



Научная статья

Современное состояние надземных и подземных конструкций Александровской колонны – интегральная основа ее устойчивости

Р.Э.ДАШКО, А.Г.КАРПЕНКО✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Дашко Р.Э., Карпенко А.Г. Современное состояние надземных и подземных конструкций Александровской колонны – интегральная основа ее устойчивости // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 757-773. EDN OSYENQ

Аннотация. Александровская колонна как композиционный центр архитектурного ансамбля Дворцовой площади всегда вызывала обеспокоенность общественности и специалистов с точки зрения прогрессивного разрушения гранитного фуста вследствие формирования в нем трещин. В статье проведен анализ основных работ по обследованию и реставрации ствола колонны и других фрагментов надземной части монумента, причин возникновения и развития трещин в колонне. Выполнен анализ аномалий Фенноскандинавского щита и структурно-тектонических условий территории карьера Монферрана, показавший наличие разломов и кольцевых форм в пределах рассматриваемого района. Приведены исследования Н.Хаста по замеру избыточных тектонических напряжений в зоне аномалий (юго-восточная часть Финляндии), действие которых в горизонтальном направлении обеспечило развитие трещин растяжения в толще гранитного массива и позднее в стволе колонны после его установки. Наиболее опасным видом деформации Александровской колонны представляется ее крен в северо-восточном направлении, зафиксированный в 1937 и 2000 гг. Проанализированы конструктивные особенности фундаментов и дополнительных подземных элементов Александровской колонны; дана характеристика грунтов и подземных вод на основе архивных данных. Учтена история контаминации подземного пространства и использован метод аналогий инженерно-геологических и гидрогеологических условий в зоне размещения Александровской колонны и в пределах комплекса зданий Нового Эрмитажа для оценки состояния подземных несущих конструкций монумента. Приведены результаты визуальных наблюдений за характером разрушения и деформаций мощения вокруг памятника, а также его пьедестала, свидетельствующие о развитии неравномерных осадок фундамента. Даны общие рекомендации по организации и проведению комплексного мониторинга для прогноза динамики развития деформаций Александровской колонны.

Ключевые слова: Александровская колонна; устойчивость; гранитный фуст; крен; фундаменты; коррозия; комплексный мониторинг

Поступила: 11.04.2023

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 17.10.2023

Опубликована: 27.10.2023

Введение. Сохранение шедевров культурного наследия различных стран мира, в том числе архитектурно-исторических памятников городов, рассматривается как одна из приоритетных и важнейших задач современности [1, 2]. Решение этой глобальной проблемы связано с привлечением специалистов широкого профиля: архитекторов, реставраторов, скульпторов, строителей, биологов и микробиологов, геотехников, гидрогеологов и специалистов в области инженерной геологии [3, 4].

Ж.Керизель (J.Kerisel, 1908-2005) – глава геотехнической школы Франции, начиная с 1975 г. способствовал становлению и развитию геотехнического направления в изучении длительной устойчивости и спасению архитектурно-исторических памятников. В память о Ж.Керизеле регулярно организуются лекции (Kerisel's lecture) практически на всех международных конференциях (например, International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), 2013, 2017, 2021) [5, 6]. Ж.Керизель совместно с А.Кросе (A.Croce) предложил создать и возглавил технический комитет по сохранению исторических достопримечательностей в рамках международной ассоциации по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (ISSMGE) [6]. По инициативе и непосредственном участии Ж.Керизеля был организован первый международный симпозиум по инженерной геотехнике в Неаполе в 1996 г. в честь А.Кросе. Следует упомянуть



работы итальянских специалистов Р.Джапелли (R.Jappelli), Дж.Виджиани (G.Viggiani) и др., которые активно участвовали и участвуют в спасении шедевров архитектуры. В настоящее время Дж.Виджиани возглавляет ассоциацию итальянских геотехников, которая способствует внедрению в теорию и практику реконструкции и реставрации исторических памятников современных достижений геотехники и инженерной геологии. В Греции этими же проблемами занимаются К.Цацанифос (Ch.Tsatsanifos) и Н.Псарропулос (N.Psarropoulos), которые создали программы спасения Пизанской башни, а также собора в Мехико на основе детального изучения особенностей строения их оснований и изменения несущей способности грунтов во времени.

Спасением архитектурно-исторических памятников Ленинграда занимались профессор Б.Д.Васильев, член-корреспондент АН СССР В.А.Флорин и другие ученые. В настоящее время эту благородную традицию продолжают профессор В.М.Улицкий, генеральный директор ПИ «Геореконструкция» А.Г.Шашкин и др. [7, 8]. Стоит отметить вклад сотрудников кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета в сохранение архитектурного наследия Санкт-Петербурга 18-19 вв. По приглашению Дж.Виджиани в 2013 г. был подготовлен доклад на симпозиуме в Неаполе об обеспечении длительной устойчивости некоторых сооружений города [9].

Один из наиболее значимых архитектурно-исторических памятников, входящих в перечень всемирного наследия, – это Александровская колонна на Дворцовой площади. Монумент находится в историческом центре Санкт-Петербурга, характеризующемся сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, что связано с наличием глубокой погребенной долины, развитием слабых водо- и водогазонасыщенных грунтов, а также таких природных и природно-техногенных процессов как пlying, биохимическое газообразование, высокая коррозионная способность компонентов подземной среды по отношению к конструкционным материалам. Подобные условия требуют нетривиальных подходов к оценке длительной устойчивости Александровской колонны.

Монумент создан по проекту Огюста Монферрана в честь победы русской армии под предводительством императора Александра I в Отечественной войне 1812 г. По мнению одного из главных исследователей творчества архитектора – Н.П.Никитина, Александровская колонна считается лучшей из его работ [10]. При создании и реализации проекта (1829-1834) за основу О.Монферраном были взяты четыре мировых шедевра: колонны Траяна (113 г. н.э.) и Антонина (161 г. н.э.) в Риме, колонна Помпея (298-303 гг. н.э.) в Александрии и Вандомская колонна (1806-1810) в Париже (рис.1). Архитектор ввел новые соотношения между диаметрами гранитного фуста по его высоте, что создало восприятие легкости и стройности всей Александровской колонны [10].

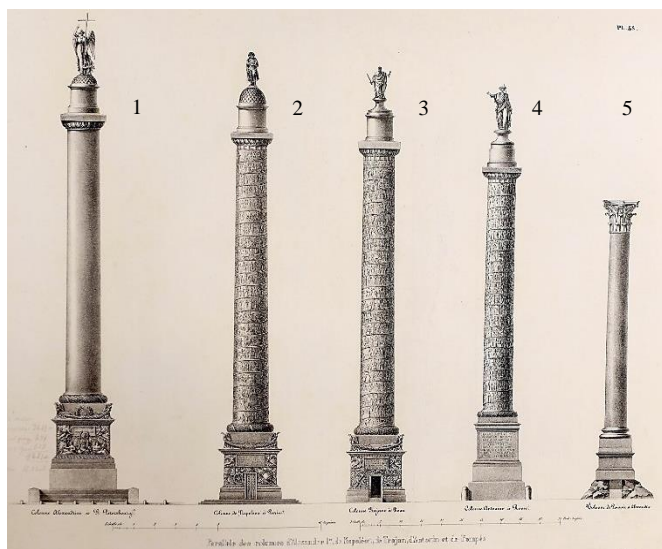


Рис.1. Общий вид монументальных колонн различных эпох

1 – Александровская; 2 – Вандомская; 3 – Траянская; 4 – Помпейская;
5 – Антонинская [10]

Несмотря на композиционную схожесть со своими прообразами, Александровская колонна наиболее грандиозная и самая высокая – общая высота колонны вместе с пьедесталом и статуей составляет 47,5 м.

Конструктивные особенности надземной части Александровской колонны. Визуальный анализ архитектурно-исторического памятника представлен на рис.2. Подробная характеристика каждого фрагмента приведена в табл.1.

При возведении Александровской колонны О.Монферран проявил себя не только как талантливый архитектор и строитель, но и блестящий организатор работ, о чем свидетельствует успешная установка монолитного фуста на нижний пьедестал в 1832 г. Взяв за основу инженерные решения, разработанные в 1830 г. А.Бетанкуром для монтажа колонн



Исаакиевского собора, О.Монферран усовершенствовал систему кабестанов и блоков, предварительно возведя строительные леса на надземной конструкции из кирпичной кладки, поскольку масса гранитного фуста Александровской колонны сопоставима с массой шести колонн Исаакиевского собора. Благодаря доработке технологии А.Бетанкура подъем и установка ствола колонны заняли 100 мин. Событие было столь необыкновенно и грандиозно для Петербурга тех лет, что посмотреть его пришли не только обычные жители, заполнившие площадь и крышу Главного штаба, но и императорская семья. По завершении установки гранитного фуста Николай I, обратившись к архитектору, сказал: «Монферран, Вы себя обессмертили».

Компоненты подземной среды в основании Александровской колонны. До настоящего времени исследования эксплуатационной надежности Александровской колонны проводились лишь для ее надземной части. Для оценки устойчивости архитектурного памятника чрезвычайно большую роль играют его подземные несущие конструкции – фундаменты, устройство которых было предложено и реализовано О.Монферраном, а также особенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий в основании монумента.

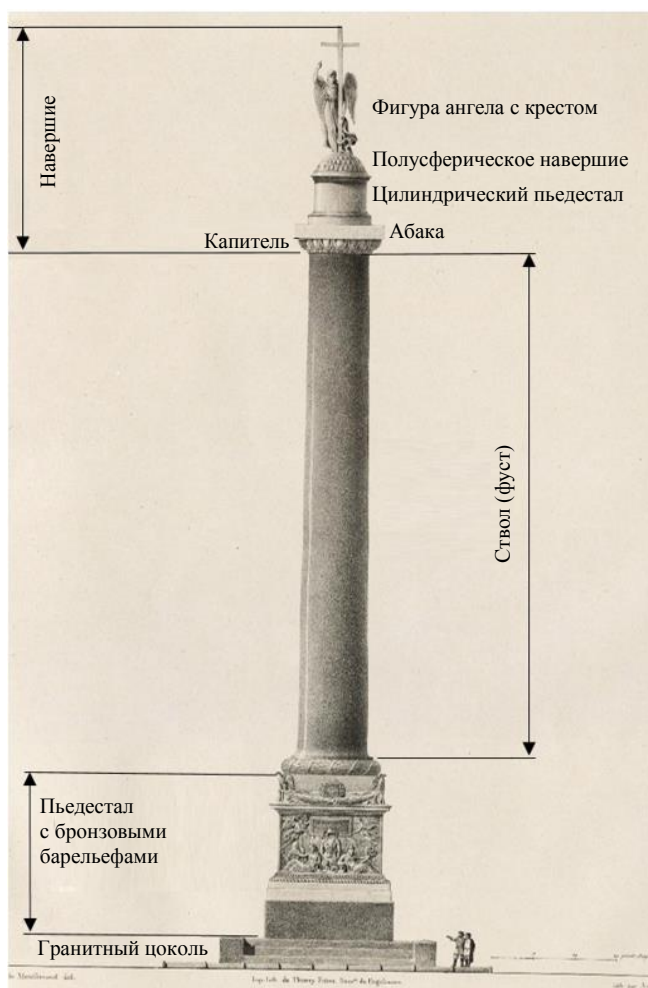


Рис.2. Фрагменты надземной части Александровской колонны (из альбомов О.Монферрана с доп. авторов) [10]

Таблица 1

Характеристика фрагментов надземной части Александровской колонны

Название элементов	Материал элемента	Высота, м	Масса, т
Навершие:			
Крест в руках ангела	Бронза	6,40	37
Фигура ангела	Бронза	4,26	
Полусферическое навершие	Многослойная кладка (гранит, кирпич и 2 слоя гранита), облицованная бронзой		
Цилиндрический пьедестал (верхний)	Кирпичная кладка с бронзовой облицовкой	~1,34	
Абака	Кирпичная кладка с бронзовой облицовкой		
Капитель	Бронза		
Ствол (фуст)	Монолит гранита-рапакиви	25,50	612
Пьедестал (нижний)	8 блоков гранита-рапакиви на известковом растворе	7,62	704
Цоколь	Монолит гранита-рапакиви	2,38	
ИТОГО		47,50	1353

При обосновании места строительства Александровской колонны архитектор выполнил зондирование территории ломом, по результатам которого был обнаружен песчаный «материк», согласно терминологии О.Монферрана. Авторами выдвигается предположение, что Монферран мог знать о первоначальном месте размещения памятника Петру I (проект Б.К.Растрелли), установка которого предполагалась напротив Зимнего дворца. Это положение было подтверждено при проведении работ по устройству фундамента Александровской колонны: рабочие обнаружили 99 свай

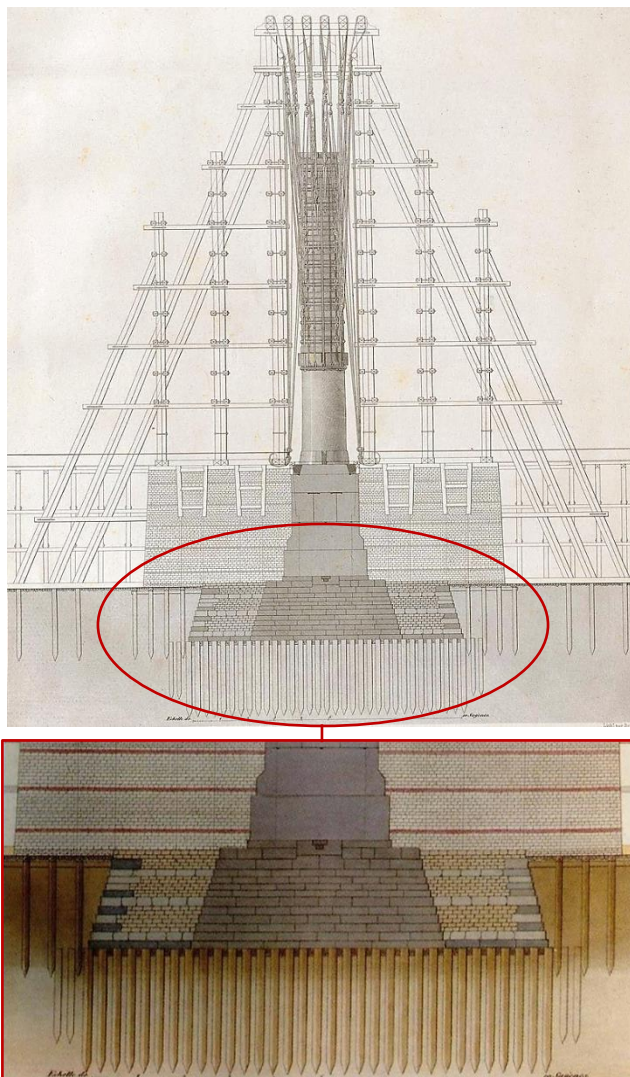


Рис.3. Вид Александровской колонны с подземными конструкциями (из альбомов О.Монферрана) [10]

и каменный ростверк, который позднее ликвидировали. Под монумент был вырыт котлован глубиной 2 сажени (4,26 м) и размерами почти 30×30 м [11]. Со дна котлована забili 1250 сосновых свай длиной 3 сажени (6,4 м) и диаметрами 26-31 см. Расстояние между центрами соседних свай достигало 70 см. После их забивки дно котлована залили водой и по установившемуся уровню обрезали головы свай. Далее был уложен ростверк, выполненный из отдельных крупных блоков гранита толщиной 0,5 м и длиной 1,5 м, уложенных в 11 рядов с небольшим уступом в виде «жесткого ядра», имеющего форму усеченной пирамиды с площадью верхнего основания 12×12 м (рис.3). Для усиления гранитного ростверка со всех сторон были уложены гранитные блоки меньших размеров с бутом путиловского известняка на известковом растворе. После устройства фундамента под Александровскую колонну вокруг котлована с земной поверхности были забиты временные сваи для последующего устройства строительных лесов и кирпичной кладки, предназначенных для подъема и монтажа гранитного фуста (рис.3) [11]. Эти сваи не были демонтированы, обеспечив дополнительную устойчивость подземной части монумента за счет армирования грунтов вокруг ростверка фундамента.

Территория Александровской колонны приурочена к склону глубокой погребенной долины пра-Невы, где отмечается большая мощность четвертичных отложений, достигающая 70 м и более. В структурно-тектоническом отношении, согласно карте новейшей тектоники

Санкт-Петербурга, составленной В.А.Ядутой, территория Дворцовой площади расположена в пределах развития современных блокоформирующих разломов [12].

Геолого-литологический разрез основания монумента показан впервые на основании данных бурения скважины 20, пройденной в 1929 г. трестом «Ленканализация» вблизи северо-западной части ограды Александровской колонны (рис.4)*.

Скважина 20 была пробурена на глубину 25,18 м, вскрыв характерный для исторического центра Санкт-Петербурга разрез, сложенный грунтами четвертичного возраста (снизу вверх): ледникового, озерно-ледникового, озерно-морского и техногенного генезисов (рис.5).

В инженерно-геологическом отношении вскрытые грунты характеризуются как слабые, водо- и водогазонасыщенные разности. При этом песчаные отложения проявляют плавунные свойства, а глинистые образования находятся в квазипластичном состоянии и склонны к тиксотропии (по аналогии с исследованными ранее грунтами в основании Генерального штаба и комплекса зданий Зимнего дворца) [13, 14].

Из рис.5 видно, что несущим горизонтом свайного фундамента Александровской колонны выступают водонасыщенные мелкозернистые серые пески озерно-морского генезиса, ниже прослеживаются слабые глинистые разности озерно-ледникового происхождения. Исследования физико-механических свойств грунтов в 1929 г. не проводились, поскольку в России отсутствовали лаборатории по инженерно-геологическому изучению грунтов.

* Архивные данные предоставлены Комитетом по градостроительству и архитектуре Санкт-Петербурга (КГА СПб).

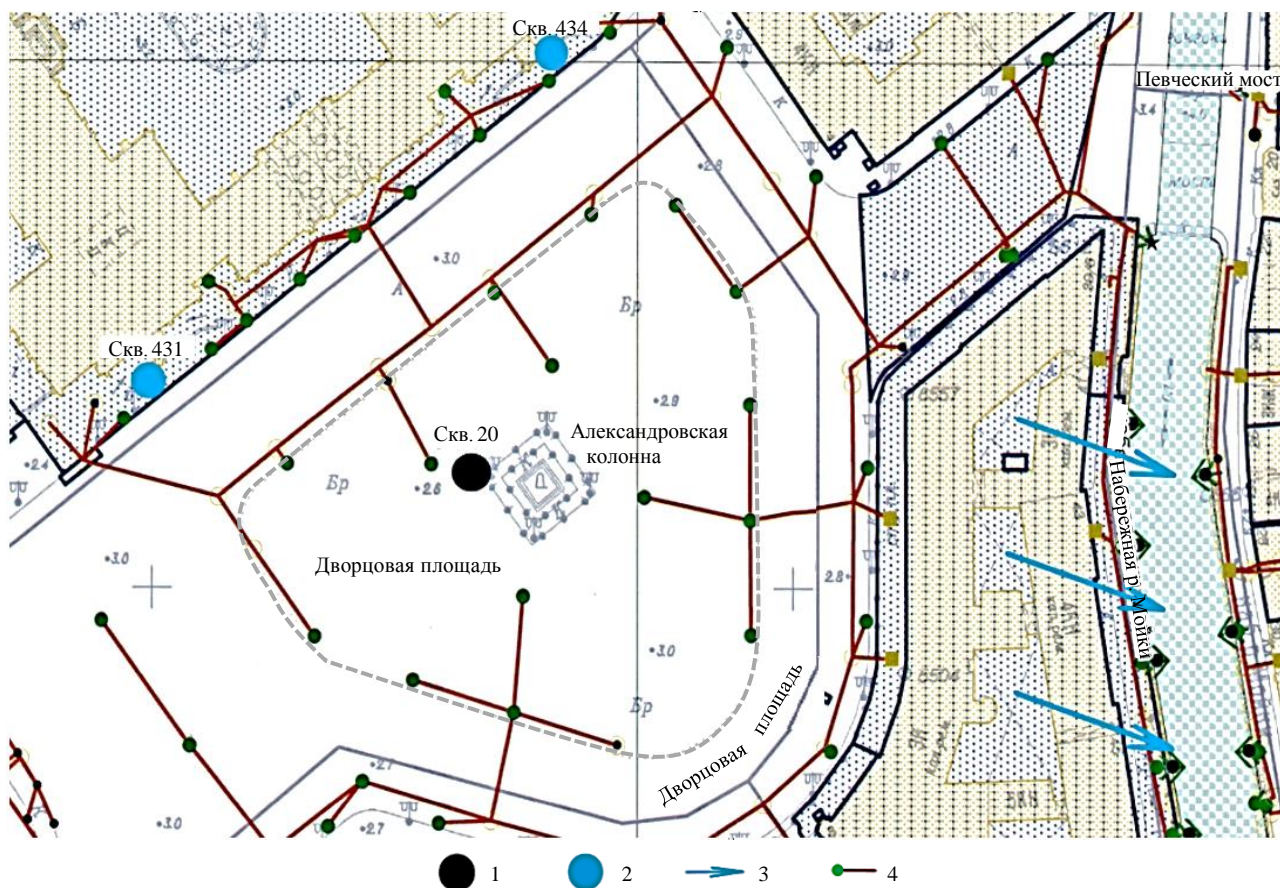


Рис.4. План расположения локальной канализационной сети и геолого-гидрогеологических скважин
1 – опорная геологическая скважина; 2 – гидрогеологическая скважина; 3 – направление разгрузки грунтовых вод;
4 – положение локальной канализационной сети неглубокого заложения

Многочисленные исследования исторического центра Санкт-Петербурга, проводимые кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета, свидетельствуют о формировании природно-техногенного режима грунтовых вод в условиях отсутствия в пределах его территории зон активного дренирования в связи с наличием непроницаемых конструкций набережных рек и каналов, а также образования локальных областей подтоплений за счет потерь из систем водоотведения, особенно в районе расположения Александровской колонны, где присутствуют изношенные локальные канализационные сети (см. рис.4). Такая специфика природно-техногенной обстановки приводит к созданию застойного гидродинамического режима грунтовых вод и активизации их контаминации органическими и неорганическими соединениями различного генезиса [15, 16].

При оценке гидрогеологических условий и анализе формирования современной инженерно-геологической и геотехнической специфики подземного пространства в пределах анализируемой территории необходимо рассмотреть исторический аспект ее контаминации в 17-21 вв. В допетровский период (до 1703 г.), согласно картографическим материалам конца 17 – начала 18 вв., территорию будущей Дворцовой площади покрывали болота. Их влияние по глубине разреза достигает 30 м и более за счет обогащения подстилающей толщи водонасыщенных грунтов абиотической и биотической органикой, в том числе болотными микроорганизмами анаэробных и факультативных форм, а также продуктами их метаболизма (энзимы, кислоты, биохимические газы) [15]. Дополнительным источником контаминации подземной среды рассматриваемой территории служила сельскохозяйственная деятельность существовавших поселений (Гавгуева деревня), способствовавшая увеличению содержания органических и неорганических контаминантов в подземной среде [16].

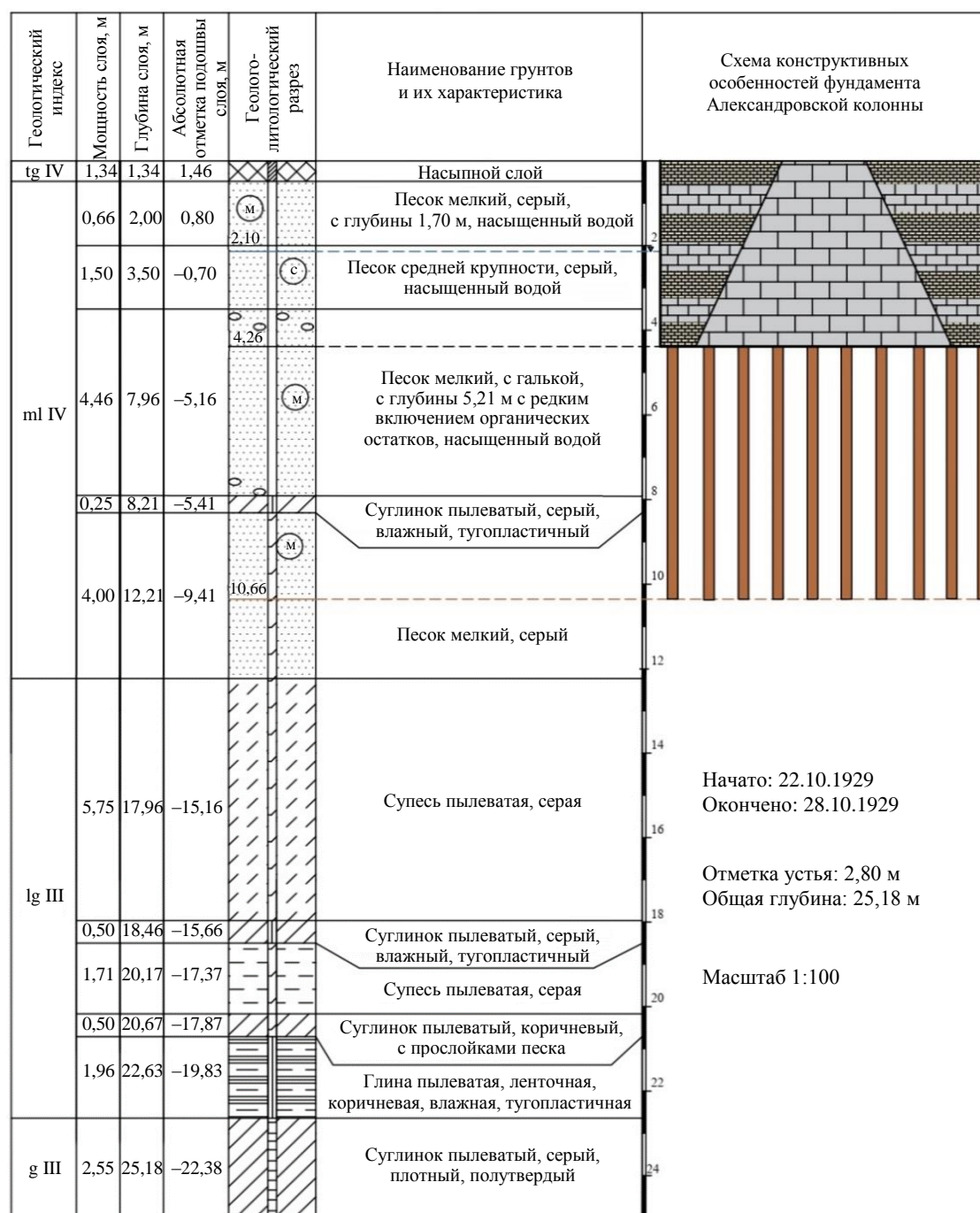


Рис.5. Геолого-литологический разрез основания Александровской колонны (архивные данные КГА СПб)

Опыт наших исследований в пределах исторического центра Санкт-Петербурга показывает, что утечки из канализационных систем в период функционирования города приводят к росту числа и разнообразия таксонов микроорганизмов (в 1 мл стоков присутствует 10^7 - 10^8 КОЕ), а также увеличению содержания белков, липидов и углеводов, которые служат питательной и энергетической средой для аборигенной микробиоты. Неорганическая часть стоков пополняется соединениями азота, серы и фосфора [15].

Опробование грунтовых вод в пределах островной части Санкт-Петербурга, проведенное на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета, показало, что высокое содержание органических соединений приводит к снижению окислительно-восстановительного потенциала E_h грунтовых вод до отрицательных значений. Это положение подтверждается замерами данного показателя в полевых условиях по режимным скважинам [15].



Химический состав грунтовых вод Дворцовой площади отражает интенсивность, характер и длительность контаминации подземной среды согласно результатам опробования скважин, находящихся в непосредственной близости от Александровской колонны (см. рис.4, табл.2).

Таблица 2

Химический состав грунтовых вод в пределах Дворцовой площади
(архивные данные ТРЕСТ ГРИИ, 2002 г.)

Элементы	Количество, мг/дм ³	
	Скв. 431	Скв. 434
Ca ²⁺	160,3	168,3
Mg ²⁺	26,8	55,9
(K+Na) ⁺	2194,5	2750,8
Сумма катионов	2381,5	2975,1
SO ₄ ²⁻	297,8	345,8
Cl	3309,7	4174,7
HCO ₃	311,2	396,6
CO ₃ ²⁻	30,0	36,0
NO ₃	1,50	1,00
Сумма анионов	3950,2	4954,2
Минеральный остаток	6176,1	7730,9
Жесткость общая, град	28,6	36,4
Карбонатная	14,3	18,2
Некарбонатная	14,3	18,2
Fe ²⁺ +Fe ³⁺	Следы	Следы
pH	8,67	8,60
Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /дм ³	50	60
Гумус	46,0	53,3

Примечание. Органолептические свойства: мутная, светло-желтый цвет, без запаха.

По химическому составу грунтовые воды в пределах Дворцовой площади хлоридные натриевые. Отмечаются высокие значения минерализации за счет содержания ионов калия и натрия, хлоридов и сульфатов, что указывает на контаминацию подземных вод утечками из действующих канализационных систем (см. рис.4). Большое количество ионов кальция и магния связано с растворением и выносом щелочноземельных элементов из подземных несущих и ограждающих конструкций зданий Дворцового комплекса.

Многолетний опыт научно-исследовательских работ кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета показывает, что состав подземных вод и их контаминация определяют состояние и свойства грунтов, а также формирование опасных процессов, главным образом за счет деятельности подземных микроорганизмов, которые способствуют образованию биопленок на поверхности минеральных частиц грунта, в том числе песков и глинистых отложений. Такие пленки состоят из живых и мертвых клеток микробиоты и продуктов их метаболизма, что приводит к снижению угла внутреннего трения водонасыщенных песков, переводя их в состояние псевдопесков [15]. Кроме того, за счет деятельности микроорганизмов наблюдается биохимическое газообразование сероводорода (H₂S), метана (CH₄), молекулярного азота (N₂), водорода (H₂), аммиака (NH₃) и продукта дыхания микроорганизмов – диоксида углерода (CO₂), протекающее преимущественно в анаэробных условиях.

Для прогнозирования развития и активизации природных и природно-техногенных процессов следует учитывать растворимость газов в воде и их агрессивность по отношению к конструкционным материалам. Депонирование малорастворимых газов CH₄, N₂ и H₂ в подземной среде приводит к разуплотнению грунтов и формированию газодинамического давления с изменением напряженно-деформируемого состояния всей толщи [15]. К хорошо растворимым газам относятся H₂S, NH₃ и CO₂, среди которых главное значение имеет сероводород, встречаемый в пределах разреза исторического центра Санкт-Петербурга до глубины 25 м, иногда ниже. Он опасен по отношению к различным конструкционным материалам – природному камню (прежде всего, карбонатным породам),



бетонам, железобетонам и металлам. Кроме того, агрессивен CO_2 , формирующий уголекислотную агрессивность. NH_3 в водной среде представлен в виде иона аммония (NH_4^+), который способствует диспергации глинистых грунтов, а также оказывает слабое агрессивное воздействие на бетоны.

Специфичность условий подземного пространства предопределяет развитие не только коррозионных, но и биокоррозионных процессов подземных конструкций и строительных материалов. Анализ природы биокоррозии и ее протекания должен основываться на оценке влияния метаболитов микробиоты (энзимов, органических кислот, газов), а также деятельности микроорганизмов, образующих на поверхности конструкции биопленки и извлекающих из кристаллической решетки минералов строительных материалов недостающие им элементы путем ее разрушения [15].

Методология. В настоящее время не разработаны единая методология, методы и методика исследований для анализа длительной устойчивости архитектурно-исторических памятников, их обследования, а также составления проектов реконструкции и реставрации объектов культурного наследия, особенно в исторических районах мегаполисов [7, 14].

В основу методологии оценки длительной устойчивости архитектурно-исторических памятников Санкт-Петербурга нами заложен концептуальный подход к изучению подземного пространства как многокомпонентной системы: дисперсные грунты, вмещающие подземные воды, микроорганизмы, биохимические и глубинные газы, а также подземные несущие конструкции. Проведен анализ состояния и причин развития деформаций сложнопостроенной надземной части Александровской колонны, работы по обеспечению сохранности которой начали проводиться, начиная с первых лет функционирования монумента, что было вызвано трещинообразованием в гранитах-рапакиви фуста колонны. Для установления причин его дезинтеграции нами была выполнена оценка структурно-тектонических условий территории карьеров Монферрана в юго-восточной части Финляндии, где добывались монолиты для Александровской колонны и колонн Исаакиевского собора. Подобная оценка до настоящего времени не проводилась. С этой целью анализировались работы шведского геомеханика Н.Хаста по замеру избыточных тектонических напряжений в верхней части разреза рассматриваемого района Фенноскандинавского щита. Действие таких напряжений способствовало развитию микротрещиноватости гранитов в горизонтальном направлении по длине извлеченного монолита. Было выполнено сопоставление прочности на растяжение образцов гранита-рапакиви с действующими тектоническими напряжениями по Н.Хасту. Вполне понятно, что установка колонны в вертикальное положение привела к постепенному раскрытию трещин растяжения, которые визуальнo фиксировались как вертикальные либо субвертикальные.

Впервые выполнен анализ состояния подземных конструкций Александровской колонны – фундамента в сочетании с подпорными элементами в условиях их взаимодействия с многокомпонентной подземной средой: водонасыщенными песчано-глинистыми грунтами, сильно загрязненными подземными водами, микроорганизмами и биохимическими газами. Для решения этой проблемы применен метод аналогии для оценки состояния фундаментов Александровской колонны с характером разрушения подземных несущих конструкций Нового Эрмитажа, находящегося в непосредственной близости в сходных инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических условиях. Исследования состояния подземных и надземных конструкций Нового Эрмитажа проводились под руководством Р.Э.Дашко в конце 20 – начале 21 вв. Методология анализа причин разрушения несущих конструкций в условиях их взаимодействия с многокомпонентным подземным пространством полностью себя оправдала при прогнозировании длительной устойчивости сооружений различного назначения, в том числе архитектурно-исторических памятников, их реконструкции и реставрации, а также при создании системы комплексного мониторинга [17].

Обсуждение результатов. *Анализ состояния надземной части Александровской колонны.* Александровская колонна была освящена и официально открыта в 1834 г., но уже в 1836 г. на поверхности гранитного фуста начали отмечать известковые потеки. После обследования ствола колонны О.Монферран пришел к выводу, что дождевая вода, которая проникает через отверстия в цилиндрическом (верхнем) пьедестале, вымывает известковый раствор кирпичной кладки [18].

В 1838 г. зафиксированы первые трещины в гранитном монолите колонны. Комиссия по строительству Исаакиевского собора заключила, что трещины – результат «оптического обмана» за счет особенностей структуры гранита-рапакиви – скопления темных слюд в виде «полос». К 1841 г. возникла необходимость повторного обследования колонны, на основании которого



комиссия признала существование реальных трещин, было исследовано состояние гранитной вставки (размерами 0,31×0,23×0,13 м), установленной на конце одной из трещин в процессе подготовки монолита для ствола колонны [19]. Реставрационные работы, выполненные с 1836 по 1841 гг., охарактеризованы в табл.3. Несмотря на визуальную очевидность формирования и развития трещин на поверхности фуста, в Санкт-Петербургских ведомостях № 240 от 1841 г. была опубликована статья, представляющая полуофициальный отчет о проделанных работах комиссии, в которой «доказывалось», что «темные полосы, заметные на колонне... оптический обман» [19].

К сожалению, достоверной информации об исследованиях, проводимых в последующие 20 лет, нет, но точно известно о реставрационных работах, направленных на устранение дефектов в нижнем пьедестале в период 1840-1850 гг. (табл.3).

В 1861 г. Александром II был учрежден Комитет для исследований повреждений Александровской колонны, в который вошли: от Института Корпуса инженеров путей сообщения (ныне – ПГУПС) – В.Д.Евреинев, С.В.Кербедз и В.П.Соболевский; от Института Корпуса горных инженеров (ныне – СПбГУ) – Г.П.Гельмерсен; от Академии наук – Э.И.Эйхвальд, А.Я.Купфер; от Императорского Санкт-Петербургского университета (ныне – СПбГУ) – А.А.Воскресенский; архитекторы высочайшего двора – К.А.Тон, А.П.Брюллов, А.И.Штакеншнейдер, Ю.А.Боссе, а также бывший помощник О.Монферрана – А.А.Пуаро, лично участвовавший в осмотре колонны в 1841 г. Члены новой комиссии после обследования колонны пришли к заключению, что разрушение фуста колонны происходит за счет формирования трещин на ее поверхности, в очередной раз опровергая результаты исследований 1841 г. [20].

Подробный отчет обследования колонны в 1861 г. представлен в статье директора Горного института (1856-1872) – Г.П.Гельмерсена [19]. Выполненные лично им исследования трещиноватости фуста позволили оценить особенности ее развития: тонкие волосные трещины прорезают всю поверхность фуста от капители до границы пьедестала; выделены три системы трещин: юго – юго-восточная, северо – северо-восточная и восточная; кроме того, на юго – юго-восточной стороне, где размещается гранитная вставка, отмечаются трещины различной длины и раскрытия; западно – юго-западная, западная, северо-западная и северная стороны колонны отличаются меньшим количеством трещин и повреждений, чем юго-восточная и северо – северо-восточная стороны. Наиболее серьезные дефекты находятся на южной стороне, где расположена гранитная вставка [19].

Другой участник Комитета – генерал-майор В.Д.Евреинев при обследовании фуста отмечал, что «совокупность трещин как на юго-западной, так и на северо-восточной сторонах колонны, образует как бы полосу, пересекающую колонну сверху вниз», что впоследствии могло бы привести к обрушению колонны вследствие смещения ее верхней части [20].

В ходе обследования Александровской колонны члены Комитета пришли к мнению, что фиксируемые на фусте трещины существовали до его постановки на нижний пьедестал и не были обнаружены в первые годы функционирования монумента в связи с их искусным «замаскированием». Г.П.Гельмерсен также высказал предположение, что волосные трещины могли существовать в массиве гранита-рапакиви до проведения работ по отработке монолита [19]. На данном утверждении остановимся подробнее.

Карьеры Монферрана располагаются в юго-восточной части Финляндии. Рассматриваемая территория приурочена к аномальным участкам Фенноскандинавского щита (зонам погружения) и характеризуется сложными структурно-тектоническими условиями [21], на что указывают данные космогенной карты (рис.6) [22].

Наличие кольцевых структур в сочетании с разломами различного направления в границах размещения карьера Монферрана определяет уровень тектонических напряжений [23], что подтверждается исследованиями, выполненными на Кольском п-ове [24].

Как известно, тектонические напряжения наиболее активно проявляются в кристаллических породах фундаментов древних платформ и складчатых поясов. В середине 20 в. на Фенноскандинавском щите Н.Хаст проводил полевые замеры горизонтальных тектонических напряжений, что позволило ему установить характер изменения их величины с глубиной z по зависимости [25]

$$\sigma_x + \sigma_y = (19,1 \pm 0,1) + (0,099 \pm 0,003)z.$$



Таблица 3

Реставрационные работы Александровской колонны в 19-21 вв. [18]

Название элементов	Изменение состояния элемента	Время и результат обследования
Фигура ангела с крестом	Нарушение целостности фигуры	1963 г. Реставрирована фигура ангела 1991 г. Выполнено обследование 2001-2003 г. Ликвидированы трещины в бронзовой фигуре ангела
Полусферическое навершие	Выщелачивание дождевой водой известкового раствора кирпичной кладки	1836 г. Заделаны зафиксированные отверстия; удалены известковые потеки на колонне 1991 г. Выполнено обследование 2001-2003 гг. В процессе реконструкции из-под бронзового покрытия абаки было удалено около 2,5 т разрушенного кирпича. Во избежание повторного увлажнения кладки была создана система вентиляции и водоотведения
Цилиндрический пьедестал (верхний) Абака Капитель	Отсутствие нескольких болтов в верхней части скульптуры, негерметичность шва между цилиндром постамента и капителью, затеки под капителью	1950 г. Заменены болты, заделаны повреждения от осколков, пропаяны швы на абаке 1963 г. Удалены следы выщелачивания дождевой водой раствора кирпичной кладки абаки 1991 г. Выполнено обследование 2001-2003 гг. Отреставрированы щели и трещины в бронзе, кирпичная кладка абаки, создана система вентиляции
Ствол колонны (фуст)	Обследование колонны на наличие трещин и опасность их дальнейшего развития	1838 г. Проанализированы причины формирования трещин на поверхности гранитного монолита колонны 1841 г. Трещины заделаны мастикой, заменена старая гранитная вставка, поверхность колонны отполирована
	Установлено наличие трещин, уже существовавших в период возведения колонны	1861-1862 гг. Выявлены причины появления трещин; составлена карта трещин в масштабе 1:14; проведена расчистка существующих трещин от выветрелого гранита, которые затем заполнены портландцементом
	На основе обследования 1880 г. составлен новый план реставрационных работ	1911-1912 гг. Расчищены старые трещины, заполнены портландцементом, в них вставлены бруски («петухи»), под капителью удалены «сталактитовые натеки»
	На стволе колонны отмечен рост числа трещин, их длины и раскрытия. Крен колонны	1935-1937 гг. Проведены геодезические исследования; смещение от оси колонны в северо-восточном направлении – 31 мм
	Обнаружены дефекты в швах, натеки на фусте	1950 г. Залит шов между фустом и базой колонны, удалены следы подтеков из-под абаки
	Появление новых трещин	1954 г. Проверка качества портландцемента в швах вокруг вставок – «петухов»
	—	1963 г. Составлена схема расположения трещин на фусте, укреплены старые гранитные вставки
	Крен колонны	2000 г. Произведены геодезические измерения вертикального положения колонны, отклонение от оси на 65 мм в сторону Генерального штаба и набережной р. Мойки – Певческий мост
	—	2001-2003 гг. Заменены некоторые гранитные вставки колонны, трещины заполнены мастикой, отполирован ствол колонны
Пьедестал (нижний)	—	1840-1850 гг. Исправлены поврежденные части, восстановлены сколы, залиты свинцом разошедшиеся швы, произведена полировка
Цоколь	—	1912 г. Проведена реставрация и полировка гранитных элементов 1963 г. Реставрированы барельефы пьедестала, гранитные элементы с заполнением утраченных элементов 2001-2003 гг. Отреставрирован гранит цоколя и пьедестала, ликвидированы щели между блоками ступеней и цоколем постамента



Поскольку монолит для колонны отбирался на глубине 7 м, сумма таких горизонтальных напряжений достигала почти 20 МПа, что способствовало формированию в толще пород субгоризонтальных микротрещин растяжения, которые трудно идентифицируются визуально. Выбор данного места для отбора гранита-рапакиви О.Монферран объяснял расположением требуемого монолита между горизонтальными макротрещинами, предопределившими первоначальный размер диаметра колонны [11]. Такие трещины разделяют массив на пласты, формируя так называемую структуру «слоеного пирога», согласно терминологии М.А.Иванова [26].

Исследования прочности образцов гранита-рапакиви на сжатие были проведены еще в середине 19 в. в механической лаборатории Института Корпуса инженеров путей сообщения. Максимальная величина сопротивления сжатию не превышала 58 МПа [27]. Как известно, прочность на растяжение скальных пород составляет в среднем 1/10 от сжатия, т.е. для исследуемого гранита-рапакиви оно не превосходит 6 МПа.

После транспортировки монолита колонны от карьера на Дворцовую площадь, обработки, полировки и установки на пьедестал, в гранитном стволе микротрещины приняли субвертикальное направление. Под собственным весом фуста микротрещины трансформировались в макродефекты. Протеканию этого процесса способствовало дополнительное давление за счет установленных выше фрагментов колонны (см. табл.1). Температурные напряжения в полиминеральной породе, а также ветровые нагрузки способствуют росту существующих и появлению новых трещин в фусте. О действии этих природных факторов на деградацию гранитов-рапакиви писал еще Г.П.Гельмерсен [19].

В 2021 г. профессором Санкт-Петербургского горного университета М.А.Ивановым были проведены исследования гранитного ствола с помощью бинокля и цифровых снимков, которые позволили составить схему трещиноватости северной и южной частей Александровской колонны и их совмещенной проекции (рис.7) [26].

Исследования М.А.Иванова свидетельствуют о том, что продолжают развиваться только вертикальные и субвертикальные трещины растяжения, которые существовали еще в массиве гранитов-рапакиви *in situ*, т.е. до их извлечения из карьера (рис.7).

Необходимо упомянуть исследования петербургских микробиологов, занимающихся проблемой биогенного выветривания гранитов-рапакиви архитектурных памятников Санкт-Петербурга

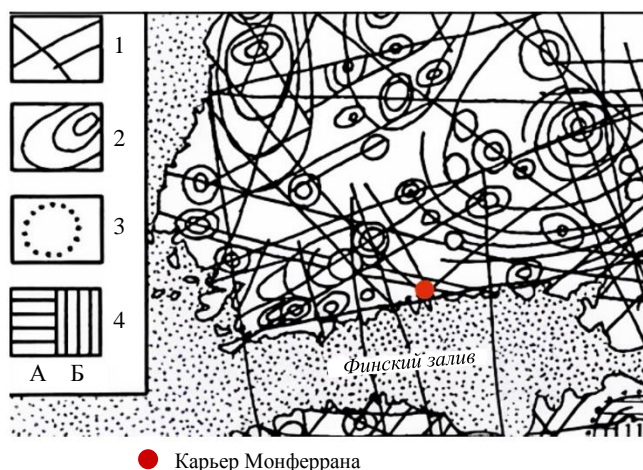


Рис.6. Фрагмент космотектонической карты северо-запада Русской равнины [22]

- 1 – трансгрессивные, региональные и локальные разломы;
2 – кольцевые структуры; 3 – островные возвышенности (останцы неогеновой озерно-морской террасы);
4 – островные возвышенности: цокольные (А) и нацело сложенные N-Q отложениями (Б)

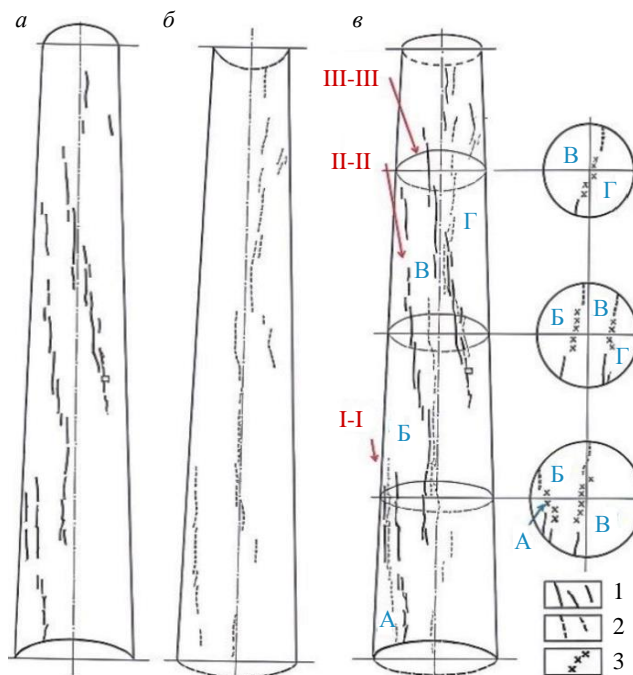


Рис.7. Схема трещиноватости гранитного фуста Александровской колонны (данные М.А.Иванова):

- а – трещины южной стороны колонны (1);
б – трещины северной стороны колонны (2);
в – совмещенные проекции а и б.

Поперечные разрезы иллюстрируют расположение предполагаемых трещин внутри колонны (3).

I-I, II-II, III-III – выделенные зоны трещиноватости;
А, Б, В, Г – блоки, на которые трещины делят колонну [26]



в условиях городской среды [28, 29]. Учеными было установлено, что расселение микроорганизмов приурочено к увлажненным трещинам в породе, при этом рост массы биопленок способствует увеличению их раскрытия [30]. Среди наиболее активных биодеструкторов гранита-рапакиви отмечают: актиномицеты, микромицеты, силикатные бактерии, фотоавтотрофные и диатомовые водоросли [31]. Тем не менее, требуется уточнение присутствия указанных таксонов микроорганизмов в трещинах гранитного ствола колонны и их деятельности, направленной на активность протекания рассматриваемого процесса. Микробиологические исследования проводились лишь для тех памятников, гранит которых контактирует с земной поверхностью, либо находится на небольшой высоте от нее. В результате поступление микробиоты осуществляется за счет загрязнения мощения вокруг памятника, атмосферных осадков, пыли, а также капиллярного подсоса грунтовых вод, уровень которых в историческом центре отмечается на небольшой глубине (не более 2 м).

Трещинообразование – не единственная проблема, с которой сталкиваются специалисты при изучении состояния наземных фрагментов Александровской колонны. Проблему выщелачивания известкового раствора из кирпичной кладки удалось решить лишь к началу 21 в. За 188 лет с момента открытия Александровской колонны специалистами проведены многочисленные обследования ее элементов и, по меньшей мере, девять циклов комплексных реставрационных работ (табл.3).

Как видно из табл.3, последние комплексные исследования и реставрационные работы всех наземных фрагментов памятника проведены в 2001-2003 гг., в том числе акустическое изучение ствола колонны по высоте для определения ее состояния и ресурса монолитной части [18].

При визуальном обследовании в 2022 г. авторами отмечались следующие дефекты в гранитном пьедестале и цоколе: сколы, трещины, расхождение гранитных блоков ступеней цоколя, солевые высолы на поверхности, что фиксировалось еще в 19 в. (табл.3).

Несмотря на важность проблемы трещинообразования монолитного ствола колонны, наибольшую тревогу, по нашему мнению, вызывает крен памятника, впервые зафиксированный в 1937 г. и составивший 31 мм. Повторные геодезические замеры были произведены спустя более чем 60 лет, по результатам величина отклонения колонны от ее вертикальной оси достигла 65 мм (табл.3). По данным замеров крен направлен в северо-восточном направлении в сторону Певческого моста [18]. На основании результатов наблюдений была рассчитана скорость крена, составившая 0,5 мм/год. Согласно мнению специалистов, занимающихся безопасностью эксплуатации зданий, в том числе архитектурно-исторических памятников, их реконструкцией и реставрацией, такая величина скорости крена считается опасной. В интервью, посвященном состоянию Александровской колонны, заслуженный архитектор России Р.М.Даянов отметил, что в 2003 г. был произведен расчет величины максимально допустимого крена колонны, который составил 60 мм. После 2000 г. геодезические наблюдения колонны не проводились.

Для оценки допустимой величины крена проведем следующий анализ. Александровская колонна относится к абсолютно жестким сооружениям, аналогом конструкции которых служат дымовые трубы, градирни и другие подобные объекты. Согласно инструкции по возведению таких сооружений (ВСН 430-82), отклонение оси трубы от вертикали допускается для труб высотой $H \leq 100$ м не более 0,002 ее высоты при условии, что данное отклонение не превышает 150 мм. Высота Александровской колонны равна 47,5 м, соответственно для нее предельная величина отклонения составляет 95 мм. Рассчитанное значение требует корректировки – следует учитывать уникальность данного архитектурного памятника и значительный срок его функционирования. Принимая во внимание замеренную величину отклонения колонны от вертикальной оси, равную 65 мм, можно рассчитать существующую относительную деформацию, которая составляет 0,0014 (отношение величины крена к высоте всего монумента). Превышение этого значения для обеспечения устойчивости рассматриваемого объекта необходимо уточнить при проведении комплексного мониторинга, включающего геодезические наблюдения, а также выполнение специальных расчетов на основе положений строительной механики [32-34].

Современное состояние подземной части Александровской колонны. Как уже отмечалось ранее, в настоящее время в силу отсутствия полной информации об инженерно-геологических



условиях подземного пространства Александровской колонны для оценки современного состояния ее подземных конструкций может быть использован метод аналогий условиям в зоне основания Нового Эрмитажа, характер разрушения фундаментов которого изучался Р.Э.Дашко в конце 20 в. Предложено рассматривать Новый Эрмитаж в качестве аналога, поскольку он находится в непосредственной близости от Александровской колонны (200 м к северо-западу), имеет идентичные инженерно-геологические и гидрогеологические условия, а также сходную историю контаминации подземного пространства. В пределах зоны размещения Нового Эрмитажа отмечается наличие загрязненных грунтовых вод за счет длительной контаминации канализационными стоками; присутствие в разрезе основания плывунов, глинистых грунтов, характеризующихся крайней степенью неустойчивости, а также большого количества гидротроилита, который свидетельствует о восстановительной обстановке в подземном пространстве и образовании H_2S . В ходе исследований, проведенных во дворах Нового Эрмитажа, были обнаружены малорастворимые газы, эксгаляция которых наблюдалась в виде пузырьков различных размеров [15]. Подобное состояние грунтов и газогенерация определяются высокой микробной пораженностью компонентов подземного пространства, которые не учитываются в практике проведения обследования архитектурно-исторических памятников и оценки развития коррозии строительных материалов.

Особо следует остановиться на состоянии подземных конструкций Нового Эрмитажа, поскольку при устройстве фундаментов в качестве распределительной плиты использовались путилевские известняки, а также деревянные лежни из сосны. Те же материалы применялись при устройстве подземной части Александровской колонны. При обследовании было обнаружено разрушение известняков местами до состояния доломитовой муки. Лежни были поражены бактериями и микромицетами. На некоторых деревянных сваях, служащих фундаментом мостовых переходов вблизи Дворцовой площади, основное поражение вызвано лигнинразрушающими бактериями, характерными для болотной микрофлоры [15]. Чаще всего биокоррозия древесины выражается в виде изменения ее цвета и структуры, легкого разделения на отдельные волокна и выделения воды при надавливании; при высушивании такая древесина принимает «псевдокамневидный» вид за счет белков (энзимов), склеивающих волокна [35, 36]. При средней плотности сосны $0,52 \text{ г/см}^3$ плотность древесины, пораженной лигнинразрушающими бактериями, не превышала $0,28 \text{ г/см}^3$, в некоторых случаях – ниже, что свидетельствует о потере свай функции несущей конструкции. Вполне понятно, что выщелачивание карбонатных пород и известкового раствора из кладки фундаментов, а также деструкция деревянных лежней создает условия для развития дополнительных и неравномерных деформаций подземных несущих и ограждающих конструкций, которые в совокупности с осадкой грунтов основания привели к формированию трещин в несущих стенах Нового Эрмитажа, продолжающемуся по настоящее время. Очевидно, назрела необходимость изучения подземных несущих конструкций Александровской колонны с целью оценки их состояния и влияния деструкции фундамента на развитие крена [8, 37].

Возможность развития крена будет определяться общим давлением под подошвой «жесткого ядра», принимая во внимание, что сосновые сваи разрушены за счет активной биокоррозии дерева в пределах рассматриваемой территории. Кроме того, необходимо отметить эксцентриситет действующей нагрузки за счет смещения положения фигуры ангела относительно центра полусферического навершия в северо-восточном направлении (см. рис.2), в пределах которого наблюдается крен Александровской колонны. Согласно положениям механики грунтов, при действии нагрузки с эксцентриситетом $e < 0,25b$ (где b – ширина фундамента) в краевой зоне подошвы фундамента в направлении крена происходит концентрация контактных напряжений, величина которых превышает более чем в два раза величину общего давления от надземной и подземной частей монумента.

Общая нагрузка от надземной части Александровской колонны составляет 1353 т (см. табл.1). Массу подземной части, представляющую собой усеченную пирамиду («жесткое ядро»), можно рассчитать по формуле

$$m = V\rho,$$

где V – объем усеченной призмы, м^3 ; ρ – плотность гранитной кладки из отдельных плит, принимается равной $2,2 \text{ т/м}^3$;



$$V = \frac{1}{3}H(S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2),$$

H – высота, м (соответствует глубине котлована); S_1 – площадь верхнего основания пирамиды, $S_1 = 12 \times 12 \text{ м}^2$; S_2 – площадь нижнего основания пирамиды, $S_2 = 20 \times 20 \text{ м}^2$;

$$V = \frac{1}{3} \cdot 4,26 \cdot (12 \cdot 12 + \sqrt{(12 \cdot 12)(20 \cdot 20)} + 20 \cdot 20) = 1113,28 \text{ м}^3;$$

$$m = 1113,28 \cdot 2,2 \approx 2449,22 \text{ т.}$$

Давление от надземной части Александровской колонны и «жесткого ядра» будет равно

$$p = m_{\text{общ}}/S_2,$$

где $m_{\text{общ}}$ – общая масса надземной части Александровской колонны (см. табл. 1) и «жесткого ядра»;

$$p = \frac{1353 + 2449,22}{20 \cdot 20} \approx 9,51 \text{ тс/м}^2 \approx 0,095 \text{ МПа}.$$

Таким образом, величина контактных напряжений под подошвой фундамента в его краевой части превышает 0,19 МПа и для слабых водонасыщенных грунтов будет рассматриваться как силовой фактор, способствующий росту крена во времени.

Развитие неравномерных деформаций подземных несущих конструкций, а также их разрушение за счет физико-химических и биохимических процессов приводит к нарушению целостности мощения Дворцовой площади в зоне влияния Александровской колонны. По данным визуального обследования наблюдаются как деформации подъема кладки, так и ее провалы с южной стороны монумента. В то же время с северной стороны прослеживаются деформации облицовки пьедестала и лестницы, ведущей к нему, в виде расхождения и смещения ступеней, что связано с неравномерностью протекания деформаций различного знака.

Рекомендации по проведению комплексного мониторинга Александровской колонны. Концепция содержания, организации и проведения комплексного мониторинга должна быть разделена на два блока, связанных между собой общей проблемой – обеспечение длительной устойчивости Александровской колонны и разработка кардинальных и превентивных мероприятий по предупреждению негативных последствий, которые могут привести к переходу архитектурного памятника в предаварийное состояние.

В первый блок должен быть включен комплекс обследования и инструментальных наблюдений за состоянием надземной части монумента. Второй блок касается применения щадящих технологий для изучения состояния подземных несущих конструкций, деформации которых в значительной степени будут отражаться на безопасности функционирования надземной части, прежде всего крена.

Первый блок должен включать геофизические и современные геодезические методы наблюдений. Представляется возможным применение акустических технологий, связанных с «просвечиванием» состояния всех элементов колонны по ее высоте. Для надземной части основное внимание должно быть уделено фусту, в частности причинам формирования в нем трещин. Изучение одного из приоритетных направлений исследования устойчивости Александровской колонны – выявление закономерностей динамики развития крена может быть выполнено с помощью 3D-наблюдений наземным лазерным сканированием, которое будет сопровождаться определением деформации Александровской колонны и примыкающей территории с помощью поверхностных марок и глубинных реперов [33, 38-40].

Второй блок наблюдений осложняется невозможностью проведения стандартных инженерно-геологических и геотехнических исследований – бурения и статического зондирования, а также использования оборудования с динамическим воздействием [7, 8, 41]. Основную информацию можно будет получить по результатам электротомографии, которые позволят осветить некоторые негативные аспекты состояния «жесткого ядра» и подземных конструкций [42-44]. Согласно



существующим нормативам в области реконструкции и реставрации архитектурно-исторических памятников, работы, проводимые на расстоянии 30 м от объекта в условиях развития слабых грунтов, считаются неопасными для него [45, 46]. Таким образом, возможно обследование состояния свай, которые были забиты еще во времена О.Монферрана с земной поверхности для кирпичной кладки временных сооружений с целью монтажа на них подъемных механизмов для последующей установки фуста (см. рис.3). Обследование такой сваи на полную длину с помощью щадящих методов позволит получить информацию о состоянии дерева – сосны ниже уровня контаминированных канализационными стоками грунтовых вод, а также выделить основные таксоны микроорганизмов из вмещающих грунтов и вод. Это дает возможность определить агрессивность микробиоты по отношению к конструкционным материалам подземной части монумента, их роль в преобразовании дисперсных грунтов и биохимического состава подземных вод, а также развитии процессов газообразования за счет деятельности микроорганизмов. Составление концепции и содержания мониторинга должно рассматриваться как отдельная тема исследований.

Выводы

1. Обеспечение безопасности эксплуатации и длительной устойчивости Александровской колонны должно рассматриваться в числе приоритетных задач по сохранению архитектурно-исторических памятников Санкт-Петербурга.

2. Наибольшее опасение с точки зрения сохранности надземной части Александровской колонны вызывает ее гранитный фуст. Причина трещинообразования, зафиксированного в первые годы после его установки, по мнению авторов, связана со спецификой и сложностью структурно-тектонических условий территории карьеров, приуроченных к участкам Фенноскандинавского щита (юго-восточная часть Финляндии), характеризующихся высокими тектоническими напряжениями в горных породах, которые начали изучаться геологами, геофизиками и геомеханиками Финляндии, Швеции и СССР только в 60-70-е гг. прошлого века. Концентрация тектонических напряжений отмечается на земной поверхности и возрастает с глубиной согласно закономерности, полученной Н.Хастом. Тектонические напряжения приводят к развитию растягивающих напряжений в толще гранита-рапакиви *in situ*. Проанализированы факторы, вызывающие активизацию трещиноватости гранитов в теле Александровской колонны.

3. Впервые рассматриваются и анализируются конструктивные особенности подземной части Александровской колонны, приведен геолого-литологический разрез основания памятника до глубины 25 м (архивные данные КГА СПб). Дан качественный анализ контаминации грунтовых вод и представлена история их загрязнения во времени. Подчеркнута агрессивность грунтовых вод по отношению к конструкционным материалам, что получило свое подтверждение при исследованиях состояния подземных сооружений комплекса зданий Зимнего дворца (Новый Эрмитаж).

4. На основе анализа многолетних обследований, в том числе в 20-21 вв., сделан вывод об опасности развития крена памятника в северо-восточном направлении. Скорость отклонения Александровской колонны от вертикальной оси вызывает серьезные опасения, подчеркнута необходимость изучения крена. На основе использования метода аналогий состояния фундаментов Нового Эрмитажа оценена направленность процессов деградации подземных несущих конструкций Александровской колонны и вызывающих ее причин. Высказаны предположения, что крен монумента вызван эксцентриситетом расположения фигуры ангела относительно оси наворачия, что подтверждается выполненными расчетами концентрации контактных напряжений в краевой зоне под подошвой жесткого ростверка.

5. Обоснованы рекомендации по содержанию, организации и проведению комплексного мониторинга Александровской колонны: обследование и инструментальные наблюдения за состоянием надземной части монумента, подбор и применение щадящих технологий для изучения состояния подземных несущих конструкций, а также наблюдение за деформациями архитектурного памятника, прежде всего его крена, который во многом будет определять устойчивость Александровской колонны.



Авторы выражают искреннюю признательность генеральному директору ПИ «Геореконструкция», д-ру геол.-минерал. наук А.Г.Шапкину за предоставление ценных источников по истории создания и функционирования Александровской колонны; д-ру биол. наук Д.Ю.Власову за содействие в поиске литературы по теме исследований. Глубокую благодарность авторы выражают сотрудникам Комитета по градостроительству и архитектуре Санкт-Петербурга Т.В.Горбуновой и Т.Н.Сергазиновой за предоставление архивных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valore C., Ziccarelli M. The preservation of Agrigento Cathedral // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. September 2-6, 2013. P. 3141-3148.
2. Yeon-Soo Jang. Geotechnical Issues and Preservation of Korean Heritage Sites // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul, Korea. September 17-21, 2017. P. 231-244.
3. Sesov V., Cvetanovska J., Edip K. Geotechnical aspects in sustainable protection of cultural and historical monuments // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. September 2-6, 2013. P. 3129-3132.
4. Margottini C. Engineering Geology in Shaping and Preserving the Historic Urban Landscapes and Cultural Heritage: Achievements in UNESCO World Heritage Sites // Engineering Geology for Society and Territory. 2015. Vol. 8. P. 1-28. DOI: 10.1007/978-3-319-09408-3_1
5. Calabresi G. Kerisel Lecture: The role of Geotechnical Engineers in saving monuments and historic sites // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. September 2-6, 2013. P. 71-83.
6. Viggiani C. 2nd Kerisel lecture: Geotechnics and Heritage // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Seoul. September 17-21, 2017. P. 119-140.
7. Улицкий В.М., Шапкин А.Г. Сохранение памятников архитектуры и обеспечение их механической безопасности // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 31-39.
8. Шапкин А.Г., Шапкин В.А. Можно ли обеспечить сохранность памятников, опираясь на нормы для нового строительства? // Геотехника. 2021. Т. 13. № 2. С. 20-30. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-20-30
9. Dashko R.E., Shidlovskaya A.V. Long-term stability of old cathedrals in St. Petersburg / Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites. London: CRC Press, 2013. P. 299-306. DOI: 10.1201/b14895-35
10. Никитин Н.П. Огюст Монферран: Проектирование и строительство Исаакиевского собора и Александровской колонны. Л.: Ленинградское отделение Союза советских архитекторов, 1939. 348 с.
11. Любин Д.В. Александровская колонна. СПб: Изд-во Государственного Эрмитажа, 2013. 104 с.
12. Ядута В.А. Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Минерал. 2006. №1 (5). С. 28-35
13. Шапкин А.Г., Парамонов В.Н., Улицкий В.М. Геотехнический аспект освоения подземного пространства Санкт-Петербурга // Геотехника. 2018. Т. 10. № 3. С. 8-23.
14. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н. Геотехника Санкт-Петербурга. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2018. 386 с.
15. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб: Изд-во института ПИ «Геореконструкция», 2014. 279 с.
16. Lebedeva Y., Kotiukov P., Lange I. Study of the Geo-Ecological State of Groundwater of Metropolitan Areas under the Conditions of Intensive Contamination Thereof // Journal of Ecological Engineering. 2020. Vol. 21. Issue 2. P. 157-165. DOI: 10.12911/22998993/116322
17. Dashko R.E., Salnikov P.M. Main principles of an integral monitoring for St. Isaac's Cathedral in Saint-Petersburg // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers, April 18-20, 2018, Russia. St. Petersburg: Saint Petersburg Mining University, 2019. P. 17-22.
18. Любин Д.В., Макеева Е.И. Александровская колонна. История реставрации. Профилактический уход // Музей под открытым небом. Стратегия сохранения скульптуры в городской среде. СПб: Знак, 2018. С. 66-72.
19. Гельмерсен Г.П. Александровская колонна в Санкт-Петербурге // Горный журнал. 1862. № 5. С. 219-231.
20. Аспидов А.П. Петербургские арабские. М.: Центрполиграф, 2007. 463 с.
21. Гирин Р.Э. Тектоно-геодинамический анализ мощности земной коры запада Восточно-Европейской платформы. Минск: Беларуская навука, 2022. 110 с.
22. Кузин И.Л. Мифы и реалии учения о материковых оледенениях. СПб: Изд-во СЗНИИ «Наследие», 2013. 178 с.
23. Морозов К.В., Демёхин Д.Н., Бахтин Е.В. Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 80-97. DOI: 10.25018/0236-1493_2022_62_0_80
24. Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В. Напряженно-деформированное состояние массива пород Хибинских месторождений и задачи геомеханического районирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 97-107.
25. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород) / Отв. ред. П.Н. Кропоткин. М.: Наука, 1973. 185 с.
26. Иванов М.А., Попов Г.Н. Природа трещиноватости гранита Александровской колонны – геологический аспект // Музей под открытым небом. Проблемы сохранения памятников в городской среде. СПб: МедиаКомфорт, 2021. С. 22-25
27. Лямин Н.Н. Естественные каменные строительные материалы г. С.-Петербурга // Зодчий. 1903. № 45. С. 507-511; № 47. С. 531-535.
28. Панова Е.Г., Власов А.Д., Попова Т.А. и др. Биологическое выветривание гранита в условиях городской среды // Биосфера. 2015. Т. 7. № 1. С. 61-79. DOI: 10.24855/biosfera.v7i1.47



29. Сазанова К.В., Зеленская М.С., Бобир С.Ю., Власов Д.Ю. Микромицеты в биопленках на каменных памятниках Санкт-Петербурга // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 5. С. 329-339. DOI: 10.31857/S0026364820050104
30. Власов А.Д., Нестеров Е.М., Родина О.А., Власов Д.Ю. Микробные биопленки на граните-рапакиви в историческом карьере Монферрана // Проблемы региональной экологии. 2020. № 5. С. 6-11. DOI: 10.24412/1728-323X-2020-5-6-11
31. Zhao F., Qiu G., Huang Z. et al. Characterization of *Rhizobium* sp. Q32 isolated from Weathered Rocks and its Role in Silicate Mineral Weathering // Geomicrobiology Journal. 2013. Vol. 30. Iss. 7. P. 616-622. DOI: 10.1080/01490451.2012.746406
32. Мустафин М.Г., Нгуен Хью Вьет. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети // Геодезия и картография. 2019. № 3. С. 11-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-945-3-11-19
33. Зубов А.В., Елисеева Н.Н. Программный комплекс для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 2-7. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-2-7
34. Корнилов Ю.Н., Царёва О.С. Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. № 4. С. 9-18. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18
35. Дашко Р.Э., Алексеев И.В. К вопросу о роли биокоррозионных процессов в подземной среде мегаполисов // Инженерная геология. 2016. № 1. С. 22-29.
36. Покровская Е.Н., Агапов Д.В., Ковальчук Ю.Л. Микологическое обследование древесины исторических объектов культурного наследия // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 4. С. 212-220. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.212
37. Трушко В.Л., Протосеня А.Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162-166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162
38. Корнилов Ю.Н., Царёва О.С., Шевченко А.С. Оптимизация расположения деформационных марок при построении сети в виде линейной пространственной засечки // Геодезия и картография. 2021. № 12. С. 2-11. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-978-12-2-11
39. Хатум Х.М., Мустафин М.Г. Оптимизация места расположения роботизированных станций наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. 2020. № 9. С. 2-13. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13
40. Kuzin A.A., Palkin P.O. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1728. P. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012010
41. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г. и др. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации. СПб: Изд-во института ПИ «Геореконструкция», 2021. 640 с.
42. Вольнин А.Ф. Обследование состояния грунтов на участке двух канализационных коллекторов глубокого заложения в Санкт-Петербурге с использованием электроразведки с незаземленными линиями // Инженерная и рудная геофизика: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, 26-30 апреля, 2021, Геленджик, Россия. С. 131-132. DOI: 10.3997/2214-4609.202152150
43. Куликова Н.В., Данильев С.М., Ефимова Н.Н., Куликов А.И. Моделирование данных сейсмотомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2 (44). С. 26-30. DOI: 10.25714/MNT.2020.44.004
44. Глазунов В.В., Агеев А.С., Горелик Г.Д., Сарапулкина Т.В. Результаты комплексных геофизических исследований по поиску склепов на территории загородного некрополя Херсонеса Таврического в Карантинной балке // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 12-19. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.2
45. Potapov A., Pavlov I., Verkhovskaia I. Non-destructive monitoring and technical evaluation conditions of the monument Alexander III // Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4. Iss. 1. P. 38-46. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-1-38-46
46. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. М.: АНО «Традиция», 2022. 368 с.

Авторы: Р.Э.Дашко, д-р геол.-минерал. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-2469-0910> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), А.Г.Карпенко, аспирант, ange.karpenko2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0180-4655> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.