

Р.Э.ДАШКО, *д-р. геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*
А.В.ШИДЛОВСКАЯ, *канд. геол.-минерал. наук, доцент, shidanna@bk.ru*
О.Ю.АЛЕКСАНДРОВА, *канд. геол.-минерал. наук, ассистент, alexolga@mail.ru*
И.В.АЛЕКСЕЕВ, *студент*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

R.E.DASHKO, *Dr. in geol. & min. sc., professor, regda2002@mail.ru*
A.V.SHIDLOVSKAYA, *PhD in geol. & min. sc., associate professor, shidanna@bk.ru*
O.U.ALEKSANDROVA, *PhD in geol. & min. sc., assistant lecture, alexolga@mail.ru*
I.V.ALEKSEEV, *student*
Saint Petersburg State Mining University

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБОСНОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИСААКИЕВСКОГО СОБОРА (САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)

Рассмотрены конструктивные особенности подземной части Исаакиевского собора, специфика инженерно-геологического разреза его основания, приведена сравнительная оценка изменения состояния и свойств водонасыщенных песчано-глинистых грунтов четвертичной толщи за 55 лет (1954-2009). Оценена динамика загрязнения грунтовых вод за счет утечек из систем канализации и их агрессивность. Выполнены исследования микробной пораженности грунтов, которая характеризуется аномально высокими значениями. Предложена структура комплексного мониторинга для проблемы обеспечения длительной устойчивости собора.

Ключевые слова: Исаакиевский собор, длительная устойчивость, погребенная долина, слабые грунты, загрязнение грунтовых вод, микробная деятельность, физико-механические свойства, биокоррозия, комплексный мониторинг.

ENGINEERING-GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL PROBLEMS OF ST. ISAAK CATHEDRAL'S LONG-TERM STABILITY SUBSTANTIATION (SAINT-PETERSBURG)

In the paper construction specificity of St. Isaak Cathedral's underground space and engineering geological profile features are considered. The comparative assessment of condition and properties modification of water-saturated quarternary sandy and clay soils during 55 years are taken up (1954-2009). The dynamic of groundwater contamination due to leakage sewers and its aggressiveness are estimated. The researches of microbes activity in soils which are characterized by quasi-heavy values are completed. The structural of complex monitoring to secure of St. Isaak Cathedral long-term stability are proposed.

Key words: St. Isaak Cathedral, long-term stability, paleovalley, weak soils, groundwater contamination, microbes' activity, physical and mechanical properties, biocorrosion, complex monitoring.

Исаакиевский собор, возведенный в 1818-1858 гг., является главным кафедральным собором Санкт-Петербурга. Исаакиевский собор был и остается самым тяжелым зданием в Санкт-Петербурге: его общий вес 320 тыс. т, из них 100 тыс. тонн

приходится на массивную кладку свайно-плитного фундамента.

Свайное поле Исаакиевского собора состоит из 24000 свай, которые полностью располагаются в слабых литориновых и озерно-ледниковых грунтах и соответственно долж-

Сравнительной оценка химического состава грунтовых вод в основании Исаакиевского собора по данным 1954 и 2009 г.

Показатель	Скважина						
	1		2	3		4	
	1954	2009	2009	1954	2009	1954	2009
Содержание, м ² /л							
Ca ²⁺	84,0	560,1	448,0	40,0	133,5	68,0	89,8
Mg ²⁺	77,8	55,3	44,5	28,0	29	53,3	39
K ⁺ +Na ⁺	126,0	816	10,2	370 0	75,1	85,1	27,3
NH ₄ ⁺	Н.о.	0,28	0,10	Н.о.	72,0	Н.о.	5,0
SO ₄ ²⁻	102,0	20,9	34,5	31,2	81,8	200,8	< 2,0
Cl ⁻	384,5	1418	63,8	288,8	53,2	76,5	81,5
HCO ₃ ⁻	201,3	1572	239	707,6	410,5	317,2	42,7
NO ₃ ⁻	Н.о.	2,2	< 0,5	Н.о.	1,8	Н.о.	< 0,5
Железо общее	0,4	95	1,8	Н.о.	367,5	Н.о.	2160
Сухой остаток	1156,0	4125	754,8	1192,0	847,5	680,0	795,0
CO ₂ агрессивная	11,0	Н.о.	Н.о.	Н.обн.	Н.обн.	70,4	Н.о.
Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /л	16,0	152,9	11,5	26,1	415,2	13,1	312,8
pH	7,4	8,6	9,2	7,8	8,6	7,4	8,7
Eh, мВ	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	-108

Примечание. 1. В скважине 4 pH и Eh замерялись в полевых условиях. 2. Н.о. – не определялись; Н.обн. – не обнаружено.

ны рассматриваться как висячие. Массивная плита ростверка, состоящая из гранитных и известняковых плит на известковом растворе, мощностью 7,5 м поднята более чем на 2 м над дневной поверхностью.*

Исаакиевский собор построен в пределах низкой Литориновой террасы и располагается в районе склона левого борта глубокой погребенной долины Невы в коренных отложениях верхнего венда. Геолого-литологический разрез и инженерно-геологические особенности грунтов основания Исаакиевского собора были получены только в 1954 г. В 2009 г., через 55 лет, по инициативе Санкт-Петербургского горного института и договоренности с дирекцией Исаакиевского собора трестом ГРИИ были пробурены четыре скважины в контуре собора: две из которых (3 и 4) глубиной 50 м и две (1 и 2) глубиной 20 м. Было произведено статическое зондирование, в ходе которого фиксировался провал зонда при проходке озерно-ледниковых и моренных отложений.

* Бутиков Г.П., Хвостова Г.А. Исаакиевский собор / Г.П.Бутиков, Г.А.Хвостова. Л., 1974.

Butikov G.P., Chvostova G.A. St. Isaak Cathedral. Leningrad, 1974.

Кровля коренных глин в склоновой части погребенной долины была вскрыта в юго-западной части Исаакиевского собора на глубине 44,5 м, как и в 1953 г. В северном направлении к тальвегу палеодолины кровля коренных пород погружается и соответственно растет мощность четвертичных песчано-глинистых отложений до 65 м. Изменение мощности четвертичной толщи в пределах контура собора на 20-25 м имеет принципиальное значение для оценки условий развития неравномерных деформаций собора. В разрезе четвертичных отложений прослеживаются межморенные, ледниковые, озерно-ледниковые и озерно-морские (литориновые) образования, перекрытые техногенными грунтами. В верхней части разреза отмечаются прослой торфа и заторфованных отложений.

Уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 1,8-2,0 м от поверхности. Сравнительный анализ химического состава воды в 1954 и 2009 г. показывает, что за 55 лет произошло существенное и негативное изменение ее химического состава за счет утечек из системы водоотведения, расположенной по контуру собора (табл. 1). В 2005 г. произошел

прорыв регионального канализационного коллектора, проходящего вблизи юго-восточной части собора, в пределах которой наблюдаются максимальная минерализация воды, а также аномально высокие значения химического и биологического потребления кислорода (2821 мгО₂/л и 281 мгО₂/л соответственно) в скважине с юго-восточной стороны собора.

Окислительно-восстановительный потенциал Eh, замеренный в полевых условиях в 2009 г. в грунтовых водах, составил – 100 мВ, что свидетельствует о существовании резко восстановительной среды за счет окисления природной и техногенной органики. В канализационных стоках 52 % составляют органические соединения (белки, жиры, углеводы), а 48 % – неорганические (хлориды, соединения серы, азота, фосфора). В 1 мл канализационных стоков содержится 10⁷-10⁸ клеток микроорганизмов. Утечки из канализационной сети способствуют повышению агрессивности подземных вод к строительным материалам, прежде всего, известнякам и известковому раствору, которые использовались при устройстве фундамента собора. За 55 лет существенно выросло содержание ионов кальция (скважины 1 и 3), в скважинах 1 и 4 – минерализация. Повышенные содержания в пробах кальция (до 560,1 мг/л) и магния (до 55,3 мг/л), наличие которых нехарактерно для грунтовых вод в пределах города, свидетельствуют о выщелачивании известняков и растворов из заглубленной ниже грунтовых вод части плиты-ростверка.

В песчано-глинистых грунтах основания Исаакиевского собора была обнаружена высокая степень микробной пораженности, фиксируемая по величине суммарного микробного белка:

Грунты	Микробная масса, мкг/г
Литориновые пески	39-70
Озерно-ледниковые суглинки и ленточные глины	135-511
Моренные суглинки	56-85
Межморенные отложения	210-294
Коренные глины венда	186-690

В озерно-ледниковых, межморенных и коренных глинах содержание микробного белка аномально высокое по сравнению с микробной пораженностью тех же грунтов в

пределах исторического центра города, что по всей вероятности, связано с весьма плохим состоянием систем водоотведения собора.

При исследовании биопораженности фрагментов дерева (сосны), извлеченных из техногенного слоя при бурении скважины 1 в 2010 г. с глубины 2,5 м, было обнаружено восемь видов микромицетов, известных как деструкторы различных материалов, при этом доминировали два вида рода *Penicillium**:

Проба	1	2
Микромицеты	Chaetomium globosum Chrysosporium merdarium Gliocladium penicilloides Mucor hiemalis	Cladosporium sphaerospermum Mucor hiemalis Penicillium roqueforti Penicillium velutinum
	Phoma glomerata Penicillium roqueforti	
КОЕ/г	1000±85	230±15

По результатам наших исследований, выполненных в 2009 г., литориновые супеси и озерно-ледниковые суглинки имеют текучую, реже текучепластичную консистенции, их естественная влажность изменяется от 34 до 51 %, что практически коррелируется с данными, полученными в 1954 г. – та же величина консистенции и влажности от 35 до 45 %.

Песчаные литориновые разности в основании собора, как показало определение их седиментационного объема (22,5-24,5 см³), имеют ярко выраженные плавунные свойства за счет высокой микробной пораженности. Водопроницаемость песков снижается до 10⁻³-10⁻⁴ м/сут, подобные значения характерны для глинистых разностей. В таких грунтах наблюдается снижение угла внутреннего трения φ, который для песков может составлять 10-12 град.

Определение характеристик сопротивления сдвигу и параметров деформационных свойств глинистых грунтов в основании Исаакиевского собора проводилось в условиях объемного напряженного состояния σ_{вс} в стабилометре по закрытой системе испытания

* Исследования проводились в лаборатории микологии и альгологии Санкт-Петербургского университета под руководством Д.Ю.Власова.

Параметры физико-механических свойств глинистых разностей в основании собора (2009 г.)

Грунт	Глубина, м	W, %	ρ , г/см ³	c, кПа	E_0 , кПа	$\sigma_{вс}$, кПа
Озерно-ледниковые суглинки и ленточные глины	16,0	34,1	1,86	18	200	180
	17,5	33,8	1,96	18	330	220
	19,0	51,3	1,83	18	290	220
Моренные суглинки (лужская морена)	31,0	19,9	2,15	40	900	400
	35,0-35,2	20,6	2,16	40	800	500
	35,5-35,7	19,4	2,25	50	1000	450
	36,3	18,1	2,28	50	1050	550
	38,5	18,3	2,16	55	900	460

Примечание. W – влажность породы; ρ – плотность породы; c – сцепление; E_0 – модуль общей деформации породы.



Трещины скола в нижней части колонн западного портика Исаакиевского собора

(табл.2). Все исследованные глинистые грунты (озерно-ледниковые и моренные) характеризуются как квазипластичные с углом $\varphi = 0^\circ$. Сравнительная оценка результатов исследований сопротивления сдвигу озерно-ледниковых и моренных отложений 1953-1954 гг. с данными 2009 г. показала снижение их прочности на 30 % и более за счет роста микробной массы.

Выполненные расчеты показали, что грунты в основании Исаакиевского собора работают на стадии развития пластических деформаций, что подтверждается данными наблюдений и геодезических замеров.* Не-

* Дашко Р.Э. Инженерно-геологический и геоэкологический анализ причин деформаций Исаакиевского собора / Р.Э.Дашко, О.Ю.Александрова // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2002, № 5.

Dashko R.E., Aleksandrova O.U. Engineering geological and geoenvironmental analysis of St. Isaak Cathedral deformation cause // Reconstruction cities and geotechnical construction. 2002, N.5.

равномерные деформации Исаакиевского собора приводят к развитию трещин в несущих колоннах портика (см. рисунок).

Выводы

Для прогноза длительной устойчивости Исаакиевского собора необходима организация и проведение комплексного мониторинга собора, в состав которого должны входить наблюдения и контроль за состоянием объекта и компонентов подземной среды:

1. Геодезические наблюдения по маркам, установленным в цоколе здания, а также по поверхностным и глубинным реперам в зоне отдавливания грунтов.

2. Создание объемной модели 3D-развития деформаций несущих конструкций собора с помощью современных лазерно-сканирующих систем.

3. Контроль гидродинамического, гидрохимического и температурного режимов грунтовых вод по специально оборудованной режимной сети гидрогеологических скважин, которая должна фиксировать вымыв строительного раствора и выщелачивание известняков из плиты-ростверка фундамента, а также влияние утечек из канализационной сети и отепляющее действие теплотрассы на изменение химического и температурного режимов грунтовых вод. Периодичность опробования грунтовых вод четыре раза в год.

4. Наблюдения и контроль гидродинамического режима вендского водоносного горизонта для оценки динамики изменения его пьезометрической поверхности и влияние ее современного подъема на напряженно-деформированное состояние в основании собора.

5. Биохимические исследования и наблюдения за газообразованием и ростом микробной массы, а также развитием биокоррозии строительных материалов в специальной смотровой галерее, которая оборудована в теле плиты-ростверка.

6. Оценка состояния деревянных свай и степени консолидации слабых водонасыщенных глинистых грунтов ниже свайного фундамента. С этой целью рекомендуется пройти наклонные скважины под углом 62-63° и длиной 25-30 м, с северо-восточной и юго-западной сторон Исаакиевского собора.

Функционирование системы объектного мониторинга позволит с большой степенью достоверности и надежности выполнять проектные решения по реконструкции и реставрации главного кафедрального собора Санкт-Петербурга и проводить работы по обеспечению его длительной устойчивости.