УДК 624.131:551.435:556.3:624.131.43

А.В.ШИДЛОВСКАЯ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

АНАЛИЗ ПРИЧИН ДЕФОРМАЦИЙ КАЗАНСКОГО СОБОРА И ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕКТНОГО МОНИТОРИНГА

Проанализированы инженерно-геологические и геоэкологические условия в основании выдающегося архитектурно-исторического памятника – Казанского собора, расположенного на Казанском острове в Санкт-Петербурге. Проведен историко-экологический анализ особенностей строительства и эксплуатации Казанского собора. Выделены основные загрязнители подземного пространства, оказывающие негативное влияние на состояние и свойства песчано-глинистых грунтов в основании собора, подземные воды и строительные материалы. Выполнен расчет устойчивости Казанского собора, а также проанализированы особенности развития деформаций собора по данным геодезических наблюдений. Показано, что развитие длительных и неравномерных осадок собора вызвано трансформацией грунтов в его основании и разрушением фундамента. Предложены основные принципы мониторинга Казанского собора.

The engineering geological and geoenvironmental conditions of the architectural and historical monument of Saint-Petersburg – the Kazansky Cathedral, located on the the Kazansky island, are analyzed. The historical and ecological analysis of the Kazansky Cathedral's construction and exploitation are considered. The principal contaminants of underground space that influence negatively on the state and properties of sand and clay soils, groundwater and building materials are defined. The stability of the Kazansky Cathedral is calculated and also the peculiarities of the Cathedral's deformations due to geophysical dates are analyzed. It is demonstrated that the development of long-term and unequal settlements of the Kazansky Cathedral is caused by the negative transformation of soils in its base and foundation destruction. The basic principals of impact monitoring of the Kazansky Cathedral are proposed.

Казанский собор, построенный в 1801-1811 годах по проекту архитектора А.Н.Воронихина, – одно из самых высоких купольных зданий Санкт-Петербурга. Характерной архитектурной особенностью собора служит крестово-купольная форма. Купол поддерживается четырьмя мощными столбами – пилонами. Количество наружных колонн, образующих колоннаду и портик, достигает 136. Устройство 56 внутренних массивных колонн из сердобольского гранита массой 28-30 т каждая и высотой 10,7 м, поддерживающих своды, способствовало утяжелению собора и увеличению давления на основание до 0,25 МПа.

История существования Казанского собора характеризуется несколькими основными этапами. Анализ данных таблицы показывает, что в течение практически 200 лет функционирования не проводились исследования состояния подземных несущих конструкций собора, определяющих длительную его устойчивость.

Свайный фундамент Казанского собора состоит более чем из 18000 сосновых свай. Под стенами собора длина свай составляет 6,5 м, под столбами – 8,0 м. Ростверк Казанского собора устроен из двух рядов бревен, положенных крест на крест. Под пилоны здания фундамент был выложен гранитными плитами, под стенами собора фундаменты представлены бутовой кладкой известняка. Основанием Казанского собора служит высокий цоколь из крупных монолитов серого сердобольского гранита.

Казанский собор находится в северо-восточной части Казанского острова в пределах бортовой части палеодолины р.Невы. Кровля коренных пород – верхнекотлинских глин венда – с восточной стороны собора

Основные этапы функционирования Казанского собора

Период	Целевое назначение собора	Характеристика периода
1811-1917	Действующий храм	Удовлетворительные условия
1917-1932		Ухудшение состояния собора: значительное повреждение колонн, образование трещин в чугунных базах колонн и каменных плитах портиков и колоннад, осадка западного портика, затопление подвалов
1932-1941	С 1932 по 1992 г. Музей истории религии и атеизма; С 1992 г. действующий храм	Реконструкция наружной части собора
1941-1945		Самые значительные повреждения от обстрелов и бомбежек
1945-1951		Восстановительные работы, устранение многочисленных повреждений
1951-1962		Комплексный капитальный ремонт здания, впервые поднят вопрос об обнаружении причин и устранении последствий неравномерной осадки восточной колоннады
1962-1970		Реставрация наружной части собора, заделка трещин в чугунных базах колонн
С 1970 г. по настоящее время		Комплексная реконструкция надземных частей собора, в том числе фасадов, реконструкция сетей водопровода и канализации

вскрывается на глубине 31-35 м, с западной – на глубине около 40 м. Разрез четвертичных пород представлен сложнопостроенным чехлом песчано-глинистых отложений. Кроме того, характерна большая мощность техногенных отложений (8 м), что связано со снятием значительной толщи болотных отложений. Свайный фундамент Казанского собора заглублен как в техногенные пески, так и в литориновые суглинки, содержащие природную и техногенную органику.

Принимая во внимание близкое расположение Казанского собора к каналу Грибоедова, при рассмотрении условий его функционирования необходимо учитывать специфику технологии устройства канала и строительства набережной, а также подготовку территории и качество используемых строительных материалов. На месте современного канала Грибоедова ранее протекала Глухая речка (Кривуша), которая в 1748 г. в верховье была расчищена и соединена с р.Мойкой. Берега Кривуши были низкие и в пределах рассматриваемой территории отличались высокой степенью заболоченности и малой проходимостью. При инженерной подготовке территории проводилось снятие болотных отложений и частично подстилающих их грунтов, подъем территории подсыпкой речными песками хорошего качества. Со второй половины XVIII в. при значительной мощности отсыпанного песка для предотвращения его постепенного погружения в слабые нижележащие грунты применялась специальная технология обработки этих грунтов при помощи механических воздействий и органических соединений (Р.Э.Дашко, 2000). Такой слой был обнаружен в разрезе соседнего участка по набережной канала Грибоедова (Дом книги) и его наличие также может быть выявлено в основании Казанского собора при проведении специализированных исследований.

Особенность химического состава грунтовых вод свидетельствует об их загрязнении канализационными стоками и нефтепродуктами, поступающими от крупной транспортной магистрали города – Невского проспекта. Для грунтовых вод характерно загрязнение по следующим показателям: повышенное содержание аммония NH_4^+ (до 7 мг/л), хлор-иона Cl^- (до 212,70 мг/л), наличие сульфатов SO_4^{2-} (до 83 мг/л), присутствие агрессивной углекислоты $CO_{2агрес.}$ (до 11 мг/л), содержание легкоокисляемой органики – значение перманганатной окисляемости достигает 17,6 мг O_2/л. Минерализация грунтовых вод, достигающая 1072 мг/л, является следствием загрязнения и наличия застойного гидродинамического режима. В грунтовых водах фиксируется повышенное содержание кальция (до 150,3 мг/л) и магния (до 60,75 мг/л), а также высокая жесткость воды (до 12,5 мг-экв/л), что обычно нехарактерно для грунтовых вод города вне

зоны загрязнения и свидетельствует об активном выщелачивании этих элементов из известняков, а также известковых растворов бутовой кладки. Разбавление грунтовых вод наблюдается во время наводнения, когда уровень воды в канале Грибоедова превышает зеркало подземных вод. Минерализация воды в канале Грибоедова в среднем составляет 200 мг/л.

На динамику грунтовых вод в основании колоннады, расположенной со стороны канала Грибоедова, оказывает влияние изменение уровня воды в поверхностном водотоке, в свою очередь, другая часть колоннады не подвержена такому воздействию. Следует отметить, что наибольшие деформации зафиксированы в колоннаде со стороны канала Грибоедова.

Формирование свойств грунтов в верхней толщи разреза основания собора происходило в анаэробной обстановке под болотными отложениями, что предопределило их обогащение органическими остатками абиотического и биотического происхождения и существенно сказалось на снижение прочности. Динамический режим грунтовых вод в основании памятника также приводит к дополнительному ухудшению параметров механических свойств грунтов.

Основные техногенные источники загрязнения грунтовых вод и песчано-глинистых грунтов основания Казанского собора можно разделить на две группы: длительно существующие в историческом аспекте и современные. К длительно существующим источникам относятся несовершенство системы водоотведения (деревянные канализационные коллекторы, выгребные ямы), захоронение бытового мусора, что привело к загрязнению вмещающих и нижележащих грунтов на значительную глубину. Современными источниками загрязнения подземного пространства собора являются: неудовлетворительное состояние действующей системы водоотведения, утечки из канализационных выпусков, расположенных со стороны канала Грибоедова (восточной стороны собора), поступление нефтепродуктов от центральной магистрали города – Невского проспекта.

Биотическое загрязнение водонасыщенных грунтов приводит к образованию сероводорода, присутствие которого отмечается ниже уровня грунтовых вод. Образование сероводорода связано с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий, которые распространены в подземном пространстве исторического центра Санкт-Петербурга. В восстановительной обстановке в процессе образования сероводорода и двухвалентного железа идет формирование гидротроилита $FeS \cdot nH_2O$ в виде серого и темно-серого порошка, зафиксированного до толщи водоупора – моренных отложений.

Тепловыделение из проложенной по периметру собора теплотрассы способствует увеличению скорости протекания физико-химических и биохимических процессов, росту численности микроорганизмов, повышению степени газонасыщения грунтов, провоцируя тем самым газогрязевые выбросы, один из которых был зафиксирован при устройстве фонтана около собора.

Негативная трансформация грунтов в основании Казанского собора, разрушение фундаментов приводит к развитию длительных и неравномерных осадок, вызывает развитие трещин в его несущих конструкциях, в чугунных базах колонн. Трещины в базах колонн собора классифицируются как трещины скола (растяжения), образующиеся под действием горизонтальных растягивающих напряжений.

Развитие деформаций Казанского собора подтверждается данными о нивелировании 29 деформационных реперов, заложенных в здании собора. Наибольшие абсолютные осадки наблюдались в восточной колоннаде (со стороны канала Грибоедова) – от 115 до 128 мм (по данным 1993 г.). Относительная неравномерность осадок между колоннадой и основным зданием, по данным геодезических наблюдений, превышает значения, регламентируемые СНиП 2.02.03-85, что подтверждается выполненными расчетами. Необходимо отметить, что восточная часть колоннады собора испытывает также знакопеременные деформации.

Для обеспечения длительной устойчивости собора необходимо проведение спе-

циальной системы наблюдений и контроля – объектного мониторинга, на базе которого будет проводиться оценка и управление состоянием Казанского собора, а также разработка и корректировка проектов по его защите. С учетом особенностей размещения собора при обосновании концепции и структуры объектного мониторинга необходимо проведение следующих мероприятий:

1. Размещение режимных гидрогеологических скважин на грунтовые воды для контроля гидродинамического, гидрохимического и температурного режимов вблизи канала Грибоедова, со стороны колоннады, испытывающей наибольшие деформации, для оценки характера взаимодействия поверхностных и подземных вод, роли изменения уровня воды в канале в развитии дополнительных деформаций колоннады, а также влияния утечек из канализационных колодцев и участков теплотрассы на изменение химического и температурного режимов грунтовых вод. Периодичность опробования грунтовых вод – 4 раза в год. В периоды подъема уровня воды в канале Грибоедова частота наблюдений определяется индивидуально.

2. Наблюдения и контроль гидродинамического режима нижнекотлинского водоносного горизонта 4 раза в год для оценки динамики изменения его пьезометрической поверхности и ее влияния на длительную устойчивость собора.

3. Устройство временных створов, расположенных по всему периметру собора, для оценки изменения состояния и физико-механических свойств пород в основании собора с определением бактериальной массы и физиологических групп микроорганизмов. Частота опробования разреза – 2 раза в год, глубина скважин с восточной стороны собора (около канала Грибоедова) – 35-40 м, с противоположной стороны – 40-45 м.

4. Оборудование специализированных скважин для наблюдений за газогенерацией в зоне развития максимальных осадок собора и в сквере около собора, где был зафиксирован выход метана. Кроме того, необходима оценка состава биохимического газа. Глубина газовых скважин определяется глубиной залегания потенциально опасных в отношении биохимической газогенерации погребенных болотных отложений и заторфованных пород.

5. Наблюдение за развитием осадок собора с помощью действующих реперов, установленных в цоколях центральной части, колоннаде и в восточной части собора с их нивелированием 4 раза в год, а также за деформациями пород основания по грунтовым реперам.

6. Контроль за устойчивостью набережных канала Грибоедова, находящихся в зоне влияния Казанского собора.

7. Обследование состояния фундамента собора с использованием неразрушающих методов контроля и шурфование.