

Изменения климатических показателей как индикаторов деградации объектов культурного наследия ЮНЕСКО на европейской части России*

Е. В. Вышкваркова, О. Ю. Сухонос

Институт природно-технических систем,
Российская Федерация, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28

Для цитирования: Вышкваркова, Е. В., Сухонос, О. Ю. (2024). Изменения климатических показателей как индикаторов деградации объектов культурного наследия ЮНЕСКО на европейской части России. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (3), 492–508. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.306>

Объекты культурного наследия имеют высокую историко-социокультурную ценность, однако они находятся под угрозой разрушения из-за воздействия изменений климата и связанных с ним опасностей, таких как ливни, наводнения, засухи. Уязвимость объектов всемирного наследия перед лицом стихийных бедствий требует особого внимания. Цель работы — оценить разрушительное влияние климата на строительные материалы, использованные при создании объектов культурного наследия ЮНЕСКО в четырех городах в европейской части России (Дербенте, Казани, Петрозаводске и Пскове). В работе использованы ежедневные данные о температуре воздуха и осадках за период с 1961 по 2020 г. и индексы для оценки влияния отрицательных температур воздуха (дни с температурой воздуха ниже 0°C и минус 5°C, циклы замораживания-оттаивания, влажно-морозный индекс и индекс подверженности морозному разложению) и два индекса экстремальных температур воздуха и осадков. Дополнительно оценены изменения индексов между двумя климатическими периодами — с 1961 по 1990 и с 1991 по 2020 г. Результаты показали сокращение риска повреждения объектов культурного наследия низкими температурами воздуха, в то время как увеличилась частота циклов замерзания-оттаивания в северных районах на фоне роста приземной температуры воздуха. Изменение экстремальных температур и осадков имеет положительную тенденцию, что повышает связанные с ними риски разрушения материалов, использованных при строительстве объектов культурного наследия. Различия климатических условий требуют индивидуального подбора показателей для оценки влияния изменений климата на разрушение строительных материалов и комплексного подхода для каждого объекта культурного наследия.

Ключевые слова: изменение климата, объекты культурного наследия, разрушение, мороз, экстремумы.

1. Введение

Как указано в (IPCC, 2021), объектам культурного наследия требуется дополнительное внимание. Отмечаемый в последнее время рост температуры воздуха по всему земному шару оказывает влияние на различные сферы жизнедеятельности

* Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (госрегистрация: № 124013000609-2).

человека, а также отрицательно влияет на темпы разрушения объектов культурного наследия. Среди ряда угроз, включая последствия, связанные с загрязнением воздуха, инвазивными видами воздействия и военной агрессией (ICOMOS, 2019; Leissner et al., 2015), антропогенное изменение климата признано дополнительной угрозой для памятников. В частности, для объектов природного наследия изменение климата уже стало самой распространенной угрозой (Osipova et al., 2020).

Прямое воздействие изменения климата на объекты культурного наследия может быть немедленным или кумулятивным (Sesana et al., 2021). Более высокие температуры воздуха могут увеличивать частоту циклов замораживания-оттаивания, связанную с переходом температуры воздуха через 0 °С, вследствие чего возникают структурные повреждения каменных сооружений (ICOMOS, 2019; UNESCO, 2007; Grossi et al., 2007).

Вода (в атмосфере, почве) является основным фактором деградации строительных материалов (Sabbioni et al., 2008). Изменение режима осадков, увеличение количества случаев экстремальных событий, таких как засухи и наводнения, поднятие уровня моря являются следствием изменений климата и оказывают разрушающее воздействие на объекты культурного наследия (Brimblecombe et al., 2011; Leissner et al., 2015; Ronco et al., 2014; Павловский и Шамшури, 2021). Изменение береговой линии вследствие строительства гидротехнических сооружений оказывает неблагоприятное воздействие на находящиеся под угрозой исчезновения объекты культурного наследия в прибрежной зоне (Nicu et al., 2019).

Для сооружений, расположенных на склонах, рисками являются оползни, результатом которых может быть либо потеря сооружения, либо повреждение его камнями, грязью и обломками (ICOMOS, 2019; UNESCO, 2007). Увеличение риска оползней обнаружено по всей Европе (Sabbioni et al., 2010).

Экстремальные гидрометеорологические явления (засухи, обильные осадки, волны тепла) представляют собой дополнительный риск для объектов культурного наследия (Sardella et al., 2020). Изменение такого неожиданного показателя, как продолжительность вегетационного периода, оказывает влияние на разрушение объектов культурного наследия через увеличение или появление новой флоры (водоросли, мхи), повреждение корнями. Четко видимый повышенный эффект, особенно на деревянных фасадах, а также на цементных поверхностях, таких как лестницы и фундаменты, обнаружен на примере финского фермерского дома XIX в. постройки (бревенчатое здание) (Carroll and Aarrevaara, 2018). Усиление ветра в некоторых регионах земного шара может способствовать повышению горизонтальной нагрузки на конструкции, усилить проникновение влаги в пористые материалы, усилить истирание и деградацию наскальных рисунков, а также увеличить высоту волн и эрозию побережья (ICOMOS, 2019). Рост температуры воздуха, а вместе с ним увеличение длительности пожароопасного сезона и продолжительности засух способствуют повышению пожароопасности на территории России (Третий оценочный доклад, 2022; Липка и др., 2021). Во время пожаров происходит повреждение исторических зданий и/или их отдельных компонентов, растрескивание и физическое повреждение компонентов каменной кладки из-за экстремальных термических нагрузок, помимо этого ущерб историческим сооружениям наносит вода, которую используют при тушении пожаров (ICOMOS, 2019). Изменение кислотности атмосферных осадков вследствие увеличения выбросов CO₂ приводит

к разрушению каменной кладки, особенно из известняка, ракушечника и известкового раствора, а закисление океана усиливает эти процессы в прибрежных районах (ICOMOS, 2019).

Ввиду большой протяженности территории России с юга на север и с запада на восток объекты находятся в контрастных географических и климатических условиях. В данной работе оценено влияние климатических изменений на четыре района с объектами культурного наследия ЮНЕСКО, расположенных в разных регионах европейской части России. Оценка проведена для двух периодов: с 1961 по 1990 и с 1991 по 2020 г., принятых Всемирной метеорологической организацией (ВМО) как климатические нормы.

2. Данные и методы

2.1. Данные

В исследовании были использованы ежедневные данные средней, минимальной и максимальной температур воздуха и осадков за период с 1961 по 2020 г. из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2014).

На территории Российской Федерации находится 21 объект культурного наследия ЮНЕСКО (World Heritage List¹) (рис. 1).

1. Исторический центр Санкт-Петербурга и связанные с ним группы памятников (Санкт-Петербург, XVIII–XX вв.).

2. Кижский погост (Карелия, XVIII–XIX вв.).

3. Московский Кремль и Красная площадь (Москва, XIII–XVII вв.).

4. Историко-культурный комплекс Соловецких островов (Архангельская область, XVI–XVII вв.).

5. Исторические памятники Великого Новгорода и окрестностей (Великий Новгород, XI–XVII вв.).

6. Белокаменные памятники Владимира и Суздаля (Владимир и Суздаль, XII–XIII вв.).

7. Архитектурный ансамбль Троице-Сергиевой лавры в городе Сергиев Посад (Московская область, Сергиев Посад, XV–XVIII вв.).

8. Церковь Вознесения в Коломенском (Москва, XVI в.).

9. Ансамбль Ферапонтова монастыря (Вологодская область, село Ферапонтово, XV–XVII вв.).

10. Историко-архитектурный комплекс Казанского кремля (Республика Татарстан, Казань, XVI–XXI вв.).

11. Цитадель, старый город и крепостные сооружения Дербента (Республика Дагестан, Дербент, VI–XIX вв.).

12. Ансамбль Новодевичьего монастыря (Москва, XVI–XVII вв.).

13. Исторический центр Ярославля (Ярославль, XVI–XX вв.).

14. Булгарский историко-археологический комплекс (Республика Татарстан, X–XV вв.).

¹ Доступно на: <https://whc.unesco.org/en/list/> [Дата доступа 16.05.2023].

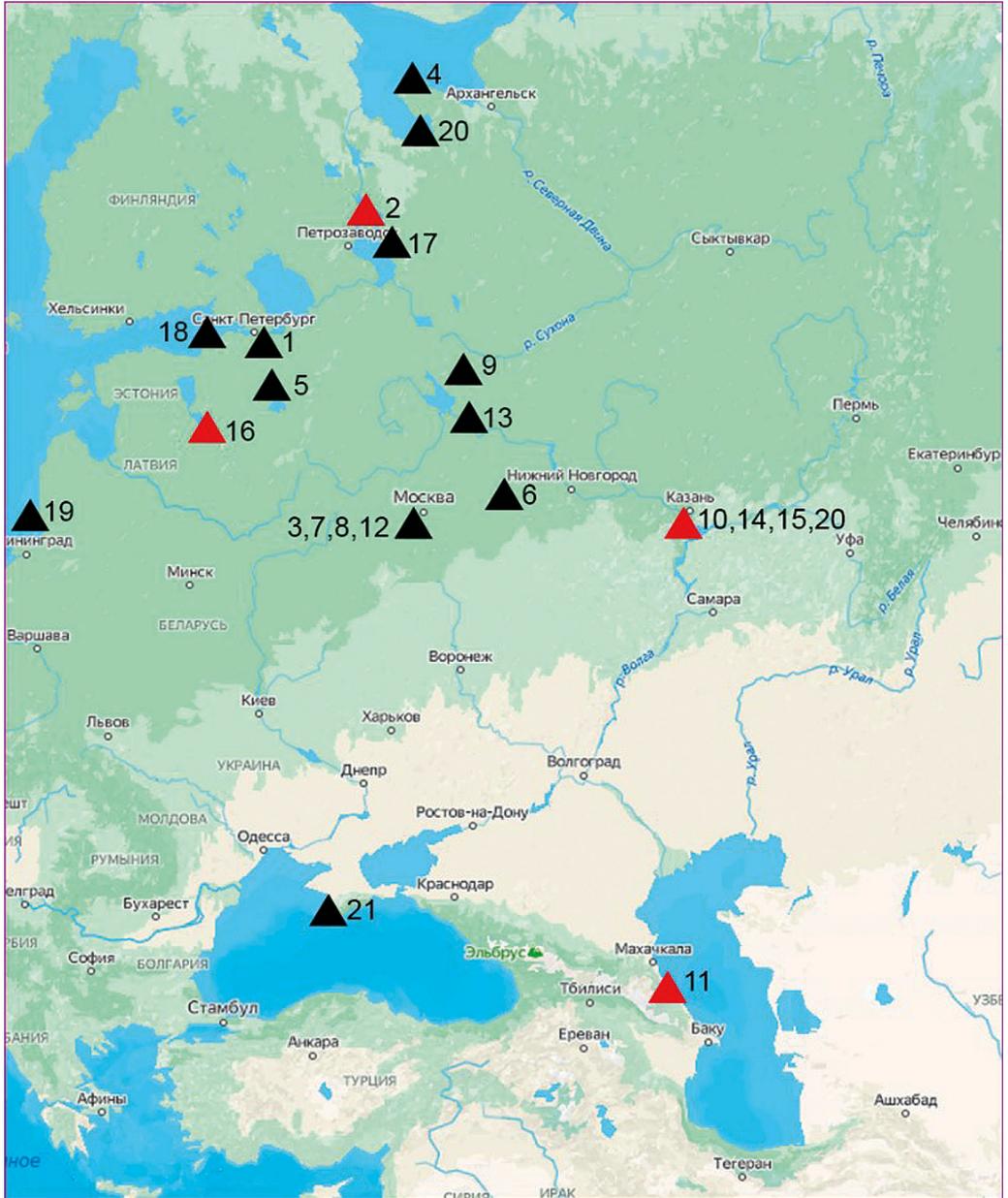


Рис. 1. Расположение объектов культурного наследия ЮНЕСКО на европейской территории России (доступно на: Яндекс.Карты). Анализируемые метеостанции отмечены красными треугольниками. Цифры на рисунке соответствуют нумерации объектов, указанной в тексте

15. Успенский собор и монастырь острова-града Свияжск (Республика Татарстан, Свияжск, с XVI в.).
16. Храмы псковской архитектурной школы (Псков, с XII в.).
17. Петроглифы Онежского озера и Белого моря (Карелия, IV–V тыс. лет до н.э.).
18. Геодезическая дуга Струве (XIX в.).
19. Куршская коса.
20. Астрономические обсерватории Казанского федерального университета (Республика Татарстан, Казань, XIX в.).
21. Древний город Херсонес Таврический и его хора (Республика Крым, Севастополь, V век до н.э. — XIV в.).

Для анализа в данной статье выбраны четыре метеостанции в местах расположения объектов культурного наследия ЮНЕСКО, находящихся в разных географических условиях (рис. 1): Дербент ($42^{\circ}03'10''$ с. ш., $48^{\circ}16'25''$ в. д.), Казань ($55^{\circ}47'55''$ с. ш., $49^{\circ}06'23''$ в. д.), Петрозаводск ($62^{\circ}04'03''$ с. ш., $35^{\circ}13'24''$ в. д.) как ближайшая станция к архитектурному ансамблю Кижского погоста и Псков ($57^{\circ}49'$ с. ш., $28^{\circ}25'$ в. д.).

2.2. Индексы воздействия

Для оценки влияния климатических условий на деградацию строительных материалов использованы специализированные индексы, которые можно разделить по виду воздействия погодного явления.

Отрицательные температуры воздуха (мороз). Ущерб от воздействия низких температур связан с повреждением пористых материалов в результате переходов температуры воздуха через 0°C (циклы замораживания-оттаивания), особенно если материал перед этим подвергался осадкам (то есть был мокрым). Повреждение строительных материалов (камней) от мороза происходит в результате увеличения объема воды в порах или объема трещин при промерзании. Также происходят структурные повреждения крыш и повреждение фундамента зданий из-за повышенного морозного пучения грунтов.

Влияние отрицательных температур воздуха оценивалось с помощью индексов:

1) количество морозных ночей (TN0) — количество дней с минимальной температурой воздуха ниже 0°C ;

2) циклы замораживания и оттаивания (freeze-thaw cycles — FTCs) (Grossi et al., 2007). На основании среднесуточной температуры воздуха цикл засчитывается каждый раз, когда температура воздуха опускается ниже 0°C , при условии, что предыдущий день не был морозным;

3) влажно-морозный индекс (Wet-frost index — WFI) (Grossi et al., 2007), который оценивает количество дождливых дней ($P > 2$ мм и $T > 0^{\circ}\text{C}$), за которыми сразу следуют дни со средней температурой воздуха ниже -1°C (Brimblecombe et al., 2006);

4) индекс подверженности морозному разложению (frost decay exposure index — FDEI) (Lisø et al., 2007). FDEI определяется как накопленная среднегодовая сумма четырехдневных осадков (за 96 ч) перед днем с переходом температуры воздуха от положительной к отрицательной;

5) Deep frost (DF) — количество дней с минимальной температурой воздуха ниже -5°C . Поскольку не вся влага в порах замерзает при 0°C (Rempel and Rempel, 2019).

Экстремальные метеорологические явления. Последствиями высоких температур воздуха (экстремальная жара) являются ущерб историческим сооружениям вследствие повторяющихся расширений и усадок материалов, структурный износ зданий и сооружений, ускоренный процесс ржавчины металлов, повышение скорости химического распада материалов, появление новой фауны-вредителей на деревянных и кирпичных сооружениях.

Экстремальные осадки приводят к эрозии древесины/кирпича/камня и/или химическому растворению, повышению коррозии металлов, повышенному ущербу и эрозии от шагов туристов на объектах культурного наследия с высокой посещаемостью во влажных условиях, повреждению градом крыш, окон и декоративных элементов. В результате оползней, следующих за обильными осадками, возможна утрата зданий, расположенных на склонах. Водные потоки могут повреждать или полностью разрушать сооружения, перемещать строения/артефакты, нарушая тем самым целостность (контекст) ансамбля; повышать риск проседания. Повышен риск поражения грибом/насекомыми.

Для оценки влияния таких экстремальных погодных явлений использовались следующие индексы:

1) экстремальные температуры воздуха (TX90p) — процент дней с максимальной температурой воздуха выше 90-го перцентилья; перцентиль определяется для каждого календарного дня с центром в пятидневном окне для базового периода с 1961 по 1990 г. (Peterson et al., 2001) (рассчитан с помощью ПО RCLimDex);

2) количество дней с экстремальными осадками (R99p) — определяется как количество дней с осадками, превышающих 99-й перцентиль суточных сумм осадков в дни с осадками не менее 1 мм, в течение базового периода с 1961 по 1990 г.

Перечень индексов сформирован на основании литературных источников, таких как (ICOMOS, 2019; Sardella et al., 2020; Sesana et al., 2021; Kapsomenakis et al., 2022; Vandemeulebroucke et al., 2023).

3. Результаты

3.1. Межгодовая изменчивость и тренды

В Дербенте среднемноголетнее количество дней с температурой воздуха ниже 0°C за 60-летний период составило 35.8 дня. Максимальное количество дней было зафиксировано в 1972 г. и составило 82 дня. В Казани среднемноголетнее количество дней с температурой воздуха ниже 0°C за 60-летний период составило около 164 дней. В Петрозаводске среднее количество дней в году с минимальной температурой воздуха ниже 0°C составляет 178 дней за весь период. Максимум был зафиксирован в 1976 г. и составил 211 дней. В Пскове среднее количество дней с минимальной температурой воздуха ниже 0°C за 60-летний период составило 144 дня. Для Петрозаводска, Пскова и Дербента характерен статистически значимый отрицательный тренд количества дней с минимальной температурой воздуха ниже 0°C от -3.9 до -4.7 дней / 10 лет (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1. Тренды индексов мороза за исследуемые периоды

Станция	Индексы				
	TN0 (дни)	Deep frost (дни)	FTC (разы)	WFI (разы)	FDEI (мм)
1961–2020 г.					
Дербент	-0.45	-0.08	-0.05	-0.001	+0.12
Казань	-0.31	-0.49	+0.006	-0.012	+0.25
Петрозаводск	-0.39	-0.63	+0.034	+0.0008	-0.09
Псков	-0.47	-0.68	+0.0014	+0.0118	+0.45
1961–1991 г.					
Дербент	-0.19	-0.04	+0.04	+0.03	+1.06
Казань	+0.01	-0.09	+0.04	-0.03	-0.41
Петрозаводск	-0.21	-0.39	+0.04	+0.04	+0.53
Псков	-0.78	-0.68	-0.06	+0.03	-0.21
1991–2020 г.					
Дербент	-0.89	-0.09	-0.11	-0.004	-1.04
Казань	-0.52	-0.75	-0.04	-0.05	-0.53
Петрозаводск	-0.78	-1.34	+0.06	+0.01	-0.22
Псков	-0.58	-0.89	-0.08	-0.04	-0.5

Примечание. Жирным шрифтом в таблицах 1 и 2 выделены статистически значимые тренды ($p < 0.05$).

Для всех станций характерен отрицательный тренд дней с минимальной температурой воздуха ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период с 1961 по 2020 г. Сокращение количества дней в Дербенте статистически незначимое. В Казани, Пскове и Петрозаводске тренд статистически значимый от 5 до 7 дней / 10 лет. Для Петрозаводска характерен самый длинный промежуток в году с минимальными температурами воздуха ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ — с октября по май, — то есть только в летние месяцы нет угрозы повреждения строительных материалов «глубоким морозом». В Казани и в Пскове случаи с глубоким морозом встречаются с октября по февраль. В Дербенте только четыре месяца в году можно наблюдать температуры воздуха ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с ноября по февраль).

Циклы замораживания и оттаивания, то есть переходы минимальной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, характеризуются отрицательным статистически значимым трендом в самом южном городе России — Дербенте (-0.5 цикла / 10 лет). Остальные исследуемые станции имеют положительную тенденцию циклов, однако статистически незначимую. Следует отметить, что в Дербенте в первый климатический период с 1961 по 1990 г. тенденция циклов также была положительной, а в период с 1991 по 2020 г. знак тренда изменился на отрицательный. Количество циклов в среднем изменяется от 4 (Дербент) до 14 (Псков) циклов в год.

Два индекса мороза, помимо температуры воздуха, содержат в своем расчете и осадки — WFI и FDEI. Оба индекса не показали статистически значимых изменений в районах расположения объектов культурного наследия, несмотря на суще-

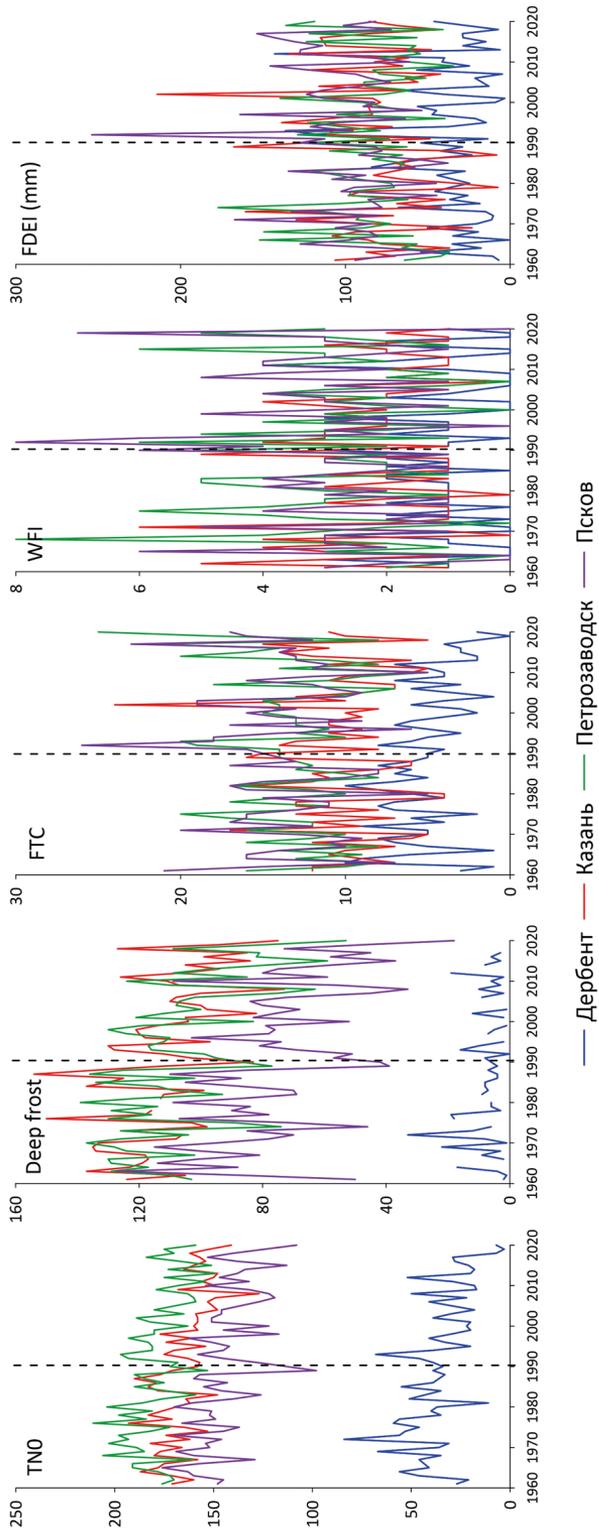


Рис. 2. Многолетний ход индексов мороза за период 1961–2020 гг.

ственное изменение (рост) количества зимних осадков между двумя климатическими нормами в Казани, Петрозаводске и Пскове.

Для оценки экстремумов мы использовали процентильные индексы. Оба индекса рассчитаны с использованием базового периода (1961–1990). Для самого южного города России Дербента обнаружен резкий рост процента дней с максимальной температурой воздуха выше 90-го перцентиля +5.4% / 10 лет ($p < 0.05$). Значения индекса за период с 1961 по 2020 г. колеблются от 3.5 до почти 43%. В Казани тренд положительный и статистически значимый — 1.7% / 10 лет ($p < 0.05$). Значения индекса за период с 1961 по 2020 г. варьируются от 3.5 до почти 26%. В Петрозаводске значения индекса за период с 1961 по 2020 г. колеблются от 5 до почти 23.5%. Процент дней с температурой выше 90-го перцентиля имеет тенденцию к увеличению со скоростью +1.8% / 10 лет ($p < 0.05$). Псков, как и другие исследуемые города, характеризуется положительным и значимым увеличением процента дней с экстремальной температурой воздуха (+2.6% / 10 лет, $p < 0.05$). Значения индекса за период с 1961 по 2020 г. колеблются от 4 до почти 33%.

Что касается дней с экстремальными осадками (R99p), то для всех станций обнаружен положительный тренд с количеством дней с экстремальными осадками (выше 99-го перцентиля), однако статистически значимое увеличение наблюдается только в Пскове и составляет +0.24 дня / 10 лет (табл. 2).

Изменение процента дней с экстремальными температурами воздуха между двумя периодами в исследуемых станциях произошло неравномерно (рис. 3). Увеличение процента дней с температурой воздуха выше 90-го перцентиля в Дербенте между двумя 30-летними периодами произошло с июня по октябрь, с наибольшим ростом

Таблица 2. Тренды индексов экстремальных температур и осадков за исследуемые периоды

Станция	Индекс	
	TX90p (%)	R99p (дни)
1961–2020 гг.		
Дербент	+0.54	+0.005
Казань	+0.17	-0.011
Петрозаводск	+0.15	+0.0001
Псков	+0.26	+0.024
1961–1991 гг.		
Дербент	+0.07	+0.005
Казань	+0.04	-0.004
Петрозаводск	+0.06	-0.007
Псков	+0.17	+0.04
1991–2020 гг.		
Дербент	+0.94	+0.004
Казань	+0.23	-0.004
Петрозаводск	+0.18	+0.008
Псков	+0.33	-0.02

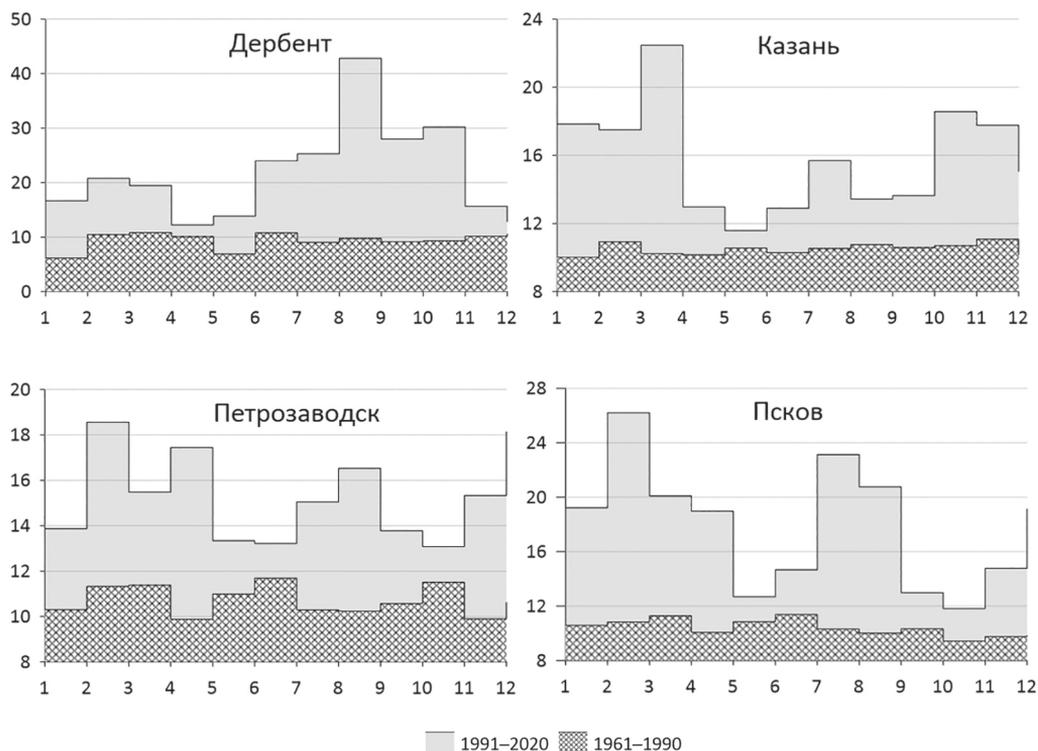


Рис. 3. Изменение процента дней с экстремальной температурой воздуха (TX90r) между двумя периодами

в августе (более чем на 30%). В Казани рост процента дней с экстремальной температурой наблюдается в холодное полугодие, с максимумом в марте (12%). В Петрозаводске и Пскове выделяются два максимума увеличения процента дней в период с 1991 по 2020 г. относительно предыдущей климатической нормы — зимний и летний.

3.2. Изменение между двумя 30-летними периодами

Для всех станций выделяются общие черты — сокращение количества морозных дней и существенное увеличение экстремальных температур (рис. 4).

В Дербенте значения индексов, оценивающих угрозу от отрицательных температур воздуха, кроме FDEI во второй климатический период, уменьшились. Количество дней с морозными ночами (TN0) сократилось на 34% относительно предыдущей климатической нормы (с 43 до 28.5 дней). Изменение количества дней с глубоким морозом (-5°C) между двумя 30-летними периодами составляет 27% (с 8.5 до 6 дней). Циклы замораживания-оттаивания, а также WFI в период с 1991 по 2020 г. уменьшились на 31 и 18% соответственно. Индексы экстремальных температур и осадков демонстрируют значительный рост в последний климатический период. Увеличение процента дней с максимальной температурой воздуха выше 90-го перцентиля во второй период относительно первого составило 62%. Рост количества дней с экстремальными осадками составил 20%.

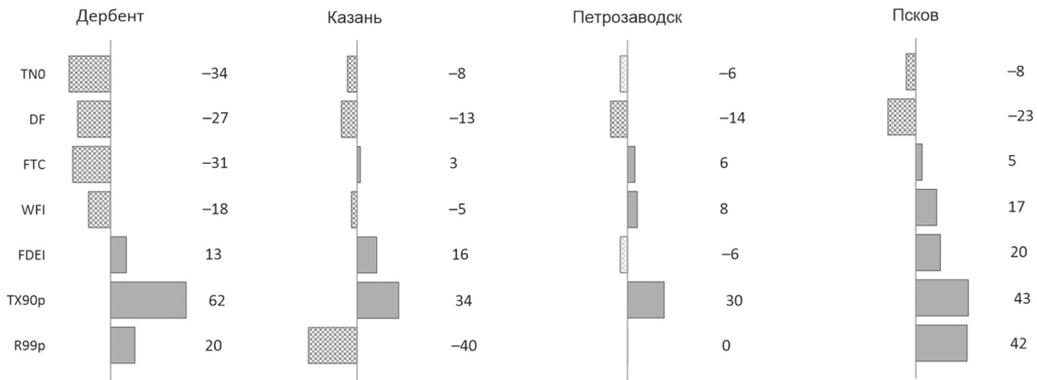


Рис. 4. Разность (%) величин индексов воздействия между двумя периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг.

В Казани изменение количества дней с минимальной температурой воздуха ниже 0 °С между двумя периодами не превышает 9% (172 дня в период с 1961 по 1990 г. и 157.4 дня во второй период). Количество дней с температурой воздуха ниже -5 °С сократилось со 120 до 105 дней (разность 13%). Изменение индексов FTC и WFI между двумя периодами незначительное. Изменение экстремальной температуры и осадков имеет противоположный характер: увеличение на 34% процента дней с температурой воздуха выше 90-го перцентиля, и существенное снижение дней с экстремальными осадками (на 40%).

Петрозаводск характеризуется наименьшим изменением индексов между двумя периодами. Среднее количество дней в году с минимальной температурой воздуха ниже 0 °С распределено по периодам: 183.5 дня в период с 1961 по 1990 г. и 172.7 дня в период с 1991 по 2020 г. Разница между периодами составляет около 6%. Количество дней с температурой воздуха ниже -5 °С также уменьшилось на 14% (со 115 до 99 дней в году). Доля экстремальных температур выросла на 30% относительно периода с 1961 по 1990 г., а вот количество дней с экстремальными осадками не изменилось.

В Пскове среднее количество дней с минимальной температурой воздуха ниже 0 °С во второй климатический период уменьшилось на 8%, со 150 до 138 дней. Количество дней с минимальными температурами воздуха сократилось на 23% (с 85 до 66 дней). Псков, как и другие исследуемые города, характеризуется положительным и значимым увеличением процента дней с экстремальной температурой воздуха на 43%. Аналогичное увеличение во второй климатический период показывают и дни с экстремальными осадками.

4. Обсуждение результатов

Наши результаты показали уменьшение событий, связанных с морозом, на всех исследуемых станциях. В исследуемом периоде сокращаются количество морозных ночей (дни с температурой ниже 0 °С) и частота «глубокого мороза» (дни с температурой ниже -5 °С). В последний климатический период тенденции к сокращению морозных дней усиливаются. Общее сокращение частоты морозных

дней обнаружено и для других районов Европы (Sesana et al., 2021; Kapsomenakis et al., 2022; Brimblecombe and Richards, 2023). Это свидетельствует о том, что для большинства объектов культурного наследия степень повреждения морозами снижается.

Анализ циклов замораживания-оттаивания показал увеличение их в северных районах и значимое уменьшение в Дербенте. Ранее нами с использованием реанализа показано увеличение циклов практически по всей территории европейской части России, за исключением Предкавказья (Vyshkvarkova and Sukhonos, 2023). Так как строительный материал исследуемых объектов имеет пористую структуру, то вероятность повреждения сооружений будет возрастать. Рост циклов замораживания-оттаивания в северных районах европейской части России монотонный, различия между двумя 30-летними периодами составляют от 2.6 до 6%. Анализ будущих изменений на основе ансамблевых модельных расчетов показал, что практически на всей территории европейской части России на протяжении XXI в. будет возрастать число дней с переходом температуры воздуха через 0 °C с ноября по март (Хлебникова и др., 2021; Третий оценочный доклад, 2022). Увеличение частоты циклов замораживания-оттаивания прогнозируется в северных районах Европы к концу XXI в. по расчетам климатических моделей ECHAM5-REMO при RCP 4.5 (Vandemeulebroucke et al., 2023).

Оценка совместного разрушающего влияния холода и осадков (индексы WFI и FDEI) не дала четкой картины. В основном изменения статистически незначимые. Однако, учитывая статистически значимый тренд зимних осадков, обнаруженный для исследуемых станций, в ближайшем будущем влияние «влажного мороза» может усилиться. FDEI представляет собой необходимые условия для критических повреждений от замерзания и оттаивания, т. е. высокие нагрузки влажности с последующим замерзанием (Vandemeulebroucke et al., 2022).

Повышение приземной температуры воздуха способствует повышению экстремальности климата (IPCC, 2021). Экстремальные температуры воздуха (индекс TX90p) показали значимый рост во всех станциях и существенную разность между двумя периодами (от 30 до 60 %).

5. Выводы

В работе проанализировано изменение индексов, используемых для оценки влияния климата на деградацию строительных материалов объектов культурного наследия за два 30-летних периода, признанных климатическими нормами, — с 1961 по 1990 и с 1991 по 2020 г. — в четырех районах расположения исторических построек на территории европейской части России.

В целом основные выводы заключаются в следующем:

— за последний климатический период произошло существенное изменение (уменьшение частоты) индексов, оценивающих влияние мороза на разрушение строительных материалов объектов культурного наследия, относительно предыдущей нормы (1961–1990);

— существенно увеличилось количество экстремальных метеорологических явлений (процент дней с температурой воздуха выше 90-го перцентиля и дни с осадками выше 99-го перцентиля) в период с 1991 по 2020 г.

Различия климатических условий, в которых находятся объекты культурного наследия, требуют индивидуального подбора показателей для оценки влияния изменений климата на разрушение строительных материалов. Защита, обеспечение и создание устойчивого менеджмента этих бесценных мест должно стать межправительственным приоритетом. Оценка влияния климатических изменений на культурное мировое наследие должна принимать во внимание сложное взаимодействие между природными, культурными и социальными системами.

Литература

- Булыгина, О. Н., Разуваев, В. Н., Александрова, Т. М. (2014). Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). [online] Доступно на: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=5> [Дата доступа 20.11.2023].
- Липка О. Н., Корзухин М. Д., Замолодчиков Д. Г., Добролюбов Н. Ю., Крыленко С. В., Богданович А. Ю., Семенов С. М. (2021) Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата. *Лесоведение*, 5, 531–546. <https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- Павловский, А. А. и Шамшурин, В. И. (2021). Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России. *Гидрометеорология и экология*, 65, 681–693. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-681-693>
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации* (2022). Росгидромет. СПб.: Научное издание технологий.
- Хлебникова, Е. И., Школьник, И. М., Рудакова, Ю. Л. (2021). Вероятностные оценки изменения прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России. *Фундаментальная и прикладная климатология*, 7 (2), 140–158. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-2-140-158>
- Brimblecombe, P., Grossi, C. M., Harris, I. (2006). Climate change critical to cultural heritage. In: R. Fort, M. Álvarez de Buergo, C. Gómez-Heras, C. Vázquez-Calvo, eds, *Heritage, Weathering and Conservation*. Rotterdam: Balkema, 387–393.
- Brimblecombe, P., Grossi, C. M., Harris, I. (2011). Climate change critical to cultural heritage. In: H. Gökçekus, U. Türker, J. W. LaMoreaux, eds, *Survival and Sustainability: Environmental Concerns in the 21st Century*. Berlin; Heidelberg: Springer, 195–205.
- Brimblecombe, P. and Richards, J. (2023). Temporal resolution of climate pressures on façades in Oxford 1815–2021. *Theoretical and Applied Climatology*, 153 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04498-x>
- Carroll, P. and Aarvevaara, E. (2018). Review of Potential Risk Factors of Cultural Heritage Sites and Initial Modelling for Adaptation to Climate Change. *Geosciences*, 8, 322. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090322>
- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., Harris, I. (2007). Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377 (2–3), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.014>
- ICOMOS *Climate Change and Cultural Heritage Working Group* (2019). *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*. Paris: ICOMOS.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, eds, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Kapsomenakis, J., Douvis, C., Poupkou, A., Zerefos, S., Solomos, S., Stavrakia, T., Melis, N. S., Kyriakidis, E., Kremlis, G., Zerefos, C. (2022). Climate change threats to cultural and natural heritage UNESCO sites in the Mediterranean. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w>

- Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Broström, T., Ashley-Smith, J., Schellen, H. L., Martens, M., van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Camuffo, D., Simeunovic, G., Vyhliđal, T. (2015). Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Heritage Science*, 3 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0067-9>
- Lisø, K. R., Kvande, T., Hygen, H. O., Thue, J. V., Harstveit, K. (2007). A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*, 42, 3547–3555. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.022>
- Nicu, I. C., Usmanov, B., Gainullin, I., Galimova, M. (2019). Shoreline Dynamics and Evaluation of Cultural Heritage Sites on the Shores of Large Reservoirs: Kuibyshev Reservoir, Russian Federation. *Water*, 11, 591. <https://doi.org/10.3390/w11030591>
- Osipova, E., Emslie-Smith, M., Osti, M., Murai, M., Åberg, U., Shadie, P. (2020). *IUCN World Heritage Outlook 3: A conservation assessment of all natural World Heritage sites*. Gland (Switzerland): IUCN.
- Peterson, T. C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001). *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001*. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland.
- Rempel, A. W. and Rempel, A. R. (2019). Frost resilience of stabilized earth building materials. *Geosciences*, 9, 328. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080328>
- Ronco, P., Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Semenzin, E., Critto, A., and Marcomini, A. (2014). The KULTURisk Regional Risk Assessment methodology for water-related natural hazards — Part 1: Physical–environmental assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5399–5414, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5399-2014>
- Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M. (2010). *The atlas of climate change impact on European cultural heritage. Scientific analysis and management strategies*. Anthem Press.
- Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., Lefevre, R. A. (2008). *Vulnerability of cultural heritage to climate change. Report European and Mediterranean Major Hazards Agreement (EUR-OPA)*. Strasbourg.
- Sardella, A., Palazzi, E., von Hardenberg, J, Del Grande, C., De Nuntiis, P., Sabbioni, C., Bonazza, A. (2020). Risk mapping for the sustainable protection of cultural heritage in extreme changing environments. Special Issue Assessing the Impact of Climate Change on Urban Cultural Heritage. *Atmosphere*, 10 (15), 5106. <https://doi.org/10.3390/atmos11070700>
- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12 (4), e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>
- UNESCO World Heritage Centre (2007). *Climate Change and World Heritage Report on Predicting and Managing the Impacts of Climate Change on World Heritage and Strategy to Assist States Parties to Implement Appropriate Management Responses*. Paris: UNESCO World Heritage Centre.
- Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N. (2022). Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 218, 109080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109080>
- Vandemeulebroucke, I., Kotova, L., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N. (2023). Degradation of brick masonry walls in Europe and the Mediterranean: Advantages of a response-based analysis to study climate change. *Building and Environment*, 230, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109963>
- Vyshkvarkova, E. and Sukhonos, O. (2023). Climate change impact on the cultural heritage sites in the European part of Russia over the past 60 years. *Climate*, 11, 50. <https://doi.org/10.3390/CLI11030050>

Статья поступила в редакцию 6 июля 2023 г.
Статья рекомендована к печати 20 июня 2024 г.

Информация об авторах:

Вышкваркова Елена Васильевна — <https://orcid.org/0000-0002-4890-3247>, aveiro_7@mail.ru
Сухонос Ольга Юрьевна — <https://orcid.org/0000-0001-8820-9084>, kovalenko_olga89@mail.ru

Changes in climate indicators of degradation of UNESCO cultural heritage sites in the European part of Russia*

E. V. Vyshkvarkova, O. Yu. Sukhonos

Institute of Natural and Technical Systems,
28, ul. Lenina, Sevastopol, 299011, Russian Federation

For citation: Vyshkvarkova, E. V., Sukhonos, O. Yu. (2024). Changes in climate indicators of degradation of UNESCO cultural heritage sites in the European part of Russia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (3), 492–508. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.306> (In Russian)

Cultural heritage sites are under threat of destruction due to the impact of climate change and related hazards such as rainstorms, floods, droughts. High vulnerability to natural disasters and important historical and socio-cultural value require special attention to World Heritage properties. The goal of the work is to assess the impact of climate on the destruction of building materials of UNESCO cultural heritage sites for four cities in the European part of Russia (Derbent, Kazan, Petrozavodsk and Pskov). The work uses daily data on air temperature and precipitation for the period 1961–2020. Five indices were used to assess the impact of frost (days with air temperatures below 0 °C and minus 5 °C, freeze-thaw cycles, Wet-frost index and frost decay exposure index) and two indices of extreme air temperatures and precipitation (percentage of days with maximum air temperature higher 90th percentile and number of days with precipitation above 99th percentile). In addition, changes in the indices between two climatic periods, 1961–1990 and 1991–2020, were estimated. The results showed a reduction in the risk of damage to cultural heritage sites by low air temperatures, while the frequency of freeze-thaw cycles increased in the northern regions against the backdrop of rising surface air temperatures. The change in extreme temperatures and precipitation has a positive trend, which increases the associated risks of destruction of materials of cultural heritage sites. Differences in climatic conditions require an individual selection of indicators to assess the impact of climate change on the destruction of building materials and an integrated approach for each cultural heritage site.

Keywords: climate change, cultural heritage sites, damage, frost, extremes.

References

- Brimblecombe, P., Grossi, C. M., Harris, I. (2006). Climate change critical to cultural heritage. In: R. Fort, M. Álvarez de Buergo, C. Gómez-Heras, C. Vázquez-Calvo, eds, *Heritage, Weathering and Conservation*. Rotterdam: Balkema, 387–393.
- Brimblecombe, P., Grossi, C. M., Harris, I. (2011). Climate Change Critical to Cultural Heritage. In: Gökçekus, H., Türker, U., LaMoreaux, J. W., eds, *Survival and Sustainability: Environmental Concerns in the 21st Century*. Berlin; heidelberg: Springer, 195–205.
- Brimblecombe, P. and Richards, J. (2023). Temporal resolution of climate pressures on façades in Oxford 1815–2021. *Theoretical and Applied Climatology*, 153 (1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04498-x>
- Bulygina, O. N., Razuvaev, V. N. and Aleksandrova, T. M. (2013). *Opisanie massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)*. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=5> [Accessed 20.11.2023]. (In Russian)
- Carroll, P. and Aarrevaara, E. (2018). Review of Potential Risk Factors of Cultural Heritage Sites and Initial Modelling for Adaptation to Climate Change. *Geosciences*, 8, 322. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090322>

* The study was supported by state assignment of Institute of Natural and Technical Systems (Project Reg. no. 124013000609-2).

- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., Harris, I. (2007). Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377 (2–3), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.014>
- ICOMOS *Climate Change and Cultural Heritage Working Group* (2019). *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*. Paris: ICOMOS.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Kapsomenakis, J., Douvis, C., Poupkou, A., Zerefos, S., Solomos, S., Stavraka, T., Melis, N. S., Kyriakidis, E., Kremliis, G., Zerefos, C. (2022). Climate change threats to cultural and natural heritage UNESCO sites in the Mediterranean. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w>
- Khlebnikova, E. I., Shkolnik, I. M., Rudakova, Yu. L. (2021) Probabilistic estimates of change in applied indicators of the thermal regime for climate change adaptation over the territory of Russia. *Fundamental and Applied Climatology*, 7 (2), 140–158. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-2-140-158> (In Russian)
- Leissner, J., Kilian, R., Kotova, L., Jacob, D., Mikolajewicz, U., Broström, T., Ashley-Smith, J., Schellen, H. L., Martens, M., van Schijndel, J., Antretter, F., Winkler, M., Bertolin, C., Camuffo, D., Simeunovic, G., Vyhliđal, T. (2015). Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Heritage Science*, 3 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0067-9>
- Lipka, O. N., Korzukhin, M. D., Zamolodchikov, D. G., Dobrolyubov, N. Yu., Krylenko, S. V., Bogdanovich, A. Yu., Semenov, S. M. (2021). A role of forests in natural systems adaptation to climate change. *Russian Journal of Forest Science*, 5, 531–546. <https://doi.org/10.31857/S0024114821050077> (In Russian)
- Lisø, K. R., Kvande, T., Hygen, H. O., Thue, J. V., Harstveit, K. (2007). A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*, 42, 3547–3555. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.022>
- Nicu, I. C., Usmanov, B., Gainullin, I., Galimova, M. (2019). Shoreline Dynamics and Evaluation of Cultural Heritage Sites on the Shores of Large Reservoirs: Kuibyshev Reservoir, Russian Federation. *Water*, 11, 591. <https://doi.org/10.3390/w11030591>
- Osipova, E., Emslie-Smith, M., Osti, M., Murai, M., Åberg, U., Shadie, P. (2020). *IUCN World Heritage Outlook 3: A conservation assessment of all natural World Heritage sites*. Gland (Switzerland): IUCN.
- Pavlovskii, A. A., Shamshurin, V. I. (2021). Influence of Baltic Sea level rise on historic and cultural heritage of Russia. *Journal of Hydrometeorology and Ecology*, 65, 681–693. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-681-693> (In Russian)
- Peterson, T. C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001). *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001*. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland.
- Rempel, A. W. and Rempel, A. R. (2019). Frost Resilience of Stabilized Earth Building Materials. *Geosciences*, 9, 328. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080328>
- Ronco, P., Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Semenzin, E., Critto, A., Marcomini, A. (2014). The KULTURisk Regional Risk Assessment methodology for water-related natural hazards — Part 1: Physical–environmental assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5399–5414, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5399-2014>
- Sabbioni, C., Brimblecombe, P., Cassar, M. (2010). *The atlas of climate change impact on European cultural heritage. Scientific analysis and management strategies*. Anthem Press.
- Sabbioni, C., Cassar, M., Brimblecombe, P., Lefevre, R. A. (2008). Vulnerability of cultural heritage to climate change. *Report European and Mediterranean Major Hazards Agreement (EUR-OPA)*. Strasbourg.
- Sardella, A., Palazzi, E., von Hardenberg, J, Del Grande, C., De Nuntiis, P., Sabbioni, C., Bonazza, A. (2020). Risk mapping for the sustainable protection of cultural heritage in extreme changing environments. Special Issue Assessing the Impact of Climate Change on Urban Cultural Heritage. *Atmosphere*, 10 (15), 5106. <https://doi.org/10.3390/atmos1070700>

- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12 (4), e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>
- Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation* (2022). Roshydromet. St Petersburg: Naukoiomkie tekhnologii Publ. (In Russian)
- UNESCO World Heritage Centre (2007). *Climate Change and World Heritage. Report on Predicting and Managing the Impacts of Climate Change on World Heritage and Strategy to Assist States Parties to Implement Appropriate Management Responses*. Paris: UNESCO World Heritage Centre.
- Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N. (2022). Decision framework to select moisture reference years for hygrothermal simulations. *Building and Environment*, 218, 109080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109080>
- Vandemeulebroucke, I., Kotova, L., Caluwaerts, S., Van Den Bossche, N. (2023). Degradation of brick masonry walls in Europe and the Mediterranean: Advantages of a response-based analysis to study climate change. *Building and Environment*, 230, 109963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109963>
- Vyshkvarkova, E. and Sukhonos, O. (2023). Climate change impact on the cultural heritage sites in the European part of Russia over the past 60 years. *Climate*, 11, 50. <https://doi.org/10.3390/CL111030050>

Received: July 6, 2023

Accepted: June 20, 2024

Authors' information:

Elena V. Vyshkvarkova — <https://orcid.org/0000-0002-4890-3247>, aveiro_7@mail.ru

Olga Yu. Sukhonos — <https://orcid.org/0000-0001-8820-9084>, kovalenko_olga89@mail.ru