9 (1) 2019

= ГЕОИНФОРМАТИКА ===

VДК 624.13+556.3 DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795

# Численное моделирование геофильтрации правобережья реки Дон для обоснования инженерной защиты от подтопления в г. Ростове-на-Дону

#### А.В. Гридневский, к. г.-м. н.

# ФГБОУВО Донской государственный технический университет, Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, е-mail: a328@ya. ru

Аннотация: Строительство на правобережье реки Дон в г. Ростове-на-Дону сопряжено с риском подтопления и высачивания подземных вод. Для обеспечения гидрогеологических прогнозов разработана численная гидрогеологическая модель склона речной долины. Она характеризует геологическую структуру, граничные условия подземного потока и параметры водопроницаемости грунтов. Идентификация гидрогеологических параметров и интенсивности влияния граничных условий выполнены методом многовариантного численного моделирования. Оценены притоки воды к дренажным сооружениям их зависимость от техногенной инфильтрации. Определены параметры неглубоко залегающих скифских глин, при которых они способствуют локальному подъему уровня подземных вод. В статье анализируются гидродинамические процессы в приустьевой части реки Темерник правобережья Дона с целью детализации представлений о гидрогеологической структуре массива грунтов, оценки параметров фильтрации и граничных условий. Полученные результаты использованы для определения водопритока в зоне высачивания к дренажным сооружениям, сопровождающим строительство. Применяемый подход основан на численном гидрогеологическом моделировании, системно учитывающем параметры геофильтрации в их взаимосвязи. Он позволяет учесть факторы геоэкологического риска для разработки эффективных решений в борьбе с подтоплением. Самыми древними отложениями, определяющими инженерно-геологические условия города, являются морские глины нижне-сарматского яруса (*N*<sub>1</sub>*S*<sub>1</sub>) мощностью 10-15 м, служащие региональным водоупором. Глины перекрыты комплексом (15-20м) водопроницаемых трещиноватых известняков сарматского яруса ( $N_1s_2$ ), переслаивающихся известняков и песков мэотического (*N*<sub>1</sub>*m*) и понтического ярусов (*N*<sub>1</sub>*p*). Завершается толща красно-бурыми плотными отложениями (5-15 м) скифских глин (Q<sub>F</sub>sk). Строительство в зоне высачивания создает подпор подземных вод и порождает риск ухудшения геотехнических условий эксплуатации зданий и сооружений: подтопление заглубленных конструкций, смещение по склону водонасыщенного песчано-глинистого грунта.

**Ключевые слова**: численное моделирование геофильтрации, планирование эксперимента, идентификация гидрогеологических параметров, высачивание подземных вод, подтопление.

Для цитирования: А.В. Гридневский Численное моделирование геофильтрации правобережья реки дон для обоснования инженерной защиты от подтопления в г. Ростове-на-Дону // Геология и геофизика Юга России. 2019. Том 9 № 1. С. 150-163. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795.

#### Введение

Территория города Ростова-на-Дону, расположенная на правобережье реки Дон, подтоплена в районах исторического центра, плотной жилой застройки и крупных промышленных предприятий. Причинами подъема уровня грунтовых вод (УГВ) являются как геологические предпосылки (неглубокое залегание водоупорных глин), так и потери из водонесущих коммуникаций. Устройство свайных фундаментов вдоль правого берега Дона создает барражный эффект, трансформирующий разгрузку подземных вод на склоне речной долины. Необходимо отметить, что в городской застройке на рубеже XIX-XX веков учитывался эффект разгрузки подземных вод в реку Дон. С этой целью возводились фундаменты с проемами для пропуска подземных вод [Меркулова, 2006].

9(1)2019

Последние пятнадцать лет в городе застраивается набережная реки Дон. Многоэтажные здания расположены в зоне разгрузки неоген-четвертичных водоносных горизонтов. Строительство ведется с применением инженерных защит. Однако при эксплуатации возведенных объектов проявляется высачивание подземных вод, которое провоцирует деформации склона и зданий (рис. 1). Для повышения качества проектирования необходима разработка более эффективных прогнозов УГВ в прибрежной зоне реки Дон. Расчеты динамики УГВ с учетом техногенного режима выполняются для относительно простых схем методом аналитических расчетов [Прогнозы..., 1991]. Для сложных условий геофильтрации прогнозы разрабатываются на основе более эффективного подхода – численного моделирования [Громов, Пашковский, 2009; Colomboetral., 2017; Dawoudetal., 2006].



Рис. 1. Набережная реки Дон. Высачивание подземных вод: а) на Казанской лестнице, б) из-под фундамента жилого дома / Fig. 1. Embankment of the Don river. Groundwater seepage: a) on the Kazan staircase, b) from under the foundation of a residential building

В статье анализируются гидродинамические процессы в приустьевой части реки Темерник правобережья Дона с целью детализации представлений о гидрогеологической структуре массива грунтов, оценки параметров фильтрации и граничных условий. Полученные результаты использованы для определения водопритока в зоне высачивания к дренажным сооружениям, сопровождающим строительство. Применяемый подход основан на численном гидрогеологическом моделировании, системно учитывающем параметры геофильтрации в их взаимосвязи. Он позволяет учесть факторы геоэкологического риска для разработки эффективных решений в борьбе с подтоплением.

### Анализ изученности

Гидрогеологические условия рассматриваемой территории изучались Волго-Донским территориальным геологическим управлением (Петров П.М., Родзянко Г.Н., Водяницкая Е.И., 1940-1946 гг., Липацкова Е.Н., 1965 г.), Трестом РостовДонТИСИЗ в 1973 [Гидрогеология СССР, 1968, 1970]. Многолетние материалы инженерно-геологических изысканий обобщены Меркуловой К.А. (2006 г.) [Меркулова, 2006]. Силами РостовДонТИСИЗа в 1980-х годах создана сеть гидро-геологических наблюдательных скважин и выполнены режимные наблюдения, разработаны гидрогеологические карты четвертичных и неогеновых отложений. Эти материалы применены для гидрогеологической схематизации.

#### Физико-географические условия

Центральная часть г. Ростова-на-Дону (8х<sup>3</sup> км<sup>2</sup>), расположена на плиоценовой террасе реки Дон и ограничена глубокими речными врезами Темерника, Дона, балок: Безымянной и Кизитериновской. Абсолютные отметки поверхности земли составляют +1,0÷+80,0 м. Долина реки асимметричная – правый склон ее крутой (15°), высотой 50-80 м, левый – пологий, высотой 10-30 м. Для природного рельефа характерна развитая овражно-балочная сеть, большая часть которой была засыпана с развитием города. Климат умеренно-континентальный, среднемноголетнее количество осадков – 570 мм. Самый теплый месяц июль (+23,6°C), наиболее холодный – январь (-4,2°C). Центральная часть города плотно застроена и заасфальтирована, что значительно уменьшает инфильтрацию атмосферных осадков.

# Гидрография

Постоянными водотоками являются реки Дон и Темерник, ручьи балок Безымянной и Кизитериновской. Уровень воды в реке Дон испытывает сезонные колебания (от -0.5 до +1.0 м), и более масштабные – сгонно-нагонные (от -2.0 до +4.0 м), возникающие из-за ветров ( $12\div19$  м/с) восточного и западного направлений. Основным источником питания р. Дон и других рек является таяние снега (70%), преобладающее над поступлением подземных вод и атмосферных осадков. Большая часть города расположена на высоком правом берегу и нечувствительна к колебаниям уровня воды в р. Дон.

# Геологическое строение

Рассматриваемая территория располагается в пределах Ростовского выступа Восточно-Европейской платформы. Докембрийский фундамент залегает на глубине 550 метров под морскими горными породами меловой системы и кайнозойской группы. Самыми древними отложениями, определяющими инженерно-геологические условия города, являются морские глины нижне-сарматского яруса  $(N_1s_1)$ мощностью 10-15 м, служащие региональным водоупором (рис. 1). Глины перекрыты комплексом (15÷20м) водопроницаемых трещиноватых известняков сарматского яруса  $(N_1s_2)$ , переслаивающихся известняков и песков мэотического  $(N_1m)$  и понтического ярусов  $(N_1p)$ . Завершается толща красно-бурыми плотными отложениями (5 $\div$ 15м) скифских глин ( $Q_E sk$ ). В неогене они покрывали общирные пространства, но в четвертичном периоде частично размыты овражно-балочной системой и реками. Наиболее молодые плейстоцен-голоценовые отложения повсеместно представлены эолово-делювиальными лессовидными суглинками, делювиальными суглинками и песчано-глинистым аллювием в долинах рек. Общая мощность четвертичных грунтов на водораздельных пространствах города достигает 25-30 м. В устье реки Темерник, на протяжении четвертичной истории, геологическое стро-



9(1)2019

Рис. 2. Геологическое строение правобережья Дона в приустьевой части реки Темерник: 1 – глины, 2 – пески, 3 – суглинки, 4 – известняки, 5 – лессовые грунты, 6 – техногенные грунты / Fig. 2. The geological structure of the right bank of the Don in the mouth part of the Temernik river: 1 – clay, 2 – sand, 3 – loam, 4 – limestone, 5 – loess soil, 6 – man-made soil

ение правобережья Дона претерпело изменения: горизонтально залегающие морские горные породы были разрушены Темерником, перекрыты аллювием и делювиальными суглинками, слагающими надпойменную террасу (рис. 2).

В этой области мощность четвертичных отложений достигает 40 м. В рельефе склона отсутствуют характерные перегибы, связанные с наличием горизонтально залегающих прочных известняков и плотных глин.

#### Гидрогеологические условия

Подземные воды встречаются в четвертичных лессовидных суглинках, аллювиальных отложениях, неогеновых известняках и песках. Водоносный горизонт грунтовых вод в лёссовидных грунтах подстилается скифскими глинами ( $Q_Esk$ ). Его баланс определяется атмосферными осадками и техногенной инфильтрацией. Четвертичные тяжелые суглинки и погребенные почвы играют роль локальных водоупоров для верховодки. Разгрузка грунтовых вод происходит в неогеновые известняки и пески в гидрогеологических окнах. Абсолютные отметки УГВ меняются от 80 м на водоразделах до 1 м в долинах рек. Интенсивность дренирования грунтовых вод ограничена низкой водопроницаемостью, фильтрационной анизотропией и малыми гидравлическими уклонами.

Неогеновый водоносный комплекс объединяет гидравлически связанные хапровские  $(N_2hp)$ , понтические  $(N_2p)$ , мэотические  $(N_2m)$ , сарматские  $(N_1s)$  песчаники, известняки и пески. Кровля водоупорных сарматских глин располагается на абсолютных отметках 16÷25 м. Свободная поверхность воды достигает отметок 33 м над уровнем моря. Водонасыщенными оказываются трещиноватые и ноздреватые сарматские известняки, остальные неогеновые отложения безводны.



Рис. 3. Гидрогеологические условия четвертичной толщи правобережья р. Дон в приустьевой зоне р. Темерник: 1, 2 – граничные условия I и II рода соответственно; 3 – дрена; 4 – горизонтали; 5 – гидроизогипсы (май 2000 г.) /

Fig. 3. Hydrogeological conditions of the Quaternary stratum of the right bank of Don river in the estuary area of the Temernik river: 1, 2 – boundary conditions of the I and II type, respectively; 3 – drain; 4 – horizontals; 5 – hydroisohypses (May 2000)

На пологом восточном склоне долины реки Темерник грунтовые воды залегают в виде единого комплекса, насыщая делювий и террасовые глинистые отложения реки, что отражается в структуре гидроизогипс (рис. 3).

По результатам откачек, выполненных РостовДонТИСИЗ в разные годы, значения коэффициента фильтрации верхнечетвертичных суглинков составляют 0,5÷0,6 м/сут., среднечетвертичных суглинков – 0,2÷0,3 м/сут., нижнечетвертичных – 0,01÷0,05 м/сут., четвертичного аллювия – 0,8÷0,9 м/сут. Коэффициент вариации параметров (V=0,4÷0,7) рассчитан для 55 определений и указывает на высокую фильтрационную неоднородность толщи. Водопроницаемость песчаников и известняков миоцена меняется от 2÷7 до 100 м/сут. из-за их неравномерной трещиноватости и кавернозности [Меркулова, 2006].

В ходе анализа установлено, что гидрогеологические условия сформировались под действием ряда изменчивых факторов, относительную роль которых предстоит выяснить. Для идентификации фильтрационных параметров водоносной толщи в переделах рассматриваемого участка города и выяснения относительной роли граничных условий в балансе подземных вод азработана численная гидрогеологическая модель. Она описывает фильтрацию воды в пористой среде и реализуется дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка [Гавич, 1988]. Его решение выполнялось методом конечных разностей по алгоритму, реализованному в программах *Processing Modflow, Visual modflow* [Chiang, Kinzelbach, 2000].

# Параметры гидрогеологической модели

Структура геофильтрации осложняется неоднородностями толщи и влиянием граничных условий. При построении модели избран путь ее поэтапного усложне-

ния. Вначале водопроницаемая толща представляется моделью однородного водоносного горизонта, далее – усложняется деталями фильтрационной неоднородности и граничных условий.

Область исследования площадью 0,5×0,8 км<sup>2</sup> расположена к востоку от устья реки Темерник на правом берегу реки Дон. Ее структура существенно отличается от остальной части правобережья Дона в городе. Благодаря эрозионно-аккумулятивной деятельности Темерника отложения неогена разрушены и замещены глинистыми грунтами. В области фильтрации выделен безнапорный водоносный горизонт аллювиально-делювиальных четвертичных отложений мощностью 10÷55 м. Водоупором служат нижне-сарматские глины ( $N_1s_1$ ). Значения коэффициентов фильтрации (Кф=0,6÷0,9м/сут.) оценены по опытным откачкам, выполненным в ходе изысканий для строительства. Большие перепады гидростатических напоров по площади, а также их изменения при расчетах приводят к переменному осушению-увлажнению блоков модели, что учитывается вертикальной дискретизацией толщи с шагом 1-3 м и моделированием эффекта подъема уровня воды в ненасыщенные (сухие) блоки [Меркулова, 2006; HongzeGao, 2011]. Коэффициент водоотдачи принят равным 0,2. Западная и южная границы модели заданы граничным условием І-рода по руслам рек Дон и Темерник (рис. 3). Абсолютные отметки поверхности воды и параметры русел рек заданы на основании топографической карты. Фильтрационные сопротивления ложа рек (K<sub>ф</sub>=0,05÷0,2 м/сут.) приняты на основании откачек, выполненных в непосредственной близости от русла, и подлежат уточнению в ходе моделирования. Северная граница модели задана водонепроницаемой по водоразделу между балками (рис. 3). Балка Генеральная (север участка) дренирует поток грунтовых вод. Вдоль нее задано граничное условие IIIрода. Абсолютные отметки уровней дренирования определены на три метра ниже гипсометрических отметок тальвега балки, где расположен дренажный коллектор. Коэффициент фильтрации дрены оценивается в интервале K<sub>b</sub>=0,3÷0,9 м/сут. и подлежит уточнению в ходе моделирования. Через северо-восточную границу участка направлен поток, подземных вод, который разгружается в речную систему. На модели он реализован «наливом» в граничных узлах модели. Интенсивность потока зависит от техногенного питания и определяется решением обратных задач на основе планирования эксперимента и оценивается предварительно в интервале Q=900÷1300 м<sup>3</sup>/сут. Инфильтрация воды в грунт зависит от интенсивности атмосферных осадков (570 мм/год для г. Ростова-на-Дону), водопроницаемости техногенного поверхностного слоя грунтовой толщи и потерь из водонесущих коммуникаций. Сложность в оценке величины инфильтрации в городской среде определяется слабой водопроницаемостью поверхностного техногенного слоя и техногенными потерями воды. Предварительно объем инфильтрации оценивается в интервале 200÷600 мм/год.

Дальнейшие исследования включали калибровку модели, оценку объема потока воды через северо-восточную границу модели, объема техногенных потерь воды, прогнозных расчетов УГВ и притоков воды к дренажным системам. Оценка погрешности получаемых результатов определена по среднеквадратическим отклонениям фактических значений УГВ относительно соответствующих точек карты гидроизогипс, генерализующей их значения. Согласно выполненным расчетам величина принимаемой погрешности составляет 1,8 м.

# Калибровка модели. Первый этап

Идентификация параметров модели выполнена подбором значений, при которых обеспечивается наилучшее сходство модельной и фактической поверхностей УГВ. С этой целью выбрано многовариантное решение ряда имитационных задач. Сходство расчетных и фактических значений УГВ оценивалось по карте гидроизогипс 1975 года. Их сравнение выполнялось по средним отклонениям в 21 точке наблюдения (рис. 4). Калибровка модели выполнялась в стационарном режиме фильтрации. Влияние факторов анализировалось методом планирования эксперимента [Адлер и др., 1976]. В таблице 1 приведена матрица экспериментов для 4-х факторов, представляющая собой полуреплику полного факторного ортогонального, ротатабельного плана  $2^{4-1}$ . На модели проанализированы ключевые факторы сложившихся гидрогеологических условий: водопроницаемость грунтов, дренирующая роль рек и крупного эрозионного вреза (балка Генеральная), объема инфильтрации воды. При этом считалось, что потери техногенных вод оставались до 1975 года стабильными. Области определения (диапазоны значений) факторов ( $x_i$ ) указаны выше и приведены в таблице 1.

N	<i>x</i> <sub>0</sub>	<i>x</i> <sub>1</sub>		<i>x</i> <sub>2</sub>		<i>x</i> <sub>3</sub>		<i>x</i> <sub>4</sub>		$x_1 x_2$	<i>x</i> <sub>2</sub> <i>x</i> <sub>3</sub>	$x_1 x_3$	
		код	м/сут	код	м/сут	код	м/сут	код	м <sup>3</sup> /сут	код	код	код	у, м
1	1	-1	0,5	-1	0,3	1	0,2	1	600	1	-1	-1	35,7
2	1	1	0,9	-1	0,3	-1	0,05	1	600	-1	1	-1	53
3	1	-1	0,5	1	0,9	-1	0,05	1	600	-1	-1	1	2,7
4	1	1	0,9	1	0,9	1	0,2	1	600	1	1	1	1,3
5	1	-1	0,5	-1	0,3	-1	0,05	-1	200	1	1	1	21,1
6	1	1	0,9	-1	0,3	1	0,2	-1	200	-1	-1	1	11,6
7	1	-1	0,5	1	0,9	1	0,2	-1	200	-1	1	-1	1,3
8	1	1	0,9	1	0,9	-1	0,05	-1	200	1	-1	-1	4,6
<b>b</b> <sub>j</sub>	16,4	1,05		13,9		3,94		6,76		0,74	2,76	7,24	

Матрица планирования эксперимента / Experiment planning matrix

Таблица 1 / Table 1.

Значения параметров в таблице: *у* – среднее отклонение фактических и расчетных значений гидростатических напоров в точках наблюдения, м;  $x_1$  – коэффициент фильтрации грунтов водоносного горизонта, м/сут.;  $x_2$  – коэффициент фильтрации дрены (балка), м/сут.;  $x_3$  – коэффициент фильтрации русла реки, м/сут.;  $x_4$  – величина инфильтрации воды в грунт, мм/год;  $b_j$  – коэффициенты уравнения регрессии; ±1 – кодовые значения факторов планирования эксперимента.

В ходе численных экспериментов рассчитаны параметры регрессионного уравнения (1), выражающего зависимость средней невязки фактических и расчетных гидростатических напоров от вариации параметров гидрогеологической модели:

$$y = 16,4+1,05x_1-13,9x_2-3,94x_3+6,76x_4-0,741x_1x_2+2,76x_2x_3-7,24x_1x_3,$$
(1)

где параметры *у*, *x*<sub>i</sub>соответствуют обозначениям таблицы 1.

Величина коэффициентов уравнения интерпретируется, как сила влияния факторов, в пределах их области определения, на сходство модельных и фактических УГВ. Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на формирование потока оказывает дренирующая роль эрозионных врезов балки ( $b_2$ =-13,9) и рек ( $b_3$ =-3,94), а также инфильтрационное питание ( $b_4$ =6,76). Следует отметить, что дрена (балка Генеральная) существенно деформирует поток. В 1898 году вдоль балки проложен первый центральный коллектор ливневой канализации, который до сих пор отводит поверхностные и грунтовые воды в реку Темерник. Существенным оказывается совместное влияние водопроницаемостей русел рек и водоносного горизонта ( $b_{13}$ =7,24).

9(1)2019

Воспользуемся полученной в ходе серии экспериментов, зависимостью и выберем оптимальные по заданному критерию параметры геофильтрации:  $x_1=0,6$  м/сут.,  $x_2=1,0$  м/сут.;  $x_3=0,05$  м/сут.;  $x_4=400$  мм/год. Анализ полученного решения показывает, что повышение достоверности модели может быть достигнуто режимными наблюдениями в непосредственной близости от дрен.

Второй этап. Уточнение расхода потока подземных вод с северо-восточной границы. Приток воды через границу рассматриваемой модели влияет на водный баланс, поэтому необходимо оценить его объем. Интенсивность притока определена методом решения серии обратных задач. Критерием достижения лучшего результата считалось максимальное сходство фактических и модельных напоров. Результаты моделирования при стационарном режиме фильтрации показаны на рисунке 4. Расчетная величина потока через северо-восточную границу (Q=1000 м<sup>3</sup>/ сут.) распределена на модели в 40 узлах (рис. 3).



Puc. 4. Карта гидроизогипс по данным на 01.05.1975 г.: 1 – гидроизогипсы на расчетной модели, 2 – фактические данные, 3 – наблюдательные скважины /
 Fig. 4. Map of hydroisohypses according to data of 01/05/1975: 1 – hydroisohypses on the computational model, 2 – actual data, 3 – observation wells

Полученное распределение гидростатических напоров послужило основой для более детальной идентификации параметров модели, а также определения начальных условий в исследованиях нестационарного режима фильтрации.

Анализ динамики процесса по фактическим данным за 1975-2000 годы указывает на колебания УГВ с тенденцией роста на большей части рассматриваемой территории (рис. 5). Так, за период 1988-2000 гг. гидроизогипса с отметкой +20,0 м переместилась на 300-400 м к руслам рек. Гидроизогипса с отметками +40,0 м распространилась к реке Темерник вдоль водораздела. Гидроизогипса +30,0 м оставалась стабильной. Необходимо заметить, что уровень воды с отметкой +10,0 м удалился от природных дрен и указывает на локальное понижение УГВ. Сегодня отсутствуют свидетельства о предпринятых усилиях по водопонижению в этой части рассматриваемого района, поэтому необходимы уточняющие натурные исследования для выяснения причин этого феномена.

**Третий этап. Оценка влияния скифских глин на формирование УГВ.** Обращает внимание стабильное и высокое положение уровня подземных вод ( $+30 \div +45$  м) в северо-восточной части рассматриваемой территории с 1975 по 2000 годы (рис. 5). Анализ геологического строения указывает на присутствие здесь эродированных отложений скифских глин ( $Q_Esk$ ). Они имеют максимальную мощность 12 м и размыты в крупных балках и речных долинах. В местах выклинивания глин гидравлические уклоны потока увеличиваются, а далее – в центральной части территории – вновь снижаются. Глины являются локальным водоупором с кровлей на глубине 12-15 метров (рис. 2 и 5). Грунтовые воды над ними быстро пополняются и долго удерживают уровень. На периферии глин уровень понижается из-за разгрузки в более глубокий плиоценовый водоносный горизонт.



Рис. 5. Динамика уровней грунтовых вод за период 1975-2000 гг.; гидроизогипсы: 01.01.1975 г. – пунктирная линия; 30.12.1988 г. – штриховая линия; 01.05.2000 г. – сплошная линия, диагональная штриховка – скифские глины (Q<sub>E</sub>sk) /

*Fig. 5. Dynamics of groundwater levels for the period 1975-2000; hydroisohypses: 01.01.1975 – dotted line; 30.12.1988 – dashed line; 01.05.2000 – solid line, diagonal hatching – Scythian clay (Q<sub>E</sub>sk)* 

Методом планирования многофакторного эксперимента на разработанной модели исследована зависимость положения УГВ от водопроницаемости скифских глин (в интервале 0,002-0,6 м/сут.) и интенсивности инфильтрационного питания (в интервале 300-600 мм/год). Важно было оценить относительное влияние этих двух факторов на образование купола подземных вод. В качестве критерия адекватности модели принято сходство фактических и расчетных УГВ. Результаты моделирования отображаются уравнением (2):

$$y = -0, 2 - 0, 15x_1 + 2, 25x_2 + 0, 002x_1x_2,$$
<sup>(2)</sup>

где *у* – среднее значение разницы фактических и расчетных значений гидростатических напоров в точках наблюдения; *x*<sub>1</sub> – коэффициент фильтрации скифских глин, м/сут.; *x*<sub>2</sub> – величина инфильтрации воды, мм/год.

Коэффициенты регрессии уравнения показывают, что эффект образования купола подземных вод в большей степени зависит от инфильтрации воды, чем от водопроницаемости глин. Объясняется это близким расположением водонепроницаемой толщи к поверхности земли. Однако при увеличении на модели объема инфильтрации происходит общий подъем УГВ и существенное рассогласование расчетных значений гидростатических напоров с фактическими наблюдениями. Согласно расчетам, стабильное возвышение УГВ над скифскими глинами формируется, если их коэффициенты фильтрации составляют 0,005-0,003 м/сут. при сохранении фоновой величины инфильтрации 400 мм/год. На основании моделирования можно сделать вывод о влиянии скифских глин на локальное повышение УГВ в зоне аэрации.

Таким образом, численные эксперименты позволили шаг за шагом уточнить параметры граничных условий и особенности влияния геологического строения на формирование потока подземных вод. Теперь модель отражает динамику УГВ за период с 1975 по 2000 годы.

# Оценка интенсивности высачивания в дренажных сооружениях

На следующем этапе оценивался приток воды к дренажным сооружениям на уровне набережной реки Дон. По опыту застройки большинство возводимых объектов располагаются здесь на абсолютных отметках  $+6,0 \div +10,0$  м. Из-за устройства в зданиях подземных помещений перехват воды осуществляется на отметках  $+2,0 \div +3,0$  м.

Притоки воды к дренам на набережной зависят от двух причин: локальных гидрогеологических условий и эволюции УГВ на водораздельном склоне. Важной составляющей баланса подземных вод являются техногенные потери воды. По данным РостовДонТИСИЗа, в 1988 году отбор воды наиболее крупными потребителями рассматриваемого района составил 2775000 м<sup>3</sup>/год. При площади застроенной территории 700х2000 м<sup>2</sup>=1400000 м<sup>2</sup> и проникновении всей воды в грунт указанный объем соответствует инфильтрации 1000\*2775000/1400000 = 1980 мм/год. Износ труб водопроводных сетей коммуникаций приводит к утечкам 10-15% воды. Следовательно, максимальное дополнительное питание от техногенных вод может достигать 200-300 мм/год. Можно полагать, что наиболее вероятной причиной колебаний УГВ, отображенных на картах 1975-2000 гг., является потеря воды из водонесущих коммуникаций. Для оценки объемов подземных вод, разгружающихся на набережной, рассмотрено два режима геофильтрации: при минимальных и наиболее высоких значениях УГВ на водораздельном склоне, сложившихся в 1975 и 2000 годах соответственно. Исследование на модели вариантов питания водоносного горизонта показало, что эволюции УГВ за период 1975-2000 гг. лучше всего соответствует нарастание инфильтрации от 400 до 600 мм/год. Изменения расчетных и фактических значений гидроизогипс показаны на рисунке 6. Расчетный водный баланс к 2000 году сформировался следующим образом: притоки в реки 4140 м<sup>3</sup>/сут., в балку и дрены – 3000 м<sup>3</sup>/сут., инфильтрация – 6150 м<sup>3</sup>/сут., приток через северо-восточную границу – 1025 м<sup>3</sup>/сут.

Определение объемов разгрузки подземных вод выполнено для схемы заложения дрены с длиной 60 м, с абсолютной отметкой дна +2,0 м, фильтрационным сопротивлением, равным водопроницаемости водоносного горизонта. Для гидрогеологических условий, сложившихся к 1975 году, расчетный приток воды, составил 130 м<sup>3</sup>/сут.



Рис. 6. Сравнение уровней грунтовых вод: a – 01.01.1975 г., б – 01.05.2000 г.; гидроизогипсы: расчетные – штрих-пунктирные линии, фактические – пунктирные линии / Fig. 6. Comparison of groundwater levels: a – 01.01.1975, b – 01.05.2000; hydroisohypses: calculated – dash-dotted lines, actual – dotted lines

С увеличением инфильтрационного питания на 100 мм/год каждые 12-13 лет поступление воды возростало на 18-20% и достигло через 25 лет 190 м<sup>3</sup>/сут. или 3,2 м<sup>3</sup>/сут. на погонный метр. При этом величина инфильтрационного питания, с учетом техногенных потерь, составила 600 мм/год.

Таким образом, имитация на модели крайних вариантов инфильтрационного питания позволила оценить наибольший и наименьший объемы воды, поступающей в дренажные сооружения на рассматриваемом участке.

### Обсуждение

Четвертичная история водосборного бассейна реки Дон в рассматриваемом районе существенно изменила морфологию фильтрационного потока подземных вод. Вместо структурно упорядоченных в ходе морского осадконакопления осадков сформировалась толща неоднократно эродированных и замещенных аллювиальных, эолово-делювиальных и морских грунтов. Это обстоятельство значительно повысило фильтрационную неоднородность массива, которая обнаружилась в ходе опытно-фильтрационных работ. Большое количество факторов, определяющих динамику подземных вод, осложняет идентификацию параметров геофильтрации, поэтому она выполнена поэтапно с использованием многовариантного моделирования. Расчеты оптимизированы методом планирования эксперимента. Модель верифицирована по критерию минимального расхождения фактических и модельных значений УГВ. С помощью имитационного моделирования обоснованы морфологические особенности потока подземных вод и уточнены фильтрационные параметры, обусловленные залеганием локального водоупора и рядом граничных условий. Исследованиями на модели установлена интенсивность нарастания техногенного инфильтрационного питания, что послужило основой для расчетов его влияния на величину разгрузки подземных вод в дренажные сооружения на набережной реки.

9(1)2019

Для калибровки модели и идентификации локальных фильтрационных неоднородностей водоносного горизонта необходимо формирование структуры наблюдательных скважин, достаточно чувствительной к локальным изменениям потока подземных вод. В таком случае моделирование является инструментом, эффективного планирования опытно-фильтрационных работ и формирования схемы размещения наблюдательных скважин.

Необходимо отметить, что геологическое строение и фильтрационная структура правобережья Дона существенно меняются. Поэтому использование модели для других районов города должно сопровождаться уточнением ее параметров.

Строительство в зоне высачивания создает подпор подземных вод и порождает риск ухудшения геотехнических условий эксплуатации зданий и сооружений: подтопление заглубленных конструкций, смещение по склону водонасыщенного песчано-глинистого грунта. Для повышения достоверности гидрогеологических прогнозов необходимы мероприятия по организации эффективного систематического мониторинга УГВ и разработке численных моделей геофильтрации.

#### Заключение

Разработанная модель повышает достоверность информации о параметрах геофильтрации, так как описывает гидродинамику на большой территории, учитывая взаимовлияние ряда граничных условий: рек, балки, техногенных потерь воды и локальных водоупоров. Моделирование позволило уточнить фильтрационную структуру толщи и значительно сузить разброс параметров, определяемых в ходе изысканий. Объемы водопротоков к дрене рассчитаны для широкого диапазона изменений режима УГВ и могут корректироваться в зависимости от складывающегося баланса подземных вод.

Разгрузка воды на набережной реки несет риск переувлажнения или подтопления заглубленных помещений зданий. В каждом проекте необходимо оценивать геологический риск для инженерных сооружений в зависимости от типа фундамента, геологического строения, и прогноза УГВ. Разработанная модель применима для планирования застройки территории с эффективными системами инженерной защиты.

#### Литература

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

2. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. – М. – 1988. – 347 с.

3. Гидрогеология СССР. Том IX. Северный Кавказ / Сидоренко А. В. (гл. ред.) и др. – М.: Недра, 1968. – 488 с.

9(1)2019

4. Гидрогеология СССР. Т. XXVIII. Нижний Дон и Северо-Восточное Предкавказье. – М.: Недра, 1970. – 224 с.

5. Громов В.Е., Пашковский И.С. Геофильтрационная модель Имеретинской низменности для проектирования инженерной защиты территории и олимпийских объектов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. – № 3. – С. 214-227.

6. Меркулова К.А. Инженерно-геологические условия г. Ростова-на-Дону. – Ростов-н/Д: Изд-во РГПУ, 2006. – 132 с.

7. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: справочное пособие к СНиП 2.06.15-85. – М.: Стройиздат, 1991. – 182 с.

8. Chiang, W.-H. and Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. – Berlin: Springer, 2000. – 342 p.

9. Colombo, L., Gattinon P. and Scesi L. Influence of underground structures and infrastructures on the groundwater level in the urban area of Milan, Italy // Int. J. of Sustainable Development and Planning. -2017. – Vol. 12. No. 1. – Pp. 176-184.

10. Dawoud, M. A., van Wonderen J., Nahed E. El Arabi and A. R. Khater. Impact of rehabilitation of Assiut barrage, Nile River, on groundwater rise in urban areas // Journal of African Earth Sciences, August 2006, 45 (4-5). – Pp. 395-407.

11. Hongze Gao. Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions // Procedia Earth and Planetary Science 3 (2011). – Pp. 23-28.

=GEOINFORMATICS ======

DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795

Numerical simulation of the filtration process in the right-bank of the river Don for protection the buildings against rise of groundwater in the city of Rostov-on-Don

A.V. Gridnevskiy, Cand. Sci. (Geol.-Min.)

Don State Technical University, 1 Gagarin Sqr., Rostov-on-Don 344000, Russia e-mail: a328@ya. ru

Abstract. Construction on the right bank of the river of Don in Rostov-on-Don is associated with a risk of flooding and seepage. To provide hydrogeological forecasts, a numerical hydrogeological model of the river valley slope has been developed. It characterizes the geological structure, the boundary conditions of the underground

flow, and the parameters of the permeability of the soils. The identification of hydrogeological parameters and the intensity of the influence of boundary conditions are performed by the method of multivariate numerical simulation. Inflows of water to drainage structures are estimated, their dependence on man-caused infiltration. According to calculations, shallow-lying Scythian clays provide a local rise of the groundwater level. The article analyzes the hydrodynamic processes in the mouth of the Temernik river on the right bank of the Don with the aim of detailing the hydrogeological structure of the soil mass and estimating filtration parameters and boundary conditions. The obtained results were used to determine the water inflow in the seepage area to the drainage facilities accompanying the construction. The mentioned approach is based on numerical hydrogeological modeling, systematically taking into account the parameters of geological filtration in their relationship. It allows taking into account the factors of geoecological risk for the development of effective solutions to protect against flooding. The oldest sediments that determine the engineering and geological conditions of the city are the sea clays of the Lower Sarmatian layer ( $N_1s_1$ ) with a thickness of 10-15 m, serving as a regional aquifer. Clays are covered with a complex (15-20 m) of permeable fractured limestones of the Sarmatian layer ( $N_1s_2$ ), interbedded limestones and sands of the Meotian  $(N_1m)$  and Pontian layers  $(N_1p)$ . The stratum ends with red-brown dense sediments (5-15 m) of Scythian clays ( $Q_{F}sk$ ). Construction in the outflow zone creates a groundwater ascent and generates the risk of deterioration of the geotechnical conditions for the operation of buildings and structures: flooding of buried structures, displacement along the slope of water-saturated sandy-clay soil.

9(1)2019

**Keywords:** numerical modeling of geological filtration, experimental design, identification of hydrogeological parameters, seepage of groundwater, flooding.

**For citation: A. V. Gridnevskiy** Numerical simulation of the filtration process in the right-bank of the river don for protection the buildings against rise of groundwater in the city of Rostov-on-Don. *Geology and Geophysics of the South of Russia.* 2019;9 (1): 150-163. (In Russ.) DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26795.

# References

1. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planning an experiment when searching for optimal conditions. M. Nauka, 1976. 280 p. (in Russ.)

2. Gavich I.K. Hydrogeodynamics. M. 1988. 347 p. (in Russ.)

3. Hydrogeology of the USSR. Vol. IX. North Ciscaucasia. Sidorenko A. V. (Chief Editor) i dr. M. Nedra, 1968. 488 p. (in Russ.)

4. Hydrogeology of the USSR. Vol. XXVIII. Lower Don and North-Eastern Ciscaucasia. M. Nedra, 1970. 224 p. (in Russ.)

5. Gromov V.E., Pashkovskij I.S. Geofiltration model of the Imereti lowland for the design of engineering protection of the territory and the Olympic facilities. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology..2009. No. 3. pp. 214-227. (in Russ.)

6. Merkulova K.A. Engineering geological conditions of the Rostov-on-Don city. Rostovn/D. Izd-vo RGPU, 2006.132 p. (in Russ.)

7. Groundwater level growth forecasts and calculation of drainage systems in built-up and being built areas: a reference guide to SNiP 2.06.15-85. M. Stroiizdat, 1991. 182 p. (in Russ.)

8. Chiang, W.-H. and Kinzelbach W.. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. – Berlin: Springer, 2000. – 342 p.

9. Colombo, L., Gattinon P. and Scesi L. Influence of underground structures and infrastructures on the groundwater level in the urban area of Milan, Italy. Int. J. of Sustainable Development and Planning. 2017. Vol. 12. No. 1. pp. 176-184.

10. Dawoud, M. A., van Wonderen J., Nahed E. El Arabi and A.R. Khater. Impact of rehabilitation of Assiut barrage, Nile River, on groundwater rise in urban areas. Journal of African Earth Sciences, August 2006, 45 (4-5). pp. 395-407.

11. Hongze Gao. Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions. ProcediaEarthandPlanetaryScience 3 (2011).pp. 23-28.