

УДК 624.131

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА УЧАСТКЕ НАБЕРЕЖНОЙ РЕКИ КАМЫ В ГОРОДЕ ПЕРМИ

Пургина Дарья Валерьевна,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: purgina_darya@mail.ru

Строкова Людмила Александровна,

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии,
инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: strokova@sibmail.com

Кузеванов Константин Иванович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии,
инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: kki@tpu.ru

Актуальность темы обусловлена необходимостью усовершенствования подходов к прогнозу и защите территорий от подтопления и сопутствующих процессов. Городское строительство, плотность застройки, подземные коммуникации, изменение естественного рельефа кардинально меняет естественную геологическую среду в границах осваиваемой территории. Под воздействием ряда факторов (застройки территорий, уплотнения горных пород под нагрузкой инженерных сооружений) формируются новые горизонты техногенной верховодки.

Целью исследования является изучение геологических, гидрогеологических и гидродинамических условий для долгосрочного прогноза их изменения при строительстве дополнительных подпорных стенок вдоль набережной реки Камы и краткосрочных – на период половодья.

Методика исследования. Исходными данными для изучения являются полевые материалы ОАО «Сибгипротранспут», полученные в 2013–2014 гг. при непосредственном участии Д.В. Пургиной в изучении инженерно-геологических и гидрогеологических условий на всех этапах изысканий. В процессе работы пробурено 66 скважин (из них четыре горизонтальные и две наклонные), пройдено 20 шурфов, отобрано более 600 проб. При полевых исследованиях грунтов применялось статическое и динамическое зондирование, испытание грунтов методом вращательного среза и штампами (статическими нагрузками). Для получения достоверных оценок фильтрационных параметров проведены две кустовые и пять одиночных опытных откачек. Выполнена гидрогеологическая съемка участка, при этом описано более 50 точек наблюдения. В лабораторных условиях определен полный комплекс физико-механических свойств грунтов. Для грунтов, расположенных выше уровня грунтовых вод, определен коэффициент фильтрации при стандартном уплотнении. Основным методом оценки влияния новых подпорных стенок или изменения условий питания подземных вод являлось численное моделирование с использованием решающего модуля, реализующего алгоритм решения дифференциального уравнения нестандартной плановой фильтрации по методу конечных разностей [1]. В качестве препроцессоров применялись программные комплексы Surfer и AutoCad.

Результаты. Детально изучены гидрогеологические и гидродинамические условия участка изысканий. Создана гидродинамическая численная модель. Составлен прогноз изменения уровня подземных вод при подъеме уровня поверхностных вод в период половодья. Построена карта прогнозного подтопления участка. Изучен подпор подземных вод в существующей стенке. Дана оценка возможности возникновения барражного эффекта при строительстве новых подпорных стенок. Разработаны рекомендации по оптимальному заглублению свайных ростверков на данной территории.

Ключевые слова:

Опытно-фильтрационные работы, математическое моделирование, геоинформационные системы, барражный эффект, подтопление, Modflow, оползень, подпорная стенка, суффозия, крип.

Введение

В настоящее время процесс подтопления захватывает все большие площади городов России [2], что влечет за собой колоссальные потери как в социальном, экономическом, так и в экологическом планах, и призывает нас к более углубленному изучению и усовершенствованию подходов к прогнозу и защите территорий от негативного воздействия подтопления и сопутствующих процессов [3].

В городе Перми можно наблюдать процессы-маркеры, которые указывают на подъем уровня грунтовых вод [4]. Например, появление воды в подвалах зданий [5] (рис. 1) способно нанести непоправимый вред не только отдельным зданиям, но и кварталам жилой застройки. В этом отношении показателен оползень, сошедший в 2012 г. на набережную р. Камы, который снес подпорную стенку высотой около 3,0 м и отрезок двухпутной же-

лезной дороги длиной 32 м, что потребовало экстренной мобилизации сотрудников железной дороги для ликвидации последствий (рис. 2).



Рис. 1. Вода в подвале здания вокзала

Fig. 1. Water in the basement of the building station



Рис. 2. Фрагмент правой части подпорной стенки, восстановленной после схода оползня

Fig. 2. Fragment of the right side of the retaining wall

Менее разрушительные процессы, такие как крип, суффозия [6], можно наблюдать в непосредственной близости от р. Камы (рис. 3, 4). Отмеченные факты позволяют утверждать, что подземные воды на данной территории оказывают разрушающее воздействие на грунтовые массивы и требуют дальнейшего изучения [7].

В 1998 г. «ВерхнекамГИСИЗ» выполнена большая работа по изучению процесса подтопления в городе. Итогом этих исследований явилась схематическая карта распространения опасных геологических процессов, в том числе процесса подтопления, на территории города Перми. При этом большая часть изученных жилых районов была отнесена к территориям благоприятным и условно благоприятным для строительства. Однако выделяются и неблагоприятные для строительного освоения участки. Инженерно-геологическая изученность территорий, даже в границах одного жилого района, является крайне неравномерной и тесно связана с плотностью застройки.

Гидрогеологические условия

В 2013 г. институтом «Сибгипротранспуть» (г. Новосибирск) в Перми проведены инженерно-геологические изыскания, обусловленные необходимостью реконструкции автодорожного путепровода на железнодорожной линии Пермь 1 – Пермь 2. На период обследования (03.08–24.11.2013) были детально изучены инженерно-геологические и гидрогеологические условия территории.

По генезису на участке изысканий выделяются верхнеплейстоценовые аллювиальные отложения II надпойменной террасы р. Камы (aQ_{III}) и отложения коры выветривания песчаников и аргиллитов (P_{sl+ss}), перекрытые с поверхности техногенными отложениями (tQ_{IV}) (рис. 5). По результатам полевых, лабораторных работ и последующей статистической обработки полученных данных, в пределах глубины изучения разреза выделено 59 инженерно-геологических элементов в соответствии с требованиями ГОСТ 20522–2012.



Рис. 3. Пьяный лес вследствие сползания склона (крип)

Fig. 3. Drunken forest due to sliding on the slope (creep)



Рис. 4. Проседание и деформация плит в результате суффозионных процессов

Fig. 4. Subsidence and deformation of the building boards as a result of suffusion processes

Гидрогеологические условия территории определяются следующими особенностями [8]:

- резкой фациальной изменчивостью четвертичных отложений, обуславливающей незакономерное изменение их фильтрационных свойств, наличие в разрезе относительно водоупорных пород, разделяющих водоносные толщи, и наличие песчаных окон, способствующих гидравлической взаимосвязи горизонтов;
- небольшой глубиной вреза современной эрозионной сети, не всегда прорезающей водоупорные толщи, что определяет напорно-безнапорный режим вод четвертичных отложений;
- взаимосвязью вод четвертичных отложений между собой, а также с подземными водами дочетвертичных отложений и водами поверхностных водоемов и водотоков.

В гидрогеологическом разрезе участка работ, в соответствии с её геологическим строением, выделены водоносные комплексы: водоносный комплекс четвертичных отложений (порово-грунтовый) и верхнепермский шешминский (eP_{2sl}) (трещинно-поровый), а также воды, вскрытые в техногенных отложениях. Все воды взаимосвязаны между собой и имеют спорадическое распространение в районе работ.

В границах изучаемого участка положение зеркала грунтовых вод находится на абсолютных отметках – 91,50...104,76 м. Глубина залегания подземных вод изменяется в пределах 0,5...12,2 м. Перепад абсолютных отметок составляет 13,26 м. Фильтрационный поток направлен к руслу реки, а его гидравлический уклон составляет 0,0608 (рис. 5). Уровень воды р. Камы на период изысканий изменялся в диапазоне 87,69...87,72 м. Наивысшие уровни – в районе автодорожного моста – 93,48 м. При данных уровнях часть Камской долины была затоплена, уровни водотоков находились в подпоре от уровней р. Камы на большом протяжении [9].

Методы исследования

Для получения достоверной оценки фильтрационных параметров водоносных горизонтов был выполнен комплекс опытно-фильтрационных работ, необходимых для получения обоснованных прогнозных оценок изменений гидрогеологических условий [10].

Откачки выполнены электронасосом с погружением его на глубину 10...15 м. Перед началом откачки выполнен замер статического (установившегося) уровня воды. Дебит скважин определялся объемным способом с помощью мерной емкости объемом 200 л и секундомера (рис. 6).

Уровень воды замерялся электроуровнеммером. Продолжительность одиночной откачки зависела от стабилизации понижения уровня и изменялась от 15 часов (скважина 18) до 31,5 часов (скважина 25). По окончании откачки выполнено наблюдение за восстановлением уровня воды в скважинах до статического. Продолжительность замеров восстановления варьирует от 16 до 36 часов.

Длительность кустовых откачек составила 72 часа (скважина 25) и 150,5 часов (скважина 100 г), восстановление уровня, соответственно, 76,5 и 98 часов.

По степени или характеру вскрытия все скважины несовершенны. Данные выполненных гидрогеологических работ приведены в табл. 1 и 2. Обработка опытно-фильтрационных работ осуществлялась с использованием типовых расчетных схем, реализованных в программном комплексе ANSDIMAT:

- несовершенной скважины в безнапорном неограниченном пласте;
- водоносный комплекс с перетеканием, перетекание из водоносного пласта с постоянным напором;

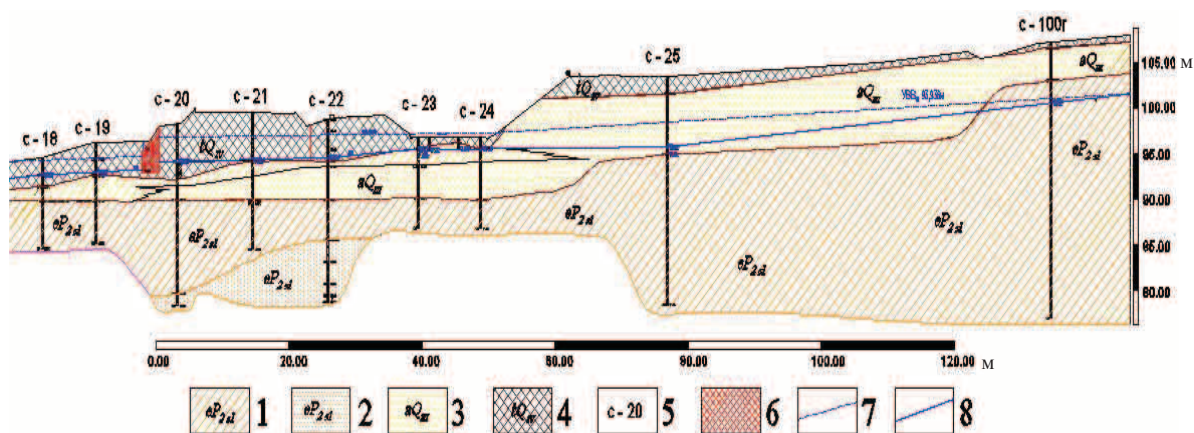


Рис. 5. Гидрогеологический разрез участка: 1 – шешминский комплекс трещиноватых аргиллитов; 2 – шешминский комплекс трещиноватых песчаников; 3 – четвертичные аллювиальные отложения II и III надпойменных террас; 4 – техногенные грунты; 5 – скважина, ее номер; 6 – подпорная стенка; 7 – прогнозный уровень подземных вод; 8 – уровень грунтовых вод на октябрь 2013 г.

Fig. 5. Hydrogeological section area: 1 – sheshminsky complex fractured argillite; 2 – sheshminsky complex fractured sandstones; 3 – quaternary alluvial deposits II and III floodplain terraces; 4 – anthropogenic soils; 5 – well, its number; 6 – retaining wall; 7 – forecasted level of groundwater; 8 – groundwater level in October, 2013



Рис. 6. Площадка проведения откачки из скважины 56: 1 – мерная емкость; 2 – генератор электроэнергии; 3 – скважина; 4 – электроуровнемер (с защитой от дождя)

Fig. 6. Site of the pumping of well no. 56: 1 – dimensional capacity; 2 – generator of electricity; 3 – well; 4 – electrical level gauge (with rain protection)

Таблица 1. Данные опытных работ по одиночным откачкам

Table 1. Data pumping test

Номер скважины Number of wells	Интервал опробования Testing interval от/from–до/to м/м	Параметры откачки Parameters of a pumping test			Средний коэффициент фильтрации, Conductivity м/сут. m/d	Расчетное значение коэффициента фильтрации при $a=0,98$ Conductivity at $a=0,98$ (+)	Расчетное значение коэффициента фильтрации при $a=0,98$ Conductivity at $a=0,98$ (-)
		Дебит Capacity л/с l/s м³/сут m³/d	Понижение Lowering м/м	Удельный дебит Specific capacity л/с·м l/s·m м³/сут·м m³/d·m			
C-18	1,9...10,0 8,1	0,036 3,11	2,05	0,018 1,52	0,33	0,39	0,28
C-25	8,5...25,0 16,5	0,800 69,12	6,45	0,124 10,72	1,36	1,51	1,21
C-56	10,9...15,0 4,1	0,180 15,55	2,18	0,083 7,13	1,57	1,75	1,39
C-59	6,6...10,0 3,4	0,370 31,97	1,20	0,308 26,64	5,94	6,28	5,59
C-100г	8,8...30,2 20,4	0,170 14,69	3,40	0,050 4,32	1,39	1,57	1,22
	Среднее/Mean				2,12	2,30	1,94
	Мин/Min				5,94	6,28	5,59
	Макс/Max				0,33	0,39	0,28

Таблица 2. Проводимость (T , м²/сут.) и урвннепроводность (a , м²/сут.)

Table 2. Transmissibility (T , m²/d) and diffusivity (a , m²/d)

Номер скважины Number of wells	Интервал опробования Testing interval, от/from–до/to м/м	Коэффициент водопрводности Coefficient of water conductivity (T , м²/сут.)/ (T , m²/d)	Коэффициент урвннепроводности Diffusivity coefficient (a , м²/сут.)/ (a , m²/d)
C-25	8,5...25,0 7,7	47,69	6960,70
C-100г	8,8...30,2 21,4	29,55	5819,39

- линейный источник: несовершенная скважина в безнапорном водоносном пласте;
- слоистая система: решения Хантуша и Менча.

Эпигнозное моделирование

Ввиду сложных гидрогеологических условий территории оценка изменения уровня подземных вод под влиянием подъема уровня поверхностных вод в р. Каме до 93,936 м, с обеспеченностью 1 %, проведена методом численного гидродинамического моделирования в среде программного комплекса Processing Modflow [11].

При определении внешнего контура фильтрационной модели учитывались следующие обстоятельства: модель области фильтрации должна включать площадь проектируемых инженерных сооружений, прилегающую территорию, а также область потенциального воздействия сооружений на подземные воды [12–14]. Внешние граничные условия должны оказывать минимальное влияние на изменение структуры фильтрационного потока вблизи прогнозируемой площади [15].

В связи с вышеизложенным была выбрана область моделирования, представляющая собой прямоугольник площадью 0,18 км², длина сторон которого 600 и 300 м. Расчетная область фильтрации была разбита на квадратные блоки одинакового размера со стороной квадрата 6 м. Количество блоков по оси X – 100, оси Y – 50, оси Z – 3. Общее количество блоков в модели – $100 \times 50 \times 3 = 150000$ (рис. 7).

Внешние граничные условия модели выбирались исходя из изученных гидрогеологических условий территории, построенной карты гидроизогипс, а также руководствуясь общими принципами по схематизации гидрогеологических условий [16–18].

Внешняя южная граница модели проведена по наиболее приподнятому участку рельефа, являющемуся водоразделом поверхностных и подземных вод. Эта граница вводилась как питающая, т. е. напор потока в них (H) постоянен (ГУ I рода). Западная и восточная границы модели в плане примерно отвечают линиям тока, что позволило отнести их к непроницаемым – на них было реализовано гра-

ничное условие II рода ($Q = \text{const} = 0$) (ГУ II рода). Для северной границы модели (р. Кама) было реализовано граничное условие III рода.

Профильные границы водоносных комплексов и горизонтов задавались через абсолютные отметки подошвы и кровли каждого из них, полученные по результатам буровых работ. Модель в разрезе состоит из трех слоев. Для построения матриц отметок кровли и подошвы соответствующего слоя использовались материалы литологического описания керна скважин, пробуренных осенью 2013 г.

Первый (верхний) модельный слой: соответствует объединенной толще техногенных отложений ($t_{Q_{IV}}$). Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 6,50 м/сут., параметр перетекания (B_1) равен 0,26 м. Подошва слоя представлена кровлей аллювиальных отложений.

Второй модельный слой: отождествляется с аллювиальными отложениями. Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 12,35 м/сут. Параметр перетекания (B_1) равен 1,8 м; подошва слоя на отметке 85,77 м.

Третий модельный слой: имитирует зону активного водообмена. Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 23,125 м/сут., параметр перетекания (B_1) – 3,2 м; подошва слоя на отметке 85,77 м.

Инфильтрационное питание задавалось на модели в виде однородной матрицы. Для оценки величины питания первого от поверхности водоносного горизонта привлечена среднегодовая сумма атмосферных осадков [19].



Рис. 7. Схематизация граничных условий моделируемого участка

Fig. 7. Schematization of boundary conditions of the modeled area

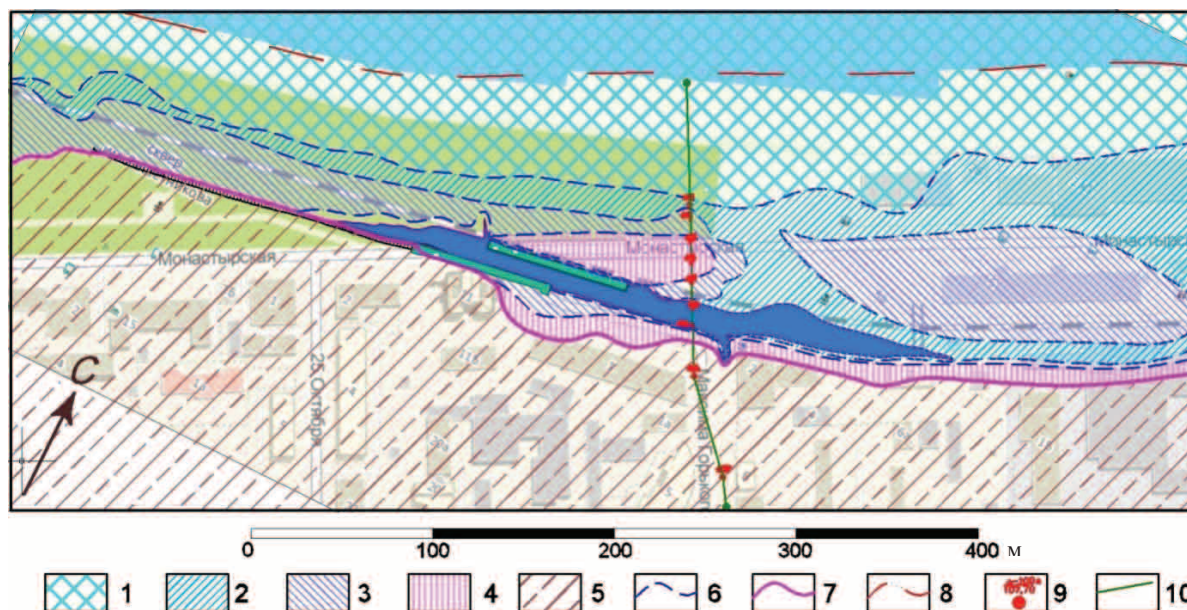


Рис. 8. Схематическая карта опасности и риска изучаемого участка: 1 – подзона непосредственного затопления; мощность зоны аэрации составляет: для 2-й зоны – 0...0,5 м; 3-й зоны – 0,5...2,0 м; 4-й зоны – 2,0...4,0 м; 5-я – зона медленного повышения уровня подземных вод; 6 – границы зон подтопления; 7 – граница между зонами сезонно (ежегодно) подтопляемыми и медленного повышения уровня подземных вод; 8 – граница р. Камы на 26.10.2013 г.; 9 – скв; 10 – линия разреза

Fig. 8. Sketch map of the dangers and risks of the studied area: 1 – subzone of direct flooding; power aeration zone is zone 2 – 0...0,5 m; zone 3 – 0,5...2,0; zone 4 – 2,0...4,0; 5 – zone of a slowly increase of the groundwater level; 6 – border areas of flooding; 7 – boundary between the zones of seasonal (annual) flooding risk and the slow increase of the groundwater level; 8 – border of the river Kama, 10 October 2013; 9 – well; 10 – cutting line

Калибровка фильтрационной модели по превышению уровня воды в р. Каме заключалась в уточнении значений проводимости подрусловых отложений и коэффициентов фильтрации аллювиальных отложений в прилегающих к водотоку областям.

В результате калибровки модели по основным критериям соответствия реальных и модельных значений (напоров в скважинах) была решена обратная фильтрационная задача. На численной модели было получено поле распределения естественных напоров, по результатам анализа которого Д.В. Пургиной построена карта опасности и риска подтопления изучаемого участка (рис. 8).

Вся исследованная территория была разделена на две основные зоны: сезонного (ежегодного) подтопления и медленного (многолетнего) повышения уровня подземных вод. В свою очередь в первой зоне были выделены четыре подзоны, в которых прогнозируется положение уровня подземных вод в соответствии с максимально возможным положением уреза р. Камы. Первая – непосредственного затопления (вода выходит на поверхность при нулевой мощности зоны аэрации), вторая – мощность зоны аэрации составляет 0,0...0,5 м, третья – мощность зоны аэрации изменяется в пределах 0,5...2,0 м, четвертая – мощность зоны аэрации достигает 2,0...4,0 м.

Анализ построенных гидроизогипс на гидрогеологической карте и уровней грунтового потока

на инженерно-геологических разрезах показывает наличие явно выраженного подпора подземных вод [20] вследствие перекрытия фильтрационного потока подземными частями существующих подпорных стенок и жилых зданий с глубоким заложением фундамента без дренажных канав. Отмечен подпор воды у здания вокзала с резким снижением уровня воды за зданием (в подвале зафиксировано стояние воды). Подпор подземных вод наблюдается у существующих подпорных стенок, расположенных южнее и севернее земляного полотна и у стены путепровода (рис. 9).

Сгущение изолиний на подходе к подпорной стенке, расположенной южнее земляного полотна, достигает 2...3 м с уклоном 0,5 и резким снижением уровня воды за ней. Подпор не зафиксирован на тех участках, где состояние кирпичной кладки подпорных стенок нарушено и вода имеет возможность циркулировать через конструкцию фундамента.

Прогнозное моделирование

Количественная оценка прогнозной величины подъема уровня подземных вод при строительстве новых подпорных стенок [21] (прогноз подпора грунтовых вод) требует знания фильтрационных показателей всех разновидностей техногенных грунтов, включая породы зоны аэрации. Для тех разновидностей песчаных и глинистых грунтов,

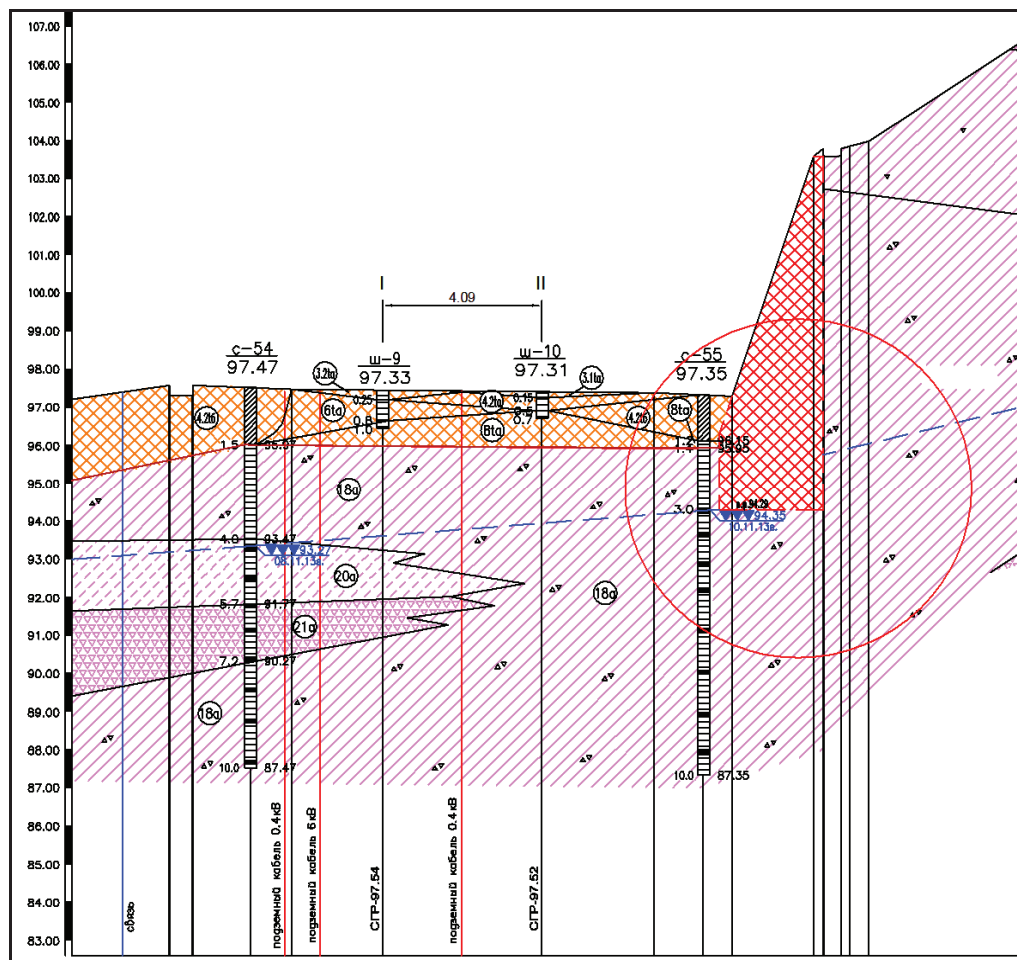


Рис. 9. Фрагмент инженерно-геологического разреза. Проявление барражного эффекта в существующей стенке

Fig. 9. Detail of engineering geological section. Manifestation of the barrage effect in an existing wall

которые в период обследования находились выше уровня подземных вод, использованы лабораторные методы определения коэффициента фильтрации.

В связи с тем, что при сооружении подпорных стенок будет происходить уплотнение грунтов, коэффициенты фильтрации определялись: для песчаных грунтов – методом стандартного уплотнения при максимальной плотности и оптимальной влажности; для глинистых грунтов – методом расчета при выполнении консолидационных испытаний (ГОСТ 12248–2010 п. 5.4.5) через установленные характеристики фильтрационной консолидации.

Освоение подземного пространства для укрепления склона при строительстве новых подпорных стенок вызывает опасность развития процессов техногенного подтопления за счёт возникновения барражного эффекта при заложении подошвы свайного ростверка ниже естественного уровня подземных вод. Для исключения такой возможности необходимо обосновать оптимальную глубину заложения подошвы свайного ростверка подпорных стенок. Оценить величину изменения уровня

подземных вод при строительстве подпорных стенок, в силу очевидной сложности гидрогеологических условий, позволяют методы численного моделирования. Традиционные аналитические гидродинамические расчёты в этом случае малоэффективны, так как не позволяют полноценно учесть сложный характер взаимодействия граничных условий со слоистым строением водовмещающей толщи.

На этапе схематизации гидрогеологических условий принята усредненная абсолютная отметка залегания уровня подземных вод вблизи проектируемых подпорных стен, равная 94,5 м.

Прогноз уровня подземных вод проектируемых подпорных стенок выполнялся для двух вариантов проектных решений, отличающихся отметками заложения подошвы свайного ростверка. По первому варианту абсолютная отметка подошвы фундамента составила 92,0 м, а по второму варианту соответствовала отметке 94,5 м.

Другие параметры проектных подпорных сооружений определялись следующими техническими условиями:

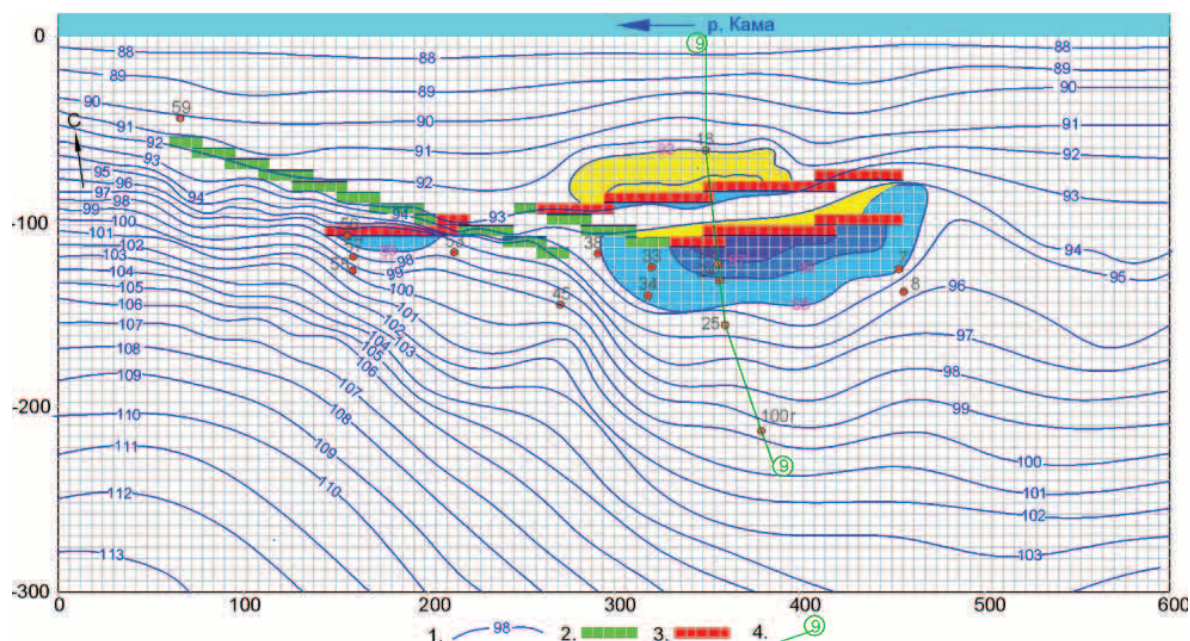


Рис. 10. Прогнозная модель изменения уровня подземных вод при заглублении фундамента проектных подпорных стенок до отметки 92,0 абс. м: 1 – линии равных напоров; 2 – существующие подпорные стенки; 3 – проектные подпорные стенки; 4 – линия разреза

Fig. 10. Forecast model of the changes in the level of groundwater at the burial of the foundation design of retaining walls to the level of 92.0 abs. m: 1 – lines of equal pressures; 2 – existing retaining walls; 3 – design retaining walls; 4 – cutting line

1. Подпорные стенки принимаются непроницаемыми, а сами строения – полностью гидроизолированными. Численная реализация данного условия на модели соответствует внутренним границам II рода ($Q=0$), пространственно совпадающим с внешними контурами подпорных стенок.
2. Отсутствуют дренажные системы любого типа (в том числе и нагорные каналы). Данное условие заложено для создания повышенного запаса надежности прогнозных расчётов, поскольку за основу были взяты напоры, отвечающие естественному режиму подземных вод.

Прогноз изменения уровня для первого варианта проекта подпорной стенки. Оценивается величина изменения уровня подземных вод при заглублении подошвы свайного ростверка до абсолютной отметки 92,0 м, что соответствует погружению свай в водоносные отложения аллювия и элювия на 2,5 м. Результаты моделирования показывают, что данный вариант строительства приводит к некоторому изменению структуры фильтрационного потока. Это выражается в подъеме уровня подземных вод возле сооружений. Так, вблизи подпорной стенки № 1 наблюдается повышение уровня с юго-восточной стороны до 4 м (рис. 10). Препяды фильтрационному потоку также создают и остальные рассматриваемые подпорные стенки, что приводит к повышению уровня вблизи них на 0,6...1,2 м.

Для предотвращения выявленного роста уровня подземных вод необходимо организовать воз-

можность прохождения фильтрационного потока под подошвой свайного ростверка, не перекрывая аллювиальные и элювиальные отложения, которые обладают наиболее высокими фильтрационными свойствами. Такого результата можно достичь, уменьшив заглубление подошвы свайного ростверка.

Прогноз изменения уровня для второго варианта проекта подпорной стенки. Выполнена оценка величины возможного превышения напоров относительно естественных условий при заглублении подошвы ростверка до абсолютной отметки 94,5 м, равной усредненной абсолютной отметке залегания уровня подземных вод вблизи проектируемых подпорных стенок (рис. 11).

При заглублении подошвы свайного ростверка до абсолютной отметки 94,5 м происходит незначительное изменение картины фильтрационного потока. Подъем уровня подземных вод возле подпорных стенок не превышает 0,3...0,5 м относительно их естественного положения, восстановленного по результатам эпигнозного моделирования.

Выводы

1. В результате инженерно-геологических и гидрогеологических исследований получен новый фактический материал, который позволил количественно оценить физико-механические характеристики стратиграфо-генетических комплексов: верхнеплейстоценовых аллювиальных отложений II надпойменной террасы р. Камы (aQ_{III}) и отложений коры выветрива-

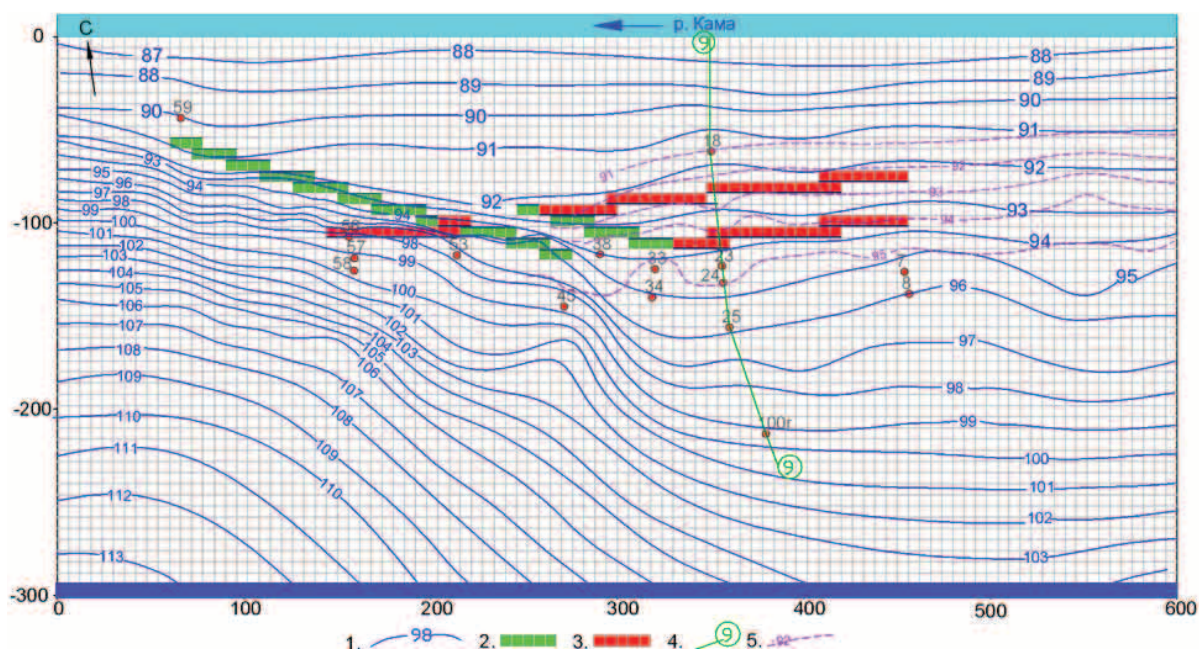


Рис. 11. Прогнозная модель изменения уровня подземных вод при заглублении фундамента проектных подпорных стенок до отметки 94,5 абс. м: 1 – линии равных напоров; 2 – существующие подпорные стенки; 3 – проектные подпорные стенки; 4 – линия разреза; 5 – изолинии естественного потока

Fig. 11. Forecast model of the changes in the level of groundwater at the burial of the foundation design of retaining walls to the level of 92.0 abs. m: 1 – lines of equal pressures; 2 – existing retaining walls; 3 – design retaining walls; 4 – cutting line; 5 – isolines of the natural flow

- ния песчаников и аргиллитов (P_2sl+ss), перекрытых с поверхности техногенными отложениями (tQ_{IV}).
- По результатам обработки опытно-фильтрационных работ установлены значения коэффициентов фильтрации, водопроницаемости и пьезопроводности водовмещающих пород.
 - Разработана гидродинамическая модель в среде программного комплекса PMWIN, использованная для прогноза изменения уровня подземных вод с учетом максимально возможных паводковых отметок (93,94 м) поверхностных вод в реке Кама. Модель позволяет получить распределение напоров под влиянием проектируемых подпорных стенок.
 - Построена карта опасности и риска подтопления изучаемого участка с учетом требований СП 11–105–97 (часть 2). Вся территория разделена на две зоны: сезонного (ежегодного) подтопления и медленного (многолетнего) повышения уровня подземных вод. В свою очередь, в первой зоне выделены 4 подзоны, в которых прогнозируется положение уровня подземных вод в соответствии с максимальным уровнем паводковых вод в Кама. Первая зона имеет более дробное деление на подзоны, выделенные по мощности зоны аэрации и представленные четырьмя градациями: 0 м; 0,0...0,5 м; 0,5...2,0 м; 2,0...4,0 м. С целью районирования территорий и условий строительного освоения на участках повышенного риска требуются до-

полнительные природоохранные мероприятия с удорожанием строительства.

- По результатам анализа гидрогеологического разреза документально зафиксировано локальное повышение уровня подземных вод вдоль фундамента одной из подпорных стенок и определены участки, на которых предполагается изменение физических свойств грунтового массива.
- В стационарной постановке дан прогноз изменения уровня подземных вод методом численного моделирования для разных вариантов заглубления фундамента подпорных стенок. Первый вариант заглубления фундамента до глубины 92,0 абс. м приводит к некоторому подъему уровня подземных вод. Во втором случае (при меньшем заглублении фундамента до отметки 94,5 абс. м) подъем уровня подземных вод за счёт влияния подпорных стенок не превышает 0,3...0,5 м относительно естественных условий.
- На основании численного моделирования сформулированы предложения по проектированию свайных оснований подпорных стенок. Рекомендуется выбирать заглубление подошвы свайного ростверка проектируемых подпорных стенок с таким расчётом, чтобы не перекрывать разрез песчано-гравийных аллювиальных отложений с абсолютной отметкой кровли 94,5 м. В этом случае проявления барражного эффекта свайных оснований практически отсутствуют, а подтопление основной площадки земельного полотна не развивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. Геология, поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. – 2002. – Т. 305. – Вып. 6. – С. 348–365.
2. Попов В.К., Лукашевич О.Д., Коробкин В.А. Техногенное подтопление: оценка, развитие, превентивные меры // Сб. научных трудов «Город: прошлое, настоящее, будущее». – Иркутск, 2004. – С. 24–27.
3. Муфтахов А.Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975. – 44 с.
4. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Гидрогеологические условия и процессы подтопления территории г. Томска // Подземные воды юга Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во «Наука СО», 1987. – С. 146–153.
5. Последствия подтопления застроенных территорий и способы их дренирования / Н.П. Куранов, А.Ж. Муфтахов А.П. Шевчик, И.М. Бывальцев // Итоги науки и техники: Гидрогеология. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1991. – Т. 13. – 130 с.
6. Гавшина З.П., Дзекцер Е.С. Условия подтопления грунтовыми водами застраиваемых территорий. – М.: Стройиздат, 1982. – 116 с.
7. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология: учебник для вузов / С.Л. Шварцев. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
8. Бурцев Ю.Г., Байдин В.Г., Назаров Н.Н. Отчет о результатах работ по изучению динамики инженерно-геологических процессов на берегах Камского и Воткинского водохранилищ в 1977–78 гг. – Пермь: Сыслвенская гидрогеологическая партия, 1978. – 212 с.
9. Гавич И.К. Гидрогеодинамика: учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 349 с.
10. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, И.С. Зекцер, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин, Е.В. Пиннекер, С.С. Бондаренко, Л.В. Боровский, А.А. Дзюба. – Новосибирск: Наука, 1983. – 242 с.
11. Wen-Hsing C., Kinzelbach W. 3D-Groundwater modeling with PMWIN. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. – 346 p.
12. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. – Киев: ВШ, 1976. – 192 с.
13. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. – М.: Наука, 1971. – 266 с.
14. Лехов М. Гидрогеологические изыскания и моделирование в городском строительстве: критические комментарии // Инженерные изыскания. – 2013. – № 1. – С. 24–29.
15. Мироненко В.А. Динамика подземных вод: учебник. – М.: МГУ, 2001. – 519 с.
16. Лебедева Н., Самохина А. Цифровые картографические основы для Информационных систем градостроительной деятельности // ArcReview. – 2006. – Вып. 3 (38). – С. 14.
17. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control // J. Irrigation and Drain. Eng. – 1989. – V. 115. – № 4. – P. 588–607.
18. Blower T., Simpson B. Rising ground-water levels beneath London // Struct. Surv. – 1988. – V. 6. – № 3. – P. 229–232.
19. Пособие к СНиП 2.06.15–85. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2697 (дата обращения: 20.10.2015).
20. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam // Resource-Efficient Technologies. – 2015. – № 1. – P. 80–89.
21. Шестаков В.М. Динамика подземных вод: учебник. – М.: МГУ, 1979. – 369 с.

Поступила 28.10.2015 г.

UDC 624.131

MODELING HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS FOR ANTILANDSLIDE MEASURES JUSTIFICATION ON THE PLOT OF THE KAMA RIVER EMBANKMENT IN PERM

Darya V. Purgina,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: purgina_darya@mail.ru

Lyudmila A. Strokova,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: sla@tpu.ru

Konstantin I. Kuzevanov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: kki@tpu.ru

The topic is relevant due to the necessity of forecast ways improvement and protection of the territories against flooding and the accompanying processes. Civil construction, urban density, underground utility system, change of a natural relief cardinaly changes the natural geological environment within the developed territory. New layers of industrial temporary waters are developed under several factors (building development, rocks contraction under the stress of construction engineering facilities).

The objective of the present research is to study geological, hydrogeological and hydrodynamic conditions for a long-term change forecast for construction of additional retaining walls along the Kama river embankment and short-term change forecast – for high water.

Research technique. Basic data for the research are the field materials of JSC Sibgiprottransput received in 2013–2014 with the direct involvement of Darya V. Purgina in engineering-geological and hydrogeological conditions studying at all stages of the research. In the course of the work 66 wells are drilled (including four horizontal and two inclined wells), 20 holes are trenched, more than 600 samples are selected. Static and dynamic penetration test, rotational shear soils testing, static plate load test were used in field soil investigation. Two cluster and five single pumping tests were carried out for reliable estimation of filtration characteristics. The hydrogeological survey was completed, more than 50 observation points were described. The full complex of rock mechanics is carried out in laboratory setting. For the soils, lying above the groundwater level, the filtration coefficient is defined by standard consolidation. The main method of an assessment of influence of new retaining walls or changes of conditions of groundwater recharge was a numerical modeling with the use of the decisive module realizing the algorithm of the solution of the differential equation of a non-standard planned filtration according to the method of final differences [1]. As preprocessors the Surfer and AutoCad software systems were applied.

The results. Hydrogeological and hydrodynamic conditions of a research site are studied in detail, the hydrodynamic numerical model is created, the forecast of underground water levels change at surface water level rise at high-water season is made, predictive map of flooding area is built, groundwater backwater in the existing wall is investigated, the possibility of a barrage effect in the construction of new retaining walls is assessed, recommendations for optimal penetration of the pile grillage on the area are given.

Key words:

Experimental filtration works, math modeling, geoinformation systems, barrage effect, underflooding, Modflow, landslide, supporting wall, suffusion, creep.

REFERENCES

1. Bukaty M.B. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya resheniya gidrogeologicheskikh zadach [Software development for solving hydrogeological problems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2002, vol. 305, iss. 6, pp. 348–365.
2. Popov V.K., Lukashovich O.D., Korobkin V.A. Tekhnogennoe podtoplenie: otsenka, razvitie, preventivnye mery [Induced flooding: assessment, development, preventive measures]. *Sb. nauchnykh trudov «Gorod: proshloe, nastoyashchee, budushchee»* [Proc. City: past, present, future]. Irkutsk, 2004. pp. 24–27.
3. Muftakhov A.Zh. *Gidrodinamicheskie osnovy prognoza podtopleniya promyshlennyykh i fil'tratsionnykh raschetov zashchitnogo drenazha v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh*. Avtoref. Dis. Dokt. nauk [Fundamentals of the hydrodynamic prediction of flooding of industrial sites and seepage calculations protective drainage in complex hydrogeological conditions. Author's Abstract Diss. Dr.]. Moscow, 1975. 44 p.
4. Pokrovskiy D.S., Kuzevanov K.I. *Gidrogeologicheskie usloviya i protsessy podtopleniya territorii g. Tomska* [Hydrogeological conditions and processes of underflooding of the territory of Tomsk]. *Podzemnye vody yuga Zapadnoy Sibiri* [Groundwater in the South of Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka SO Publ., 1987. pp. 16–153.
5. Kuranov N.P., Muftakhov A.Zh., Shevchik A.P., Byvaltsev I.M. *Posledstviya podtopleniya zastroennykh territoriy i sposoby ikh drenirovaniya* [The consequences of flooding residential areas and their drainage]. Moscow, VINITI Publ., 1991, vol. 13. 130 p.
6. Gavshina Z.P., Dzektsler E.S. *Usloviya podtopleniya gruntovymi vodami zastraivayemykh territoriy* [Conditions of groundwater flooding of built up areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 116 p.
7. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p.
8. Burtsev Yu.G., Baydin V.G., Nazarov N.N. *Otchet o rezultatakh rabot po izucheniyu dinamiki inzhenerno-geologicheskikh protsessov na beregakh Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch v 1977–1978* [A report on the results of studies on the dynamics of engineering-geological processes on the banks of the Kama and Votkinsk reservoirs in 1977–78]. Perm, Sylvenskaya gidrogeologicheskaya partiya Publ., 1978. 212 p.
9. Gavich I.K. *Gidroeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 349 p.
10. Gavich I.K., Zektser I.S., Kovalevskiy V.S., Yazvin L.S., Pinneker E.V., Bondarenko S.S., Borevskiy L.V., Dzyuba A.A. *Osnovy gidrogeologii. Gidroeodinamika* [Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 242 p.

11. Wen-Hsing C., Kinzelbach W. *3D-Groundwater modeling with PMWIN*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. 346 p.
12. Zhernov I.E., Pavlovets I.N. *Modelirovanie filtratsionnykh protsessov* [Modeling of filtration processes]. Kiev, High school Publ., 1976. 192 p.
13. Zhernov I.E., Shestakov V.M. *Modelirovanie filtratsii podzemnykh vod* [Modeling of underground water filtration]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 266 p.
14. Lekhov M. *Gidrogeologicheskie izyskaniya i modelirovanie v gorodskom stroitelstve: kriticheskie kommentarii* [Hydrogeological survey and modeling in urban development: critical comments]. *Engineering survey*, 2013, no. 1, pp. 24–29.
15. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of groundwater]. Moscow, MGG University Publ., 2001. 519 p.
16. Lebedeva N., Samokhina A. *Tsifrovye kartograficheskie osnovy dlya Informatsionnykh sistem gradostroitelnoy deyatelnosti* [Digital cartographic basis for Information systems urban planning]. *ArcReview*, 2006, vol. 3 (38), p. 14.
17. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control. *J. Irrigation and Drain. Eng.*, 1989, vol. 115, no. 4, pp. 588–607.
18. Blower T., Simpson B. Rising ground-water levels beneath London. *Struct. Surv.*, 1988, vol. 6, no. 3, pp. 229–232.
19. *Posobie k SNIp 2.06.15–85. Prognozy podtopleniya i raschet drenazhnykh sistem na zastraivaemykh i zastroennykh territoriyakh* [Manual for SNIp 2.06.15–85. Forecasts of flooding and calculation of drainage systems in built up areas and those under construction]. Available at: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2697/ (accessed 20 October 2015).
20. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Resource-Efficient Technologies*, 2015, no. 1, pp. 80–89.
21. Shestakov V.M. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of groundwater]. Moscow, Moscow State University Publ., 1979. 369 p.

Received: 28 October 2015.