

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕСТАВРАЦИИ ХРАМА ПРЕСВЯТОЙ ТРОИЦЫ В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

GEOTECHNICAL AND HYDROGEOLOGICAL STUDY OF RECONSTRUCTION AND RESTORATION OF THE TEMPLE OF THE HOLY TRINITY IN SAINT PETERSBURG

ДАШКО Р.Э.

Профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии
Санкт-Петербургского горного университета, д.г.-м.н.,
г. Санкт-Петербург, regda2002@mail.ru

ГОРСКАЯ В.А.

Аспирант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии
Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург,
valentinka.1990@mail.ru

DASHKO R.E.

Professor of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology,
St. Petersburg Mining University, DSc (Doctor of Science in Geology
and Mineralogy), St. Petersburg, regda2002@mail.ru

GORSKAYA V.A.

Postgraduate of the Department of Hydrogeology
and Engineering Geology, St. Petersburg Mining University,
valentinka.1990@mail.ru

Ключевые слова:

храм Пресвятой Троицы; подземное пространство;
контаминация; исторический аспект; фундамент; песчано-
глинистые грунты; органическое вещество; грунтовые воды;
микробиота; конструкционные материалы; несущая
способность основания; реставрация.

Keywords:

the temple of the Holy Trinity; underground space; contamination;
historical aspect; foundations; sand and clay soils; organic
material; groundwater; microbiota; construction materials; base
load-bearing capacity; reconstruction.

Аннотация

В статье проанализировано современное состояние храма Пресвятой Троицы в Санкт-Петербурге с принятыми во внимание инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, спецификой контаминации подземной среды и причинами разрушения подземных несущих конструкций. Отмечена негативная трансформация песчано-глинистых грунтов в разрезе основания. Проведен анализ длительной устойчивости храма с учетом снижения несущей способности грунтов, а также агрессивности подземной среды по отношению к материалам кладки фундаментов. Критически рассмотрены два варианта реконструкции фундаментов храма.

Abstract

In the paper there's a detailed analysis of the modern situation of the Holy Trinity Church in Saint Petersburg, according to the geotechnical and hydrogeological conditions, to the contamination features of the underground environment and to the reasons of destruction of the underground bearing structures. The negative transformation of sand and clay soils in the context of the base is noted also. There were done the following researches: analysis of the long-term stability of the temple in view of reducing the bearing capacity of the soil; analysis of the aggressive underground environment against the materials of masonry foundations. Two variants of reconstruction of the temple foundations were critically examined.

Введение

В настоящее время актуален вопрос необходимости обеспечения устойчивости храма Пресвятой Троицы в Санкт-Петербурге с учетом инженерно-геологических, гидрогеологических и экологических условий подземной среды, а также реконструкции подземной части храма.

Церковь Пресвятой Троицы расположена на правом берегу р. Невы в пределах юго-восточной части Санкт-Петербурга и является подворьем Черемнецкого Иоанно-Богословского монастыря. Церковь была построена в 1862 г. как скит Александро-Невской лавры. Автором проекта храма, выполненного в русско-византийском стиле, был архитектор Г.И. Карпов [5].

В середине XIX в. конструктивную основу обследуемого крестово-купольного храма представляла трехпролетная арочно-стоечная система с пятью главами. Романский портал храма сочетался с шатровым завершением главного купола.

В 30-х годах XX в. церковь подверглась частичному разрушению, в частности были утрачены венчающие шатры и главы (рис. 1).

По проекту под несущие стены храма Пресвятой Троицы были устроены ленточные фундаменты из бутовой кладки на извести шириной 3,5 м. Фундаменты были установлены на плите из путиловского известняка, уложенной на деревянные лежни со шпонками. Глубина заложения плиты составляла 4,4 м. Такой тип фундаментов был широко распространен в XIX веке при строительстве сооружений различного назначения, в том числе административных зданий, дворцов и жилых домов [4]. Проведенное обследование храма показало, что фундаменты характеризуются интенсивным разру-

шением за счет растворения и частичного выщелачивания связующего кирпичной кладки — извести, а также путиловской плиты, которая служила распределяющей конструкцией. Кроме того, при осмотре были обнаружены обломки известняка и остатки деревянных лежней. Подвалы церкви постоянно подтапливаются, и служба АХЧ (административно-хозяйственная часть) ведет откачку вод из подвальных помещений.

В настоящее время храм Пресвятой Троицы находится в предаварийном состоянии, о чем свидетельствует наличие сквозных трещин различного направления и раскрытия в несущих конструкциях (стенах), интенсивность которых в дальнейшем будет только возрастать, что указывает на необходимость организации мер по улучшению устойчивости здания, направленных прежде всего на усиление его фундаментов (рис. 2).

Особенности геолого-литологического разреза основания и гидрогеологические условия

Здание церкви расположено в пределах территории с абсолютными отметками 4,8–5,2 м, которая приурочена к склону погребенной долины Пра-Невы. Разрез четвертичных отложений характерен для нижней Литориновой террасы (рис. 3). Несущим горизонтом для существующих фундаментов церкви служат озерно-морские суглинки, которые залегают на озерно-ледниковых грунтах, а в самой нижней части разреза бурением вскрыты моренные образования.

В пределах участка выделяются два водоносных горизонта. Первый безнапорный горизонт приурочен к современным насыпным грунтам (tgIV) и слабозаторфованным грунтам озерно-морского (mIV) генезиса и расположен на глубине 0,6–0,8 м (то есть фундаменты церкви относятся к подтопленным). Воды второго водоносного горизонта вскрыты в песчаном слое (gIIIos) осташковской морены на глубине 19,8 м. Величина напора соответствует уровню воды в р. Неве и равна 15 м (рис. 3).

Формирование химического состава грунтовых вод происходило под воздействием ряда природных и тех-



1862 год
2016 год
Рис. 1. Храм Пресвятой Троицы

ногенных факторов и было связано с историей освоения рассматриваемой местности.

По данным картографических материалов в XIV в. эта территория была заболочена, а с XV в. использовалась для различных хозяйственных нужд (табл. 1). Известно, что в 1500 г. здесь располагалась деревня Йервис, которая во времена новгородского правления называлась Нижним Омутом на Неве, а в допетровский период на этом месте размещалось шведское кирпичное производство. В начале XVIII в. земли были дарованы Петром I Александро-Невской лавре, и монахи частично возобновили хозяйственную и промышленную деятельность [5]. Однако наиболее активное поступление контаминантов наблюдается со стороны Киневеевского кладбища, действующего с 1848 г., которое на протяжении более 160 лет оказывает значительную экологическую нагрузку на песчано-глинистые грунты, подземные воды; также наблюдается поступление богатой микробиоты дополнительно к болотной (рис. 4).

Также нужно учесть, что при подъеме уровня воды в р. Неве при наводнениях различной интенсивности происходит подпор грунтовых вод и их разбавление речными водами.

Длительный срок контаминации подземного пространства отразился на составе грунтовых вод, харак-



Рис. 2. Состояние несущих наружных стен здания церкви: юго-западная сторона (а); юго-восточная сторона (б)

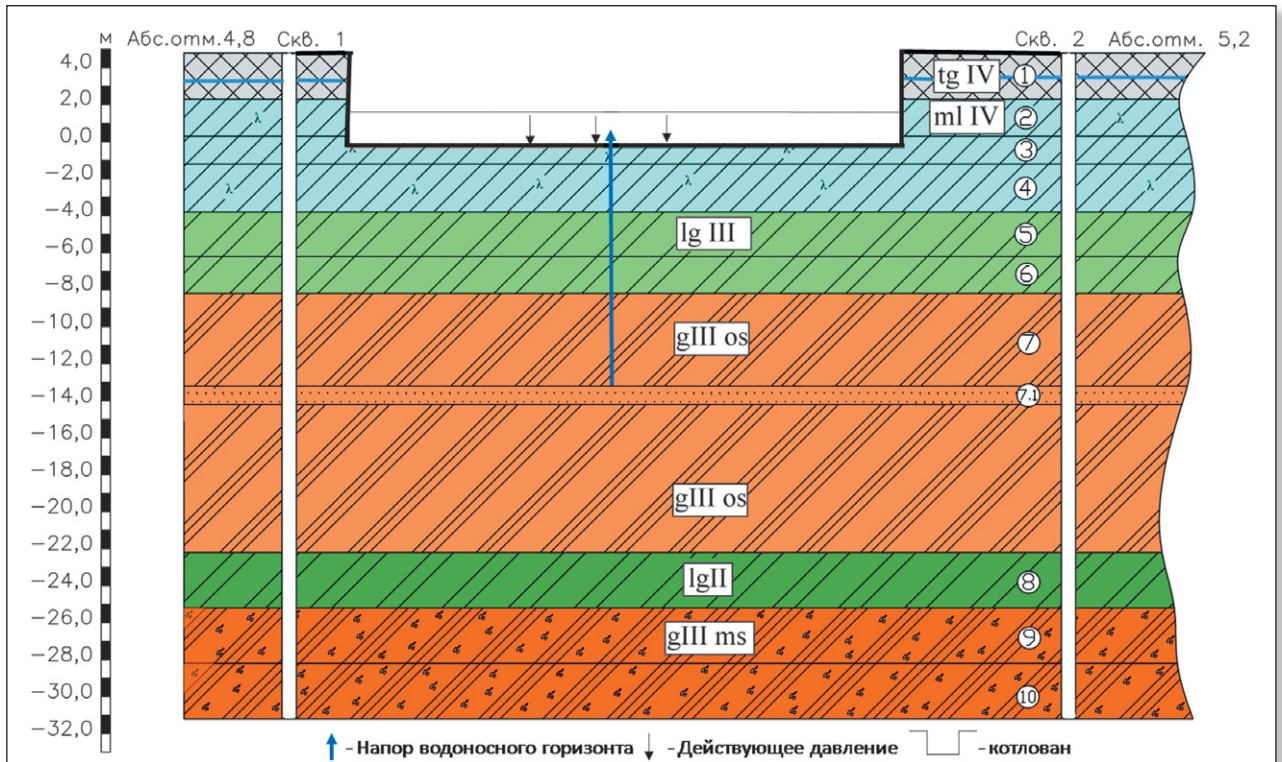


Рис. 3. Геолого-литологический разрез основания церкви Пресвятой Троицы: tgIV — техногенные отложения; mlIV — озерно-морские грунты; lgIII — озерно-ледниковые образования Балтийского озера; gIII os — ледниковые отложения ошашковского горизонта; lgII — озерно-ледниковые отложения московской морены; gIII ms — моренные отложения московского горизонта. Слои 1–10 — инженерно-геологические элементы (ИГЭ)

теризующемся высоким содержанием органических соединений по величине химического потребления кислорода и биологического потребления кислорода (табл. 2).

Разница между ХПК и перманганатной окисляемостью говорит о том, что большая доля падает на трудноокисляемую органику, часть которой составляют

белки различного генезиса. Такие высокие значения органических соединений определяют низкую величину Eh, менее -100 мВ, что свидетельствует об анаэробном состоянии водонасыщенной грунтовой толщи. Кроме того, наличие органических кислот снижает величину pH до 4,0, что было установлено только в результате полевых определений. Замеры pH в полевых условиях позволили характеризовать грунтовые воды как кислые (pH=4,0), в то время как в лабораторных условиях pH повысилось до 7,5 за счет изменения окислительно-восстановительной обстановки. При проведении лабораторных исследований содержание иона аммония как показателя канализационного загрязнения составляло 6,0 мг/дм³. Следует отметить, что аммоний относится к неустойчивым элементам и его содержание необходимо измерять в полевых условиях.

Судя по содержанию ионов Ca²⁺ (105 мг/дм³) и Mg²⁺ (149 мг/дм³) и их соотношению в грунтовых водах, наблюдается интенсивное растворение и выщелачивание

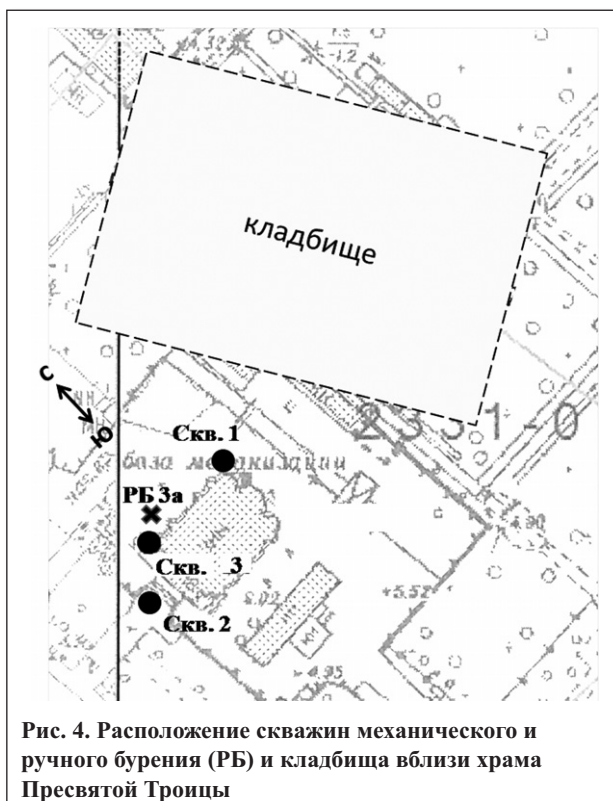


Рис. 4. Расположение скважин механического и ручного бурения (РБ) и кладбища вблизи храма Пресвятой Троицы

Таблица 1

Характер и особенности освоения территории церкви Пресвятой Троицы	
Этапы освоения	Характер и особенности освоения
XV–XVI вв.	Хозяйственно-бытовое загрязнение, д. Йервис (Ергина-2)
XVII в.	Шведское кирпичное производство
Начало XVIII — конец XIX в.	Хозяйственное использование Александровской лавры (кирпичное производство, скотный двор, сенокосы, пастбища)
Середина XIX–XXI вв.	Функционирование Киновеевского кладбища

лачивание карбонатов, а именно связующего кирпичной кладки и доломитизированной плиты, на которую поставлены ленточные фундаменты. Разрушению карбонатных соединений способствуют низкие значения pH, а также наличие во всех пробах воды агрессивной уголекислоты (до 41,2 мг/дм³). Воздействие соляной кислоты (HCl) на черные сажистые примазки (гидротроилит, FeS·nH₂O) приводило к выделению сероводорода — продукта деятельности сульфатредуцирующих бактерий, что вызывало неприятный запах грунтовых вод.

Экспериментальные исследования состава и физико-механических свойств грунтов

Анализ выполненных комплексных исследований гранулометрического состава песчано-глинистых грунтов, их физического состояния и свойств, а также показателей сопротивления сдвигу и деформационных характеристик на всю глубину опробования позволил получить определенные закономерности.

Для озерно-морских суглинков (mlIV, рис. 3) установлен достаточно однородный гранулометрический состав, в котором величина глинистой фракции варьируется в очень узких пределах, от 14,0 до 15,7%. Однако закономерное изменение содержания хорошо разложившейся органики по глубине предопределяет основные количественные параметры физических свойств этих грунтов, прежде всего влажности и плотности (рис. 5).

Следует подчеркнуть, что прослеживается четкая корреляция между величиной влажности и содержанием органического вещества, которое определялось путем прокаливания проб (рис. 6) и соответствует эмпирической формуле:

$$W = 25c^2 + 0,2, \quad (1)$$

где c — содержание органического вещества, д. ед., W — величина влажности, д. ед.

Установлено, что при возрастании содержания органики до 0,2 д. ед. влажность грунтов резко увеличивается до 100% из-за роста гидрофильности грунта.

Повышенное содержание органического вещества предопределяет снижение плотности грунта до 1,5 г/см³ и плотности скелета — менее 1 г/см³ (рис. 7).

Изменение сопротивления сдвигу, зафиксированное в условиях трехосного сжатия по схеме НН для озерно-морских образований, позволило установить отсутствие какой-либо зависимости прочности от влажности грунтов при различном содержании органики. Несмотря на широкий диапазон варьирования величины влажности в озерно-морских отложениях (от 29,6 до 79,6%), показатели прочности остаются близкими по значению (табл. 3). В водонасыщенных суглинистых отложениях средняя величина сцепления составляет 0,016 МПа, что объясняется сорбцией органического вещества на дисперсных частицах грунта, предопределяющей формирование в них водородных связей дополнительно к молекулярным. Водородные связи действуют в цепочечных структурах органических соединений растительного происхождения. При-

сутствие органики определяет интенсивность развития пластических деформаций, что свидетельствует о способности к длительному развитию осадков при постоянном давлении, модуль их общей деформации составляет менее 1,5 МПа.

Исследование озерно-ледниковых отложений, генезис которых подразумевает отсутствие органической компоненты, показало, что варьирование величины влажности по глубине связано с изменением содержания глинистой фракции (рис. 8).

Следует отметить, что при различном значении влажности величина сцепления грунтов варьируется в узких пределах 0,017-0,018 МПа, при $\varphi \rightarrow 0$, а модуль общей деформации достигает 2-3 МПа (см. табл. 3).

Как известно, моренные образования обычно рассматриваются в качестве несущего горизонта для свайных фундаментов не только при строительстве, но и при реконструкции и реставрации архитектурно-исторических памятников. Однако согласно результатам проведенных исследований для морен, формирующихся в восстановительной среде, характерно отсутствие жестких цементационных связей, обычно за счет гид-

Таблица 2

Результаты химического анализа грунтовых вод, отобранных на территории церкви Пресвятой Троицы вблизи Киновеевского кладбища

Определяемые показатели	Ед. изм.	Численные показатели воды, отобранной из скважин	
		ручное бурение, скв. 3а	механическое бурение, скв. 3
Натрий	мг/дм ³	267	148,1
Кальций	мг/дм ³	105	123,2
Калий	мг/дм ³	9,7	н.о.*
Магний	мг/дм ³	149	188,1
Аммоний-ион	мг/дм ³	2,8	6,0
Гидрокарбонат-ион	мг/дм ³	1520	1540,7
Нитрат-ион	мг/дм ³	<0,1	1,5
Нитрит-ион	мг/дм ³	0,024	следы
Сульфат-ион	мг/дм ³	24	56,8
Хлорид-ион	мг/дм ³	142	68,8
Кремневая кислота по (Si)	мг/дм ³	9,2	н.о.
Перманганатная окисляемость	мгО ₂ /дм ³	48	46,8
ХПК	мгО ₂ /дм ³	259	н.о.
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	35	н.о.
Агрессивная уголекислота	мг/дм ³	н.о.	41,2
Жесткость общая	°Ж	17,5	21,62
Сухой остаток	мг/дм ³	1225	1492,0
pH	-	4,0/7,5**	7,21
Фосфат-ион	мг/дм ³	0,34	н.о.
Мутность	мг/дм ³	>100	н.о.
Цветность	градус	53	н.о.
Запах	балл	5, железо	без запаха

* Не определялось.

** В числителе — полевое определение, в знаменателе — определение в лаборатории.

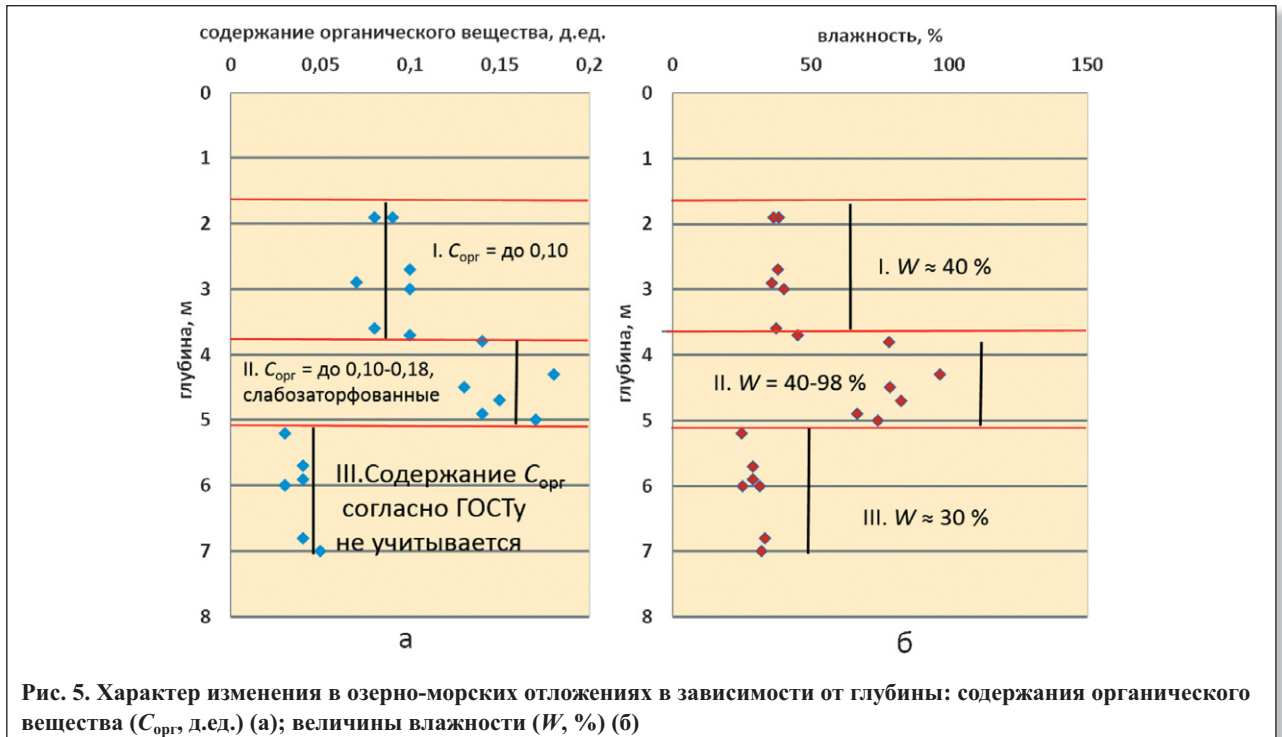


Рис. 5. Характер изменения в озерно-морских отложениях в зависимости от глубины: содержания органического вещества ($C_{орг}$, д.ед.) (а); величины влажности (W , %) (б)

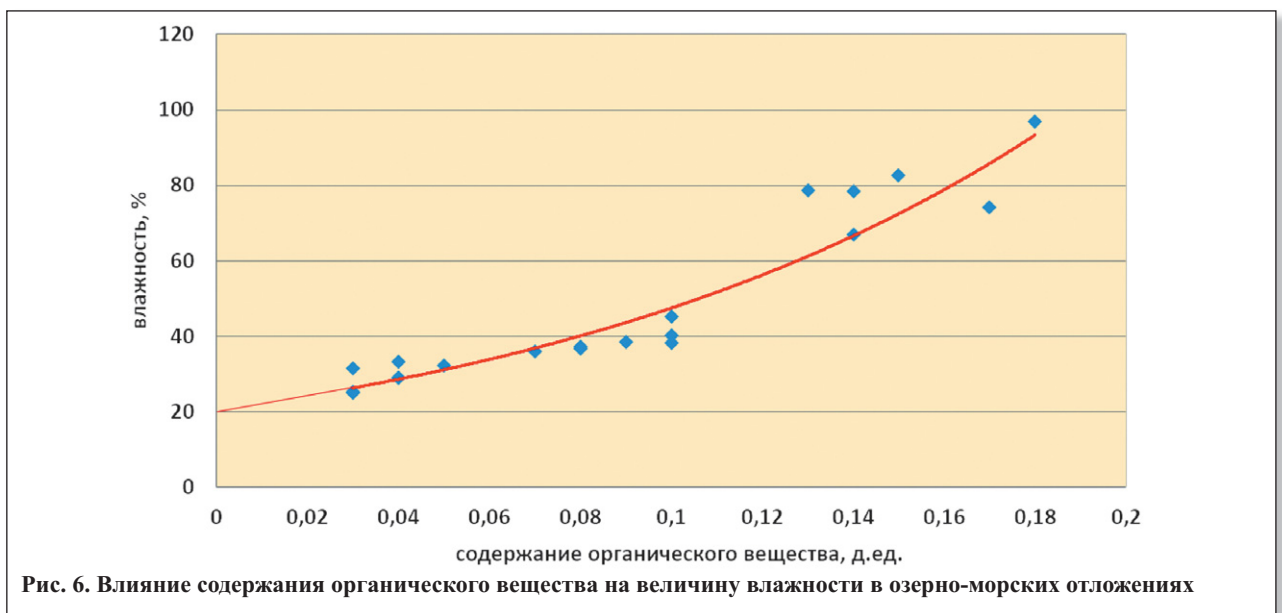


Рис. 6. Влияние содержания органического вещества на величину влажности в озерно-морских отложениях

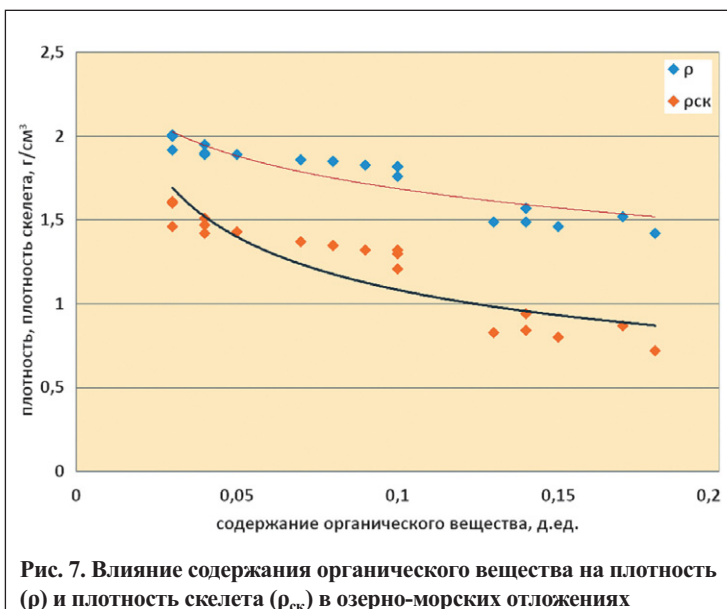


Рис. 7. Влияние содержания органического вещества на плотность (ρ) и плотность скелета ($\rho_{ск}$) в озерно-морских отложениях

оксидов железа. Следовательно, морены при значительной плотности и относительно невысокой влажности обладают пластическим характером деформирования. Обычно цвет таких моренных отложений серо-зеленый, серо-голубой, что вызвано наличием восстановленных форм железа (рис. 9).

Таким образом, несмотря на устойчивую консистенцию ($I_L < 0,5$), в условиях трехосного сжатия морены анаэробной зоны ведут себя как квазипластичные грунты, что предопределяет развитие длительных и крайне неравномерных осадков и в дальнейшем приводит к трещинообразованию в несущих конструкциях (рис. 10).

Анализ устойчивости храма на основе проведенных экспериментальных работ

Реконструкция предусматривает надстройку храма и восстановление венчающих шатров (см. рис. 1), что,

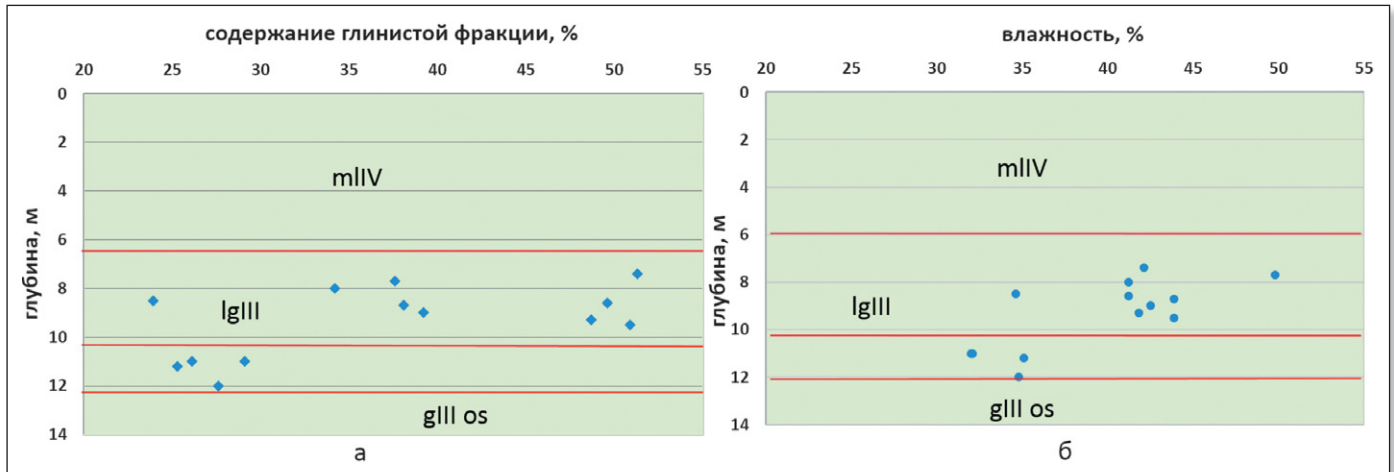


Рис. 8. Характер изменения в озерно-ледниковых отложениях в зависимости от глубины: содержания глинистой фракции (а); величины влажности (б). Обозначения слоев соответствуют рис. 3



Рис. 9. Керн моренных отложений по результатам бурения скважин в разрезе церкви Пресвятой Троицы

Величина давления под подошвой фундамента при наличии целостности лежней и плиты под всем зданием церкви была ниже p_1 (первое критическое давление по Л. Прандтлю) [3]:

$$p_1 = \pi c + \gamma h_{\phi}, \tag{2}$$

где c — величина сцепления, γh_{ϕ} — пригрузка от заглубления фундамента. Таким образом, первое критическое давление (p_1) составляет 0,072 МПа (0,72 кгс/см²) при условии $c = 0,016$ МПа (0,16 кгс/см²), а величина $\gamma h_{\phi} = 0,022$ МПа (0,22 кгс/см²) с учетом взвешивания вышележащей толщи над подошвой фундамента.

Второе критическое давление (p_2) рассчитывается также по формуле Л. Прандтля [3]:

$$p_2 = 5,14c + \gamma h_{\phi} \tag{3}$$

и при тех же условиях составляет 0,11 МПа (1,1 кгс/см²).

Следовательно, в настоящее время действующее давление превышает второе критическое, и грунты основания работают в стадии пластических деформаций, что в конечном итоге приведет к разрушению храма за счет больших и неравномерных осадок, которые не затухают во времени.

соответственно, приведет к возрастанию давления на основание. Как уже отмечалось, несущим слоем служат озерно-морские слабые водонасыщенные грунты с выраженной способностью к развитию пластических деформаций.

В настоящее время давление от сооружения с учетом снижения площади фундаментов за счет разрушения плиты известняка и деревянных лежней составляет 0,13 МПа.

Таблица 3

Показатели физико-механических свойств различных геолого-генетических типов в разрезе основания							
Параметры свойств грунтов (средние значения)	Озерно-морские отложения			Озерно-ледниковые отложения		Ледниковые отложения	
	ИГЭ-2*	ИГЭ-3	ИГЭ-4	ИГЭ-5	ИГЭ-6	ИГЭ-7	ИГЭ-9
Плотность ρ , г/см ³	1,83	1,49	1,90	1,78	1,89	2,14	2,18
Плотность скелета $\rho_{ск}$, г/см ³	1,32	0,83	1,49	1,25	1,41	1,82	1,88
Показатель консистенции I_L (безразм.)	1,10	1,10	0,93	1,14	0,87	0,34	0,19
Влажность до опыта W , %	39,0	79,6	29,6	43,1	33,3	17,9	16,3
Удельное сцепление c , МПа	0,0163	0,0162	0,0164	0,017	0,018	0,038	0,044
Угол внутреннего трения ϕ , °	0	0	0	0	0	<3	<5
Модуль общей деформации, МПа	1,3	1,2	1,4	2,0	3,0	3,5	4,2
$C_{орг}$, д.ед.	0,09	0,15	0,04	-	-	-	-

* ИГЭ-2 — инженерно-геологический элемент.

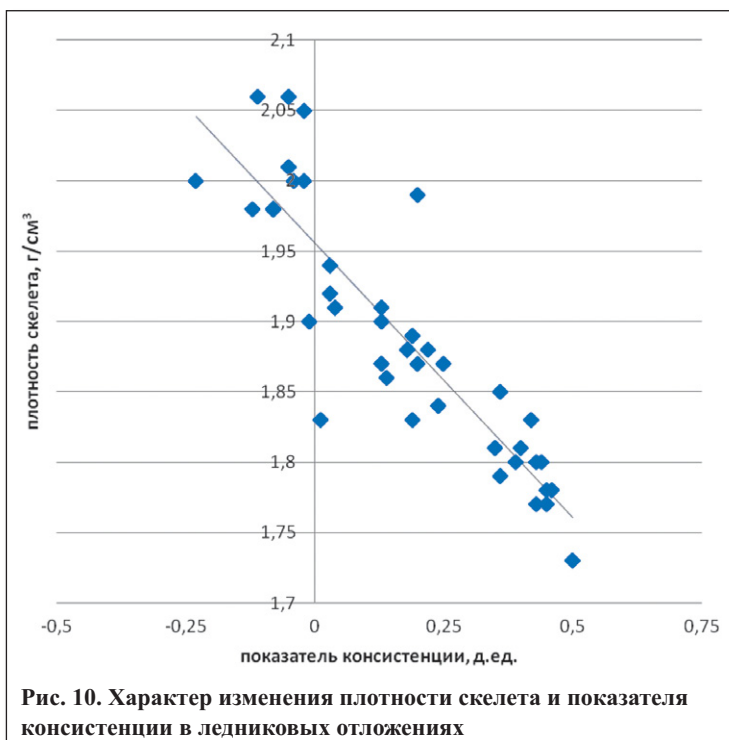


Рис. 10. Характер изменения плотности скелета и показателя консистенции в ледниковых отложениях

Заключение

Для обеспечения длительной устойчивости храма Пресвятой Троицы рассматриваются два возможных варианта усиления фундаментов.

Первый вариант. Известно, что в случае длительного развития осадок за счет пластических деформаций проектировщики рекомендуют устройство свайного фундамента, несущим горизонтом для которого будут служить моренные образования. Причем наиболее часто рекомендуется применение буронабивных свай. Следует отметить, что устройство свайного фундамента не приведет к желаемому результату. Во-первых, наличие напорного водоносного горизонта предопределяет взвешивающий эффект за счет восходящего перетекания подземных вод, снимающего трение по боковой поверхности свай. Во-вторых, высокая коррозионная способность подземной среды по отношению к бетонам, металлам, карбонатным породам, извести, вызванная микробной пораженностью за счет существовавших болот, контаминированных грунтовых вод со стороны Киновеевского кладбища и хозяйственно-бытовых отходов, которые размещались на данной территории в период ее освоения. Как уже отмечалось ранее, активная деятельность сульфатредуцирующих бактерий в толще грунтов основания приводит к образованию H_2S и подкислению грунтовых вод. В-третьих, согласно ГОСТ 23732-2011 характеристики воды, при которых происходит твердение бетонов, должны соответствовать следующим требованиям: величина перманганатной окисляемости воды не может превышать $15 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, интенсивность запаха — не более 2 баллов, допускается наличие на поверхности воды только следов нефтепродуктов [1]. Исходя из результатов исследований грунтовых вод (см. табл. 2) величина окисляемости составила $48 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, а интенсивность запаха — 5 баллов. Кроме того, в водах с низкими значениями pH бетоны не твердеют.

К перечисленным выше факторам следует отнести и квазипластичное состояние морены, залегающей

под озерно-ледниковыми отложениями в условиях повышенного и длительного загрязнения. Многочисленными исследованиями, которые проводились в лабораториях Горного университета, а также в полевых условиях под руководством Р.Э. Дашко, было доказано, что такие морены при испытаниях в условиях трехосного сжатия имеют не только низкие величины углов внутреннего трения, но и невысокие модули общей деформации грунтов $E \leq 5 \text{ МПа}$, что не позволяет считать их надежным несущим горизонтом для свайных фундаментов [2].

Второй вариант. На основании особенностей инженерно-геологических и гидрогеологических условий территории рассматриваемого объекта, а также с учетом характера и длительности интенсивной контаминации подземной среды необходимо предложить восстановление первоначального проекта фундамента, который был рассмотрен ранее во введении при характеристике конструктивных особенностей церкви Пресвятой Троицы. В связи с этим следует использовать устойчивые конструкционные материалы и/или проводить мероприятия, направленные на предупреждение коррозии фундаментов в агрессивной подземной среде. Прежде всего требуется выполнить пропитку всех деревянных конструкций и лежней во избежание их разрушения в результате деятельности подземной микробиоты: микромицетов, актиномицетов и бактерий. Поскольку при высоком содержании агрессивной CO_2 и низких pH в подземных водах не представляется возможным гарантировать сохранность плиты известняка, рекомендуется ее замена на гранитную, имеющую меньшую толщину (не более 30 см). При высокой степени дезинтеграции материала кладки ленточных фундаментов необходимо перейти на капитальные методы их укрепления, одним из которых является устройство «рубашек» из полимерных бетонов и железобетонов, устойчивых при воздействии групп микроорганизмов, которые характерны для разреза основания храма. Восстановление первоначальной конструкции фундаментов храма потребует совершенствования технологии реставрационных работ, особенно при устройстве лежней и плиты под ленточными фундаментами.

Зарубежный опыт реконструкции подземных несущих элементов зданий показывает, что в ряде случаев было реализовано восстановление старинных конструкций, но это подразумевало использование современных материалов. 🌐

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012.
2. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб.: Издательство института «ПИ Геореконструкция», 2014. 280 с.
3. Дашко Р.Э. Механика горных пород. М.: Недра, 1987. 264 с.
4. Кирштейн Г. Строительное искусство. Руководство к возведению фабричных, гражданских и сельских строений. Рига, 1899. 290 с.
5. Свято-Троицкая Александро-Невская лавра. 1713–1913: Историческое исследование доктора церковной истории С.Г. Рункевича. Кн. 2. СПб.: Логос, 2001. 592 с.