыми и мелкими песками и органоминеральными илами (сапропели). Мощность озерных отложений составляет 10–16 м.



СОВРЕМЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ	a IV	Аллювиальные отложения. Пески
	IV	Озерные отложения. Пески, суглинки, супеси, глины, сапропели
	I, h IV	Озерные и болотные отложения. Суглинки, глины, торф
ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ	p, III	Нерасчлененный комплекс отложений перигляциальных зон валдайского оледенения на водоразделах, делювиальных образований склонов и аллювиально-делювиальных выполнений древних балок. Суглинки
	III III v _{2,3}	Средневалдайский-верхневалдайский горизонты. Озерные отложения первой озерной террасы. Суглинки, глины, пески
	II(2) III v ₁	Нижневалдайский горизонт. Озерные отложения второй озерной террасы. Суглинки, глины, пески
	I, h III mk	Микulinский горизонт. Озерные и болотные отложения. Торф, суглинки, пески
СРЕДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ	I, g (3) II ms	Московский горизонт. Озерные и озерно-ледниковые отложения третьей озерной террасы. Пески, суглинки, алевроиты
	g II ms	Московский горизонт. Ледниковые отложения (морена). Суглинки валунные, супеси, пески, галька, гравий
	I, g I d n - ms	Днепровский-московский горизонты. Водноледниковые, аллювиальные, озерные и болотные отложения нерасчлененные. Пески, глины
	g I d n	Днепровский горизонт. Ледниковые отложения (морена). Суглинки валунные, пески
		Конечно-моренные образования

Рис. 1 Фрагмент геологической карты четвертичных отложений

1.3 Гидрогеологическая характеристика

1.2.2 Гидрогеологические условия г. Ростова до глубины хозяйственного освоения сложные, что обусловлено наличием в разрезе нескольких водоносных горизонтов, имеющих гидравлическую связь. Из наиболее значимых (по мощности и хозяйственному использованию) необходимо отметить следующие водоносные горизонты:

- горизонт современных отложений, приуроченный к насыпным грунтам и болотным отложениям;
- валдайский горизонт, включающий верхнечетвертичные опесчаненные суглинки и глины;
- московско-днепровский горизонт, приуроченный к толще флювиогляциальных разнозернистых песков и супесей;
- днепровско-окский горизонт, включающий песчаные и супесчаные грунты;
- меловой горизонт, в составе которого преобладают песчаные отложения нижнего и верхнего мела;

Горизонт современных отложений, являясь первым от поверхности водоносным горизонтом, имеет высокий уровень подземных вод, практически, на всей территории г. Ростова. Глубина его залегания в паводковый период составляет 0,5–1,0 м, иногда с выходом на дневную поверхность.

Из неблагоприятных геологических процессов на территории города следует выделить:

- а) подтопление территории, обусловленное в основном техногенными и, частично, природными факторами;
- б) заболачивание;
- в) проявление морозного пучения с деформацией сооружений и асфальтового покрытия дорог;
- г) наличие зон агрессивности подземных вод к бетону;
- д) капиллярное увлажнение зданий и сооружений.

1.3 Результаты сбора и систематизации материалов по информационному обеспечению геофильтрационной модели г. Ростова

1.3.1 Сбор и систематизация материалов по исследованию геологического строения территории г. Ростова проведен путем изучения фондовых материалов. В частности, выполнен анализ буровых работ, проведенных ВерхневолжТИСИЗ и другими организациями в период с 1963 по 1995 гг. в объеме около 13 500 п. м.

В стратиграфическом отношении геологический разрез территории города увязан со стратиграфической шкалой, принятой в ходе проведения геологической съемки территории Ярославской области масштаба 1:200 000.

Систематизация материалов инженерно-геологических изысканий проводилась следующим образом:

- все геологические и гидрогеологические выработки выносились на карту фактического материала масштаба 1:10 000;
- литологические колонки скважин увязывались с существующей стратиграфической схемой;
- информация по выработкам (геоморфологическая приуроченность, генезис, возраст и состав отложений) заносились в банк данных, созданный ИФ «Интергео» для г. Ростова.

Геологическая информация, собранная в банке данных в виде каталога Microsoft Exel состоит из 2-х главных частей:

- каталога координат и абсолютных отметок устьев (2730 буровых скважин);
- блока литологических колонок (960 скважин).

Имеющаяся база данных геологической информации позволяет:

- анализировать геологическое строение любого участка работ в пределах границ г. Ростова;
- составлять комплексные и специализированные карты с помощью следующих программных средств: Microsoft Exel, модуль CREDO-MIX пакета CREDO по построению трехмерных моделей местности, AutoCad с использованием экспортно-импортных возможностей этих продуктов по технологиям, разработанным в ООО ИФ «Интергео».

Используя возможности банка данных для территории г. Ростова был составлен картографический материал, включающий литолого-стратиграфическую колонку четвертичных отложений, литологический каркас карты гидрогеологических условий, а также гидрогеологические разрезы.

1.3.2 Сбор и систематизация данных по гидрогеологическому изучению территории г. Ростова велось по двум направлениям. Первое направление включало анализ гидрогеологических условий, направленный на изучение:

- литологического состава водовмещающих отложений;
- наличия водоносных горизонтов и водоупоров;
- глубин появления подземных вод и установления их уровней;
- характера режима подземных вод (включая питание и разгрузку);
- наличия взаимосвязи между водоносными горизонтами.

Для решения поставленных задач были проанализированы материалы 350 технических отчетов по инженерно-геологическим изысканиям, включавшим сведения о гидрогеологических условиях исследуемой территории.

При систематизации этих сведений уделялось внимание взаимосвязи поверхностных и подземных вод, степени нарушенности естественного режима последних под влиянием хозяйственной деятельности человека и возможному формированию искусственных (техногенных) водоносных горизонтов.

Итогом сбора и систематизации материалов изысканий прошлых лет явилось построение гидрогеологической карты территории г. Ростова масштаба 1:10 000 (см. рис. 2).

На гидрогеологической карте, выполненной на топографической основе, цветным фоном, штриховкой и крапом отображено:

- распространение первых от поверхности водоносных горизонтов и водоупоров;
- изогипсы кровли первого от поверхности водоупора.

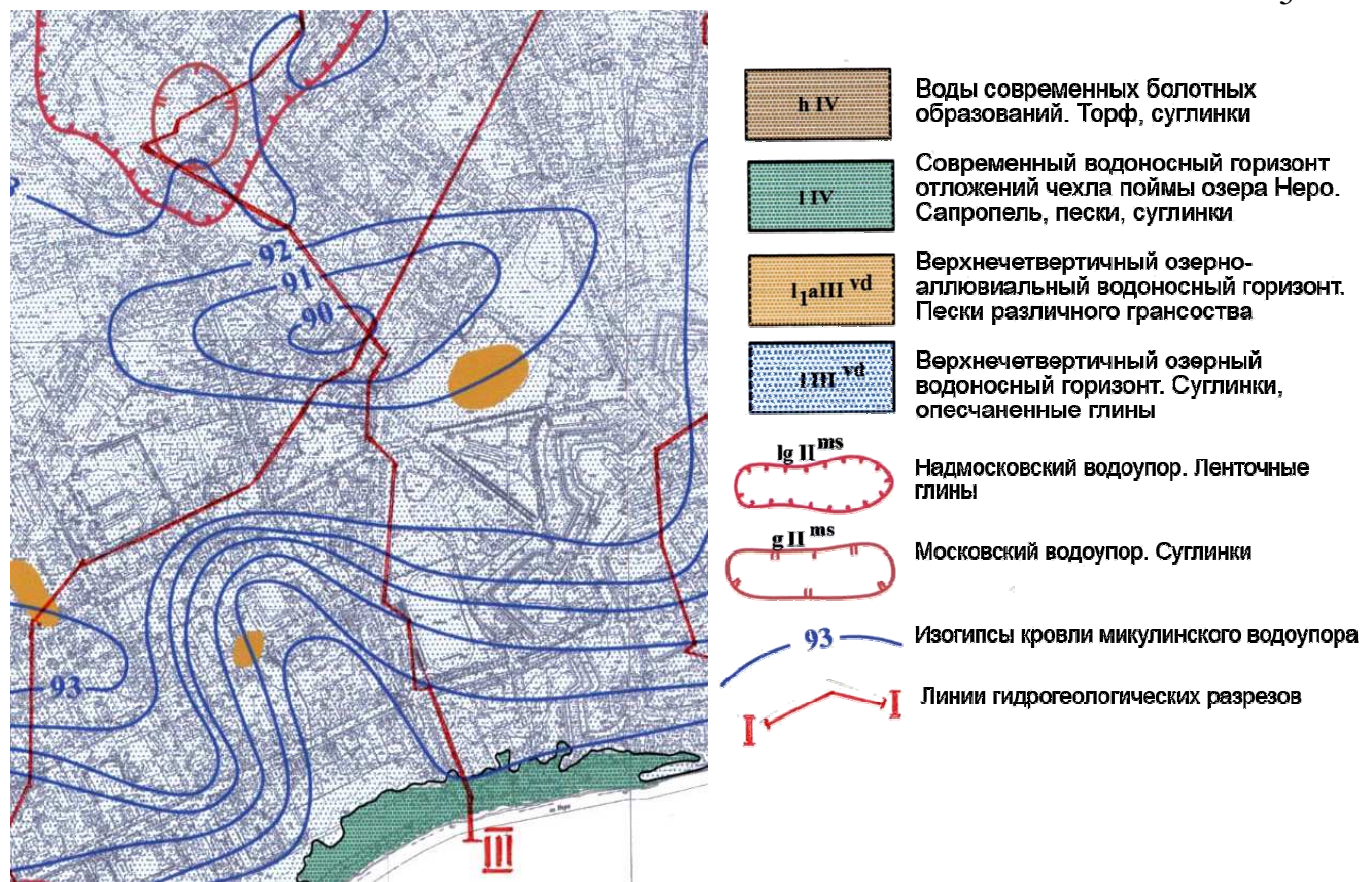


Рис. 2 Фрагмент карты гидрогеологических условий

Второе направление включало анализ режимных наблюдений за уровнями подземных вод и результатов опытно-фильтрационных работ (см. раздел 2).

1.3.3 Сбор и систематизация материалов по оценке техногенных условий включали изучение инфраструктуры г. Ростова и исследование влияния современных техногенных процессов на природную среду городской территории.

Вся городская инфраструктура была разделена на следующие зоны и группы сооружений: зона промышленной застройки, зона социально-бытовой инфраструктуры, зона жилой застройки архитектурно-историческая зона, зеленая зона, современные гидрографические объекты, искусственные насыпи. По результатам районирования инфраструктуры г. Ростова была построена карта техногенных нагрузок масштаба 1:10 000 с изопакитами насыпных (техногенных грунтов).

2 Режим подземных вод территории г. Ростов Великий

Анализ режимных наблюдений проводился с целью:

- 1) выявления закономерностей режима подземных вод,
- 2) определения связи между колебаниями уровней в скважинах и режимобразующими факторами,
- 3) оценки техногенного влияния на режим подземных вод и выявления «аномальных» скважин.

Обработка данных наблюдений включила в себя:

- 1) расчет показателей (среднемесячные, среднегодовые значения, амплитуды колебаний),
- 2) построение графиков годового хода уровней подземных вод,
- 3) статистические методы обработки (кросс-корреляция между скважинами, корреляция между уровнями подземных вод и режимобразующими факторами).

Наблюдения за режимом подземных вод на территории г. Ростов Великий были начаты в 1977 г. ВерхневолжТИСИЗом по одиннадцати скважинам. В 1992 году наблюдательная сеть на участке была расширена дополнительно четырьмя скважинами на территории Рос-

товского Кремля. Замеры проводились каждые три или шесть или десять дней.

Геологическим отделом ООО ИФ «Интергео» были выполнены следующие работы, отвечающие I и II этапам реализации задачи по разработке геофильтрационной модели:

- а) установка семи гидрогеологических наблюдательных скважин;
- б) наблюдения за изменением режима и химического состава подземных вод;
- в) опытно-фильтрационные работы.

Наблюдательные скважины стационарной режимной сети установлены по центральному створу I–I, проходящему через историческое ядро г. Ростова и направленному по нормали к береговой линии озера Неро (см. рис. 3).



Рис. 3 Схема расположения режимных наблюдательных скважин г. Ростова

Результаты проведенных исследований режима подземных вод позволяют сделать следующие выводы:

1. На территории города Ростов Великий можно отметить, что режим уровней подземных вод по большинству скважин в многолетнем разрезе сохраняет черты естественного режима, характерного для Европейской части России: сезонного, преимущественно весеннего питания.

2. Не выявлено заметной корреляционной связи между положением уровня подземных вод и количеством выпавших осадков (по среднемесячным данным), а также и связи максимального весеннего подъема уровня с объемом осадков за холодный период года. Возможно, это связано с не учетом в этой простой корреляционной модели испарения и поверхностного стока, формирующегося на застроенной территории.

3. Максимальные коэффициенты кросскорреляции уровней подземных вод с уровнями оз. Неро составляют около 0,6–0,7. По графикам годового хода уровней можно отметить, что подъем уровней в скважинах начинается раньше, чем в озере и пик наступает либо раньше, либо в одно время (анализ по среднемесячным значениям). Поэтому сложно утверждать об определяющей роли оз. Неро на формирование режима подземных вод.

4. На территории исторического ядра города существуют "аномальные" скважины №10508, 10510, 10513 в которых наблюдается уровненный режим, резко отличный от естественного режима.

3 Разработка региональной геофильтрационной модели территории

Региональная геофильтрационная модель территории г. Ростов Великий разрабатывалась с учетом приведенных выше особенностей строения и формирования уровенного режима подземных вод озерно-аллювиальный комплекса в районе города.

Для моделирования выбран участок, прилегающий к озеру Неро протяженностью 6,5 км вдоль озера и 3,5 км в направлении перпендикулярном озеру и покрывающий всю современную застройку города.

3.1 Геофильтрационная схематизация

Поток подземных вод схематизируется как плано-пространственный. В вертикальном разрезе водоносного комплекса выделено четыре расчетных слоя. Верхний слой – техногенные отложения, распространенные в центральной части города, второй слой – валдайский подгоризонт, третий слой – разделяющий слой микулинских глин и четвертый слой – пески микулинского возраста. В настоящий момент из-за отсутствия достоверной информации о водообмене с нижележащими напорными водами предполагается, что подстилающие четвертый слой моренные отложения непроницаемы.

В качестве внешних границ модели используется – озеро Неро, как граница с заданным уровнем и сопротивлением ложе водоема, боковые границы предполагается, что совпадают с линиями тока, т.е. непроницаемы. Дальняя от озера граница принята также непроницаемой, так как проведена примерно по водоразделу озера и прилегающего мелиорируемого массива. Внутренними границами модели являются река Пига, каналы и многочисленные мелкие водоемы, расположенные в пределах территории модели.

Для учета площадного взаимодействия подземных и поверхностных вод в модели используется инфильтрационное питание и линейно зависящее от глубины залегания уровня испарение грунтовых вод. Под испарением в данном случае понимается расход подземных вод на эвапотранспирацию, который зависит от максимально возможного испарения в данной точке при нулевой глубине залегания уровня и линейно убывает в увеличением глубины залегания уровня подземных вод.

Анализ режимных наблюдений свидетельствует, что в среднем уровни подземных вод в течение последних 20 лет в районе города находятся в квазистационарном состоянии, т.е. отсутствует их выраженный временной тренд. Колебания уровней связаны, в основном, в сезонной многолетней изменчивостью условий питания и разгрузки. Поэтому, для региональной модели принимается стационарный режим фильтрации, который позволит моделировать плановое распределение уровней в модельных водоносных пластах, соответствующее условным многолетним условиям питания и разгрузки озерно-аллювиального комплекса в исследуемом районе.

Математическая модель фильтрации и программные средства реализации модели

При принятых предпосылках схематизации модель геофильтрации описывается следующей системой уравнений¹:

$$\frac{\partial}{\partial x} k_i m_i \frac{\partial H_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_i m_i \frac{\partial H_i}{\partial y} + v_{z_i} + w + e + v_{sw} = 0 \quad (1)$$

где $i=1-4$ – номер модельного слоя,

m_i – насыщенная мощность слоя, равная разнице отметок кровли и подошвы слоя, если напор подземных вод в данном слое выше отметки его кровли и разнице между отметкой напора и отметкой подошвы в противном случае

k_i – коэффициент фильтрации слоя

w – интенсивность инфильтрационного питания (данная величина не равна нулю в каждой плановой точке только для самого верхнего активного слоя).

e – интенсивность эвапотранспирации, определяемая как: $e = e_{\max} \left(1 - \frac{z}{z_{kr}}\right)$,

где e_{\max} – величина эвапотранспирации при нулевой глубине залегания уровня,
 z – глубина залегания уровня,

z_{kr} – глубина, при которой эвапотранспирации прекращается (эвапотранспирации как и инфильтрационное питание применяется в каждой точке для самого верхнего активного слоя);

v_{sw} – взаимосвязь подземных вод с водоемами и водотоками, определяемая тех местах модели, где присутствует водоем, связанный с каким либо слоем модели как:

$$v_{sw} = (H_{sw} - H_i) * k_0 / m_0,$$

где H_{sw} – отметка уровня в водоеме,

k_0/m_0 – отношение коэффициента фильтрации к мощности донных отложений,

vz – дебаланс вертикальной скорости водообмена между расчетными слоями модели, равный разности интенсивностей перетекания через кровлю и подошву расчетного слоя. При этом интенсивность перетекания через кровлю i -го пласта равна:

$$v_{i-1/2} = k_i - 1 \frac{H_{i-1} - H_i}{m_{i-1/2}}.$$

Для компьютерной реализации модели была выбрана программа моделирования нестационарной пространственной геофильтрации MODFLOW, разработанная в Геологической службе США. Данная программа является наиболее широко используемым в мире инструментом при решении задач геофильтрации. Для облегчения подготовки исходных данных, визуализации результатов моделирования используется программный комплекс PMWIN, позволяющий готовить, вводить исходные данные, запускать расчетную программу MODFLOW и просматривать результаты моделирования в удобной графической среде.

Вычислительная схематизация и начальные значения параметров

Для моделирования выбрана прямоугольная конечно-разностная сетка с постоянным шагом по плановым пространственным координатам равным 50 м.

Сотрудниками ООО ИФ «Интергео» создана фактографическая база данных по имеющимся изыскательским скважинами на данной территории, что позволило проинтерполировать в плане распространение техногенных отложений, высотные отметки кровли, подошвы и мощностей расчетных слоев модели и наличие литологических окон в разделяющем слое микулинских глин.

Начальные значения геофильтрационных параметров строения и взаимосвязи с внутренними и внешними границами выбраны в соответствии с литературными даннымиⁱⁱ и результатам изысканий прошлых лет.

Для задания интенсивности инфильтрационного питания была принята следующая модель его планового распределения:

$$w(x,y) = w_e + \Delta w(x,y), \quad (2)$$

где $w(x,y)$ – интенсивность инфильтрационного питания, попадающая в блок с координатами x и y ,

w_e – интенсивность инфильтрационного питания в естественных условиях,

$\Delta w(x,y)$ – дополнительная величина питания на застроенной территории. При этом предполагалось, что дополнительная величина питания прямо-пропорциональна коэффициенту плотности застройки k_u , представляющему собой отношение площади поверхности покрытой застройкой в данном блоке модели к площади блока.

То есть $\Delta w = \Delta w_{max} \cdot k_u(x,y)$, где Δw_{max} – расчетная максимальная интенсивность техногенного питания при коэффициенте застройки, равном 1. Для задания интенсивности максимальной эвапотранспирации на поверхности земли предполагалось, что этот параметр также связан с коэффициентом застройки территории как:

$$e_{max}(x,y) = e_{max}(1 - k_u(x,y)), \quad (3)$$

где e_{max} – максимальная интенсивность эвапотранспирации, характерная для естественных условий.

Максимальная глубина, при которой эвапотранспирация прекращается, была принята равной 3 м.

Таким образом, для задания интенсивностей инфильтрационного питания и эвапотранспирации для моделируемой территории была создана карта плотности застройки.

Для предварительного анализа условий формирования подземных вод исследуемой территории на модели воспроизведена стационарная геофильтрация при заданном питании и испарении грунтовых вод. В расчете использовалась постоянное по площади значение величины инфильтрационного питания подземных вод $2 \cdot 10^{-4}$ м/сут и испарение грунтовых вод со свободной поверхности линейно убывающем от $1 \cdot 10^{-3}$ м/сут при нулевой глубине залегания уровня до нуля при глубине залегания уровня 3 м от поверхности. Геофильтрационные параметры строения и взаимосвязи с внутренними и внешними границами выбраны в соответствии с результатами изысканий прошлых лет.

3.2 Калибровка модели

Поскольку данные о фильтрационных параметрах, инфильтрационном питании, эвапотранспирации и взаимосвязи с поверхностными водами достаточно условны, то первым этапом моделирования явилась калибровка модели, т.е. подбор расчетных параметров, при которых измеренные и расчетные уровни модели достаточно близки друг другу. Для калибровки были использованы скважины режимной сети и скважины, пробуренные ООО ИФ «Интергео» в 2000 и 2002 годах. Кроме того, использовались 6 изыскательских скважин, расположенных в центральной части модели. Для всех скважин, за исключением скважин, пробуренных в 2002 г., была рассчитана среднесуточная отметка уровня. Для скважин 2002 года брались наблюдаемые значения уровня.

Для калибровки использовалась программа автоматической калибровки PEST, входящая в пакет PMWIN. О качестве калибровки можно судить по графику, связывающему наблюдаемые и модельные отметки уровней. Хорошего совпадения наблюдаемых и модельных уровней не достигнуто. Несмотря на то, что использованные замеры разновременные, в них есть ошибки разной природы, общая тенденция изменения уровней на модели отражена, поэтому результаты калибровки следует признать удовлетворительными.

По полученным при калибровке параметрам было проведено стационарное моделирование распределения уровней подземных вод, результатом которого явилась карта среднесуточных модельных отметок (рис. 4).

Анализ данных моделирования с использованием полученных при калибровке значений параметров показывает, что в рассматриваемых условиях наибольшую роль, по-видимому, играет площадной вертикальный водообмен подземных вод с поверхностными и существенно меньшую роль - латеральный поток в сторону региональных зон разгрузки - озера Неро, р. Пиги и системы внутренних малых водоемов. Так, для рассмотренного варианта суммарное питание подземных вод на модели равно 9708 куб. м в сутки, а величина испарения составляет 8209 куб. м в сутки, то есть около 80% приходной части баланса подземных вод. Суммарная разгрузка в водотоки, водоемы и дрены составляет 1600 куб. м в сутки, следовательно, поток к естественным дренам достаточно мал. Это подтверждается и модельной картой распределения уровней подземных вод (рис. 4), на которой дренирующая роль озера прослеживается на расстоянии 100–300 м от его уреза, а реки Пиги – 50–100 м. Вместе с тем, данная карта четко показывает куполообразное поднятие уровня подземных вод на территории города.

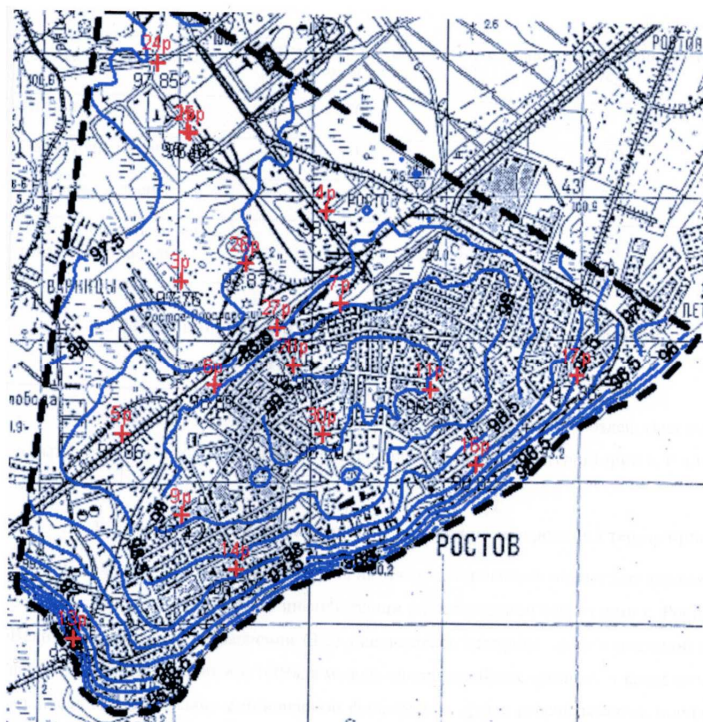
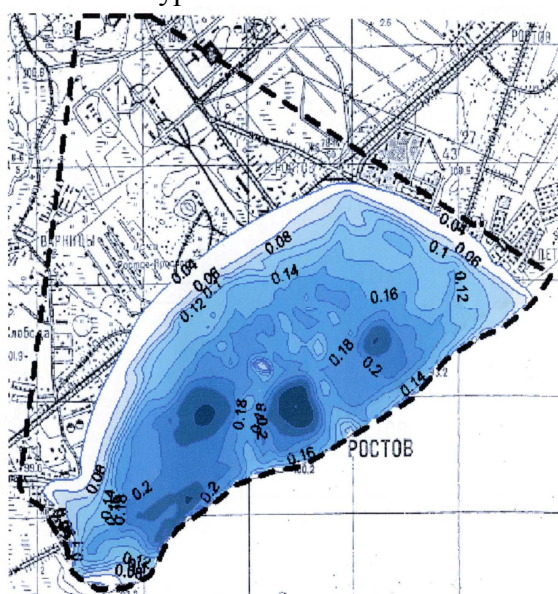


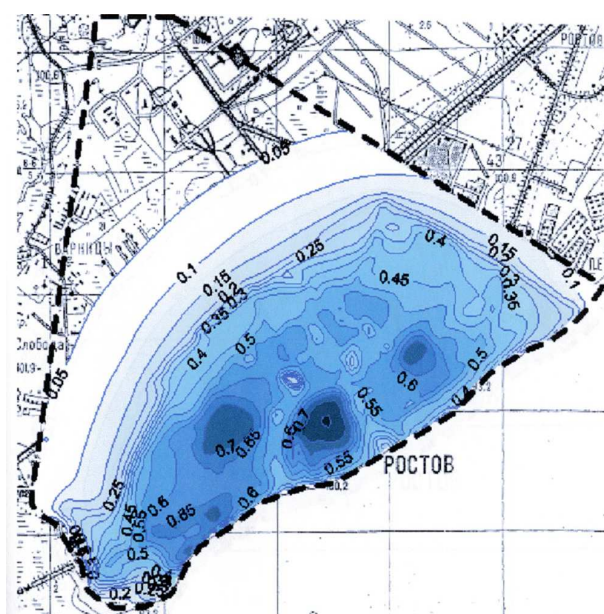
Рис. 4 Карта среднемноголетних модельных отметок уровней верхнего водоносного горизонта, полученная по результатам моделирования по принятым при калибровке модели параметрам

3.3 Модельный анализ мероприятий по инженерной защите территории города от подтопления

В качестве перспективного мероприятия моделировалось понижение уровня за счет снижения дополнительной инфильтрации на застроенной территории г.Ростова Великого. Для этого в уравнении (2) уменьшалась величина дополнительной инфильтрации на 20, 30, 40, 60, 100% в модель вводилось новое питание, а затем производилось моделирование стационарной фильтрации. Далее рассчитывалось понижение уровня подземных вод как разница уровней между вариантом, полученным в процессе калибровки, и текущим вариантом при заданном уменьшении питания. Результаты моделирования представлены на рис. 5. Из данных рисунков следует, что снижение инфильтрации дает заметный эффект понижения уровней.



5.а



5.б

Рис. 5 Понижение уровней подземных вод при снижении дополнительной инфильтрации на застроенной территории на 20 % (5.а) и на 60 % (5.б)

Заключение

Существующая инфраструктура города оказывает существенное влияние на естественный режим подземных вод, происходит рост мощности насыпных грунтов, перепланировка территории, нарушение естественного стока поверхностных вод, утечки из водонесущих коммуникаций и т.д. Все это создает сложную систему взаимодействия поверхностных, техногенных и подземных вод на территории города, которая представляет собой мозаичный пол из разноцветных плиток, расположенных беспорядочно. Решение – создание густой сети режимных скважин для ведения гидромониторинга подземных вод и грамотная организация поверхностного стока территории города. Пока пройден лишь один из намеченных пяти створов. Нет координации выполняемых гидрогеологических работ на территории памятников истории и архитектуры.

Пока нельзя однозначно исключить гидравлическую связь озера и подземного водоносного комплекса; на наш взгляд, это единая гидравлическая система, работающая в одном гидродинамическом режиме. Решение этой проблемы лежит в исследовании региональной гидрологии и гидрогеологии всей котловины озера, а также проведении специальных картировочных буровых работ в прибрежной части озера, которые практически отсутствуют в настоящее время.

Дальнейшее развитие геофильтрационной модели будет происходить по следующим направлениям:

- Калибровка стационарной модели по данными режимных наблюдений за уровнями грунтовых вод (средне многолетние данные);
- Калибровка нестационарной модели;
- Оценка на модели основных среднегодовых приходных и расходных составляющих баланса подземных вод на современный период;
- Сопряжение геофильтрационной модели с моделью поверхностного стока с территории города для оценки эффективности влияния управления поверхностным ливневым и талым стоком на режим подземных вод;
- Создание модели-врезки исторической части города для крупномасштабного моделирования уровней грунтовых вод в исторической части и оценки эффективности влияния дренажных мероприятий (расчистка русла р. Пиги, создание локальных дренажей) на динамику уровней грунтовых вод.

ⁱ Ломакин Е.А., Мироненка В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. М.:Недра, 1988, 228с.

Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.:МГУ, 1995, 368 с.

ⁱⁱ Дзекцер Е.С. Концепция защиты исторического города от подтопления (на примере г. Ростова Великого). Госстрой России, ПНИИИС, М., 1999