

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ В АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЕ И ЕЕ БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ КОМФОРТНОСТЬ

УДК 551.58:502.174:721(470-25)

DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15114

М.С. Мягков*Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия***Л.И. Алексеева***Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Аннотация

В поисках решения проблемы снижения эмиссии парниковых газов значительное внимание уделяется возможности использования альтернативных источников энергии. Одним из самых перспективных направлений считается массовое использование ФЭУ. Там, где имеются свободные территории, они могут применяться в формате «солнечных электростанций», а на территории городов перспективы их применения связаны с интеграцией в наружные оболочки зданий и сооружений. Однако применение ФЭУ имеет ряд отрицательных последствий для экологических характеристик среды обитания человека. В частности, за счет снижения альбедо ФЭУ увеличивают количество поглощенной солнечной радиации и повышают температуру окружающей среды в месте их размещения. В статье рассматривается биоклиматический аспект массового применения ФЭУ на урбанизированной территории на примере Москвы. Показано, что это может привести к значительному усилению городского острова тепла и ухудшению биоклиматической комфортности до критических для человека значений в области перегрева¹.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические установки, архитектура зданий и сооружений, интегрирование ФЭУ в архитектуру, биоклиматическая комфортность, климат города, городской остров тепла, фотоэлектрический остров тепла, ENVI-met

PHOTOVOLTAIC PANELS AND BIOCLIMATIC COMFORT OF THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT

M. Myagkov*Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia***L. Alekseeva***Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

Abstract

In the search for a way to reduce greenhouse gas emissions, considerable attention is paid to the alternative energy sources. One of the most promising solution is considered to be the massive use of photovoltaic elements. In countries with large free from economic use territories, PVP can be used in the format of "solar power plants". In urban areas the prospects for PVP are associated with integration into the outer shells of buildings and structures. However, the use of PVP has a complex of negative consequences for the environmental characteristics of the human environment. In particular, due to a decrease in albedo, PVP increase the amount of absorbed solar radiation and increase the temperature of the environment at their location. The article deals with the bioclimatic aspect of the massive application of PVP in an urbanized area on the example of Moscow. It is shown that this can

¹ **Для цитирования:** Мягков М.С. Фотоэлектрические установки в архитектурной среде и ее биоклиматическая комфортность / М.С. Мягков, Л.И. Алексеева // Architecture and Modern Information Technologies. – 2020. – №2(51). – С. 255–288. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/2kvart20/PDF/14_myagkov.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15114

lead to a significant increase in urban heat island and deterioration of bioclimatic comfort to overheating values, critical for humans².

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic panels, architecture of buildings and structures, building integrated photovoltaics, bioclimatic comfort, urban climate, urban heat island, photovoltaic heat island, ENVI-met

Введение

Принято считать, что мир движется к глобальной экологической катастрофе из-за потепления, которое вызвано техногенными выбросами парниковых газов, в первую очередь – CO₂. И единственным спасением от надвигающейся катастрофы может служить максимально широкое использование т.н. «возобновляемых источников энергии» (ВИЭ). Этот вопрос из научно-практического давно превратился в международно-политический, подкрепленный рядом международных соглашений и договоров о сокращении выбросов парниковых газов³, и у большинства людей, не связанных с экологией и климатологией, перестал вызывать сомнения. Видимо поэтому большинство отечественных и зарубежных публикаций, касающихся применения ВИЭ, в том числе в составе архитектурных объектов, носит схематический характер. Сначала озвучиваются приведенные выше соображения как неоспоримая истина, вслед за этим перечисляются существующие на текущий момент ВИЭ, в первую очередь – фотоэлектрические установки (ФЭУ)⁴, а после этого предлагаются многочисленные варианты применения этих ВИЭ и ФЭУ в различных ситуациях, в т.ч. в составе архитектурных и градостроительных объектов, тем самым как бы направляя их по пути «устойчивого развития» и «зеленой архитектуры». Таким образом применение ФЭУ в составе зданий и сооружений в качестве альтернативного источника «экологически чистой» энергии стало своеобразным «архитектурным мейнстримом» в Европе и США в начале XXI века.

С небольшим запозданием эта тенденция, не слишком оправдав надежд на Западе [1], стала активно распространяться в российской архитектуре (правда, лишь на стадии проектирования) и сейчас, судя по количеству публикаций в научных и особенно научно-популярных изданиях и информационных материалах в сети Интернет, находится на пике своей популярности в России.

В связи с этим, а также на фоне довольно большого количества начавших появляться статей о ФЭУ скептического содержания, представляет интерес оценка подобных решений с точки зрения их экологических последствий, о которых пока не очень принято говорить. К таким последствиям, которые были не очевидны в начале массового использования ФЭУ, относятся изменения теплового и водно-воздушного режима почв на участках размещения солнечных электростанций (СЭС) [2], влекущие за собой уменьшение биоразнообразия ландшафтов и массовую гибель орнитофауны [3]; проблемы, связанные с накоплением миллионов тонн отработанных ФЭУ, для которых ещё не создана технология переработки и утилизации, учитывающая класс опасности

² **For citation:** Myagkov M., Alekseeva L. Photovoltaic Panels and Bioclimatic Comfort of the Architectural Environment. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2020, no. 2(51), pp. 255–288. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2020/2kvart20/PDF/14_myagkov.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15114

³ Киотский протокол от 11.12.1997 г., Парижское соглашение от 12.12.2015 г.

⁴ Всё, сказанное далее относится к наиболее распространенным типам ФЭУ на основе поликристаллического кремния, работающим в диапазоне спектра солнечного излучения 480–1100 нм (от видимого синего до ближнего инфракрасного излучения) и имеющим коэффициент преобразования поглощенной солнечной энергии в электроэнергию 14–16% (более подробно об устройстве и технологии работы ФЭУ см. [40]).

этих отходов; химическое загрязнение воздуха, воды и почвенного покрова в зонах влияния предприятий, производящих ФЭУ.

К числу таких «неожиданных» последствий относится и изменение микроклиматического режима и биоклиматической комфортности городской среды при массовом применении ФЭУ как в виде отдельно размещаемых на территории застройки или кровлях зданий установок, так и в составе конструктивных элементов зданий и сооружений в качестве их покрытия.

Дискуссии на эту тему начались в 2010-х годах и с тех пор ведутся постоянно [4, 5, 6 и др.]. Высказываются мнения, что изменение теплофизических свойств застройки за счет повышения поглощенной радиации приводят к увеличению тепловых нагрузок на городскую среду, росту температуры воздуха, снижению его влажности, а вблизи отдельно расположенных СЭС будут образовываться микроклиматические аномалии с более аридным климатом. Такие изменения микро- и мезоклимата даже получили своё название – фотоэлектрический остров тепла (PVHE⁵). Совместное проявление на территории городов уже имеющегося острова тепла (UHI⁶) и добавленного к нему PVHE должны ещё больше усилить тепловой дискомфорт городской среды в странах с солнечным жарким климатом и в странах с умеренным климатом в летнее время [4].

Особенно остро этот вопрос стоит в крупных городах т.к. альbedo (отражательная способность) ФЭУ намного меньше (а, следовательно, поглощающая способность – намного больше), чем у обычных строительных материалов, применяемых для отделки кровель и фасадов, что может приводить к увеличению температуры как на территории городов в целом, так и внутри зданий, оборудованных ФЭУ. Поэтому авторы этой статьи, не вполне согласные с озвученной в начале статьи постановкой вопроса, сочли необходимым обратиться к экологическому аспекту воздействия ФЭУ на урбанизированную среду, прежде всего – *ее радиационно-температурный режим и биоклиматическую комфортность*, чтобы прояснить вопрос о том, насколько они полезны и безопасны для урбанизированных территорий, на которых проживает более 1/2 населения планеты, в т.ч. 3/4 жителей России⁷. Решение вопроса *количественной оценки изменения радиационно-теплого режима урбанизированной среды и ее биоклиматической комфортности в случае массового применения ФЭУ методом математического моделирования* – и является главной задачей представленного исследования. Однако прежде, чем перейти к этому вопросу, следует сделать несколько замечаний, касающихся двух важных аспектов, отсутствующих в большинстве публикаций и информационных материалов, «продвигающих» эту технологию: экологической и технико-экономической оценки эффективности ФЭУ (как наиболее распространенных в практической деятельности архитекторов и просто в быту у широких слоев населения установок по использованию ВИЭ).

Технико-экономические и экологические аспекты

В *технико-экономическом отношении* одним из главных вопросов, вызывающих сомнения в целесообразности повсеместного применения ФЭУ, является их коэффициент EROEI⁸. Именно по нему сравнивается энергетическая эффективность традиционных источников энергии с ВИЭ [7]. При существующем уровне технологического развития ФЭУ EROEI для них намного ниже, чем для традиционных источников энергоснабжения и декларируется на уровне 4–6, т.е. в среднем фотопанель за расчетный срок эксплуатации вырабатывает во столько же раз больше энергии, чем

⁵ PVHE (англ.) – Photovoltaic Heat Island

⁶ UHI (англ.) – Urban Heat Island.

⁷ По данным доклада ООН «Перспективы всемирной урбанизации 2018». – URL: <https://population.un.org/wup/> (дата обращения: 27.02.2020).

⁸ EROEI (англ. Energy Return On Energy Invested) – отношение получаемой энергии к количеству энергии, затраченному на производство и эксплуатацию энергогенерирующих установок.

было потрачено на ее производство. Однако в этом подсчете есть некоторое лукавство, которое заключается в том, что оцениваются энергозатраты лишь на производство самой панели, а не всего комплекса оборудования, которое необходимо для ее работы. Но даже при этом показатель EROEI для многих стран, где преобладает пасмурная погода находится на критически низком уровне 2–3, а иногда даже менее 1 [8, 9], т.е. фотопанель не окупает затраченную на ее производство энергию. Это признается многими специалистами, однако публикации на эту тему неизменно встречают шквал критики из статей, опровергающих этот неприятный для ФЭУ факт.

В умеренном и субарктическом климатах, в которых лежит большая часть России, Центральной и Северной Европы, ФЭУ, используемые как отдельные устройства малой мощности (до 15 кВт), так и объединенные в «солнечные электростанции» (СЭС) или «солнечные парки» (те же СЭС, только меньшей площади), за расчетный срок эксплуатации не окупаются, т.е. являются планово-убыточными, и их строительство и эксплуатация поддерживаются только за счет государственных субсидий и дотаций. В этом отношении интересна одна из наиболее свежих технико-экономических оценок СЭС, выполненная в [10] для г. Омска. Произведенный в этой работе технико-экономический расчет показал, что срок окупаемости СЭС в природно-климатических условиях Сибири составит 17 лет, а рентабельность капиталовложений – 1.8% годовых за 20 лет. В этом расчете, правда, не учитывались эксплуатационные расходы и затраты на утилизацию оборудования после окончания срока службы, иначе расчет бы показал отрицательную рентабельность СЭС. К аналогичным выводам пришли авторы [11], и подобных примеров можно привести очень много.

Экономическая и энергетическая нерентабельность СЭС и отдельных ФЭУ признается также для природно-климатических условий Финляндии и других стран Северной Европы [12], где их применение, по мнению авторов указанного исследования, на существующем технологическом уровне развития ФЭУ носит «демонстрационный характер», призванный приучить население к идее их экологичности, которая со временем, как ожидается, будет достигнута для районов с низкой интенсивностью солнечной радиации. В Центральной и Северной России с ее природно-климатическими условиями, близкими к финским или даже более суровыми, применение ФЭУ в районах, обеспеченных централизованным электроснабжением, также носит исключительно демонстрационный характер.

Говоря об *экологической эффективности ФЭУ* как альтернативных источников энергии следует, прежде всего, отметить то обстоятельство, что она оценивается лишь по одному целевому показателю – удельным выбросам CO_2 на единицу вырабатываемой энергии (декарбонизации). Поскольку ФЭУ в процессе генерации CO_2 не выделяют, их удельные выбросы оцениваются исходя из тех объемов выбросов, которые образовались при производстве этих ФЭУ. Часто упускается из виду, что производство – это лишь часть жизненного цикла, и следовало бы оценивать ФЭУ по выбросам CO_2 на всём протяжении их жизненного цикла с момента добычи сырья и вплоть до утилизации отработавших свой срок ФЭУ. Причем не только самих ФЭУ, но и других устройств и оборудования, без которых фотопанели не могли бы функционировать – установки для монтажа фотопанелей, соединительные провода, инвертеры, аккумуляторы, линии электропередачи и т.д. При такой оценке экологическая эффективность ФЭУ по выбросам CO_2 наверняка бы значительно снизилась, а по некоторым оценкам стала бы отрицательной.

Ещё один аспект экологической эффективности, который в публикациях о ФЭУ обычно не затрагивается, касается выбросов других загрязняющих веществ, образующихся при добыче, производстве, эксплуатации и утилизации всего оборудования ФЭУ. Оценка ФЭУ по выбросам CO_2 носит односторонний характер и применяется только потому, что основная цель, которая ставится перед ВИЭ, в т.ч. ФЭУ – снижение концентрации этого газа, обладающего парниковым эффектом, в атмосфере, и вообще-то не являющимся загрязняющим веществом с точки зрения экологии человека. CO_2 даже не входит в

перечень загрязняющих веществ, утвержденный Минздравом России⁹, в то время как сопутствующие производству ФЭУ и оборудования для них вещества, такие как кадмий, теллур, свинец, литий, полициклические и ароматические углеводороды и др. имеют первый класс опасности, обладают канцерогенными свойствами и отравляют огромные территории, прилегающие к местам их добычи и переработки в готовую продукцию.

По данным [13], целевой показатель ВИЭ по декарбонизации энергетики и промышленности противоречит показателю здоровья населения в отношении борьбы с загрязнением воздуха другими веществами. Так, например, производство и применение в транспорте и энергетике биодизеля ведет к заметному увеличению выбросов другого загрязняющего вещества, представляющего прямую угрозу здоровью человека и экологическому состоянию всей окружающей среды – SO_2 . Поэтому при нынешней установке и применяемых сценариях развития ВИЭ невозможно количественно оценить взаимные выгоды от борьбы с загрязнением воздуха вредными для здоровья человека химическими веществами, сопутствующими жизненному циклу ВИЭ, и смягчения последствий изменения климата с точки зрения соответствующих затрат на декарбонизацию или смягчение последствий ущерба здоровью населения. Исходя из вышесказанного, было бы целесообразно дополнить экологическую эффективность и безопасность ФЭУ, определяемую по выбросами CO_2 , выбросами этого газа от мероприятий по нейтрализации всех остальных видов воздействия и рекультивации загрязненных и нарушенных территорий, но тогда идея ФЭУ «утонула» бы в удельных выбросах CO_2 по сравнению с традиционными источниками энергии.

Социальные аспекты

Существует два принципиально важных вопроса, касающихся глобальных аспектов развития возобновляемых источников энергии в виде ФЭУ с учетом их современного технологического уровня. Первый из них: стоит ли останавливать таяние вечной мерзлоты, например, на Колыме или Аляске именно сейчас ценой жизни и здоровья десятков и сотен тысяч людей, живущих в зоне влияния вредных производств, связанных с ФЭУ? С одной стороны, ФЭУ должны приводить к уменьшению парникового эффекта и нагреванию атмосферы за счет сокращения выбросов CO_2 ; с другой стороны, они же будут уменьшать планетарное альбедо Земли, за счет чего будет поглощаться всё больше солнечной радиации, большая часть которой будет затрачиваться на нагревание приземного слоя атмосферы. Поэтому второй вопрос, требующий ответа, заключается в следующем: готовы ли современные жители крупных и крупнейших городов жить в урбанизированной среде, где главным формообразующим фактором станут ВИЭ и (как будет показано дальше) испытывать невыносимо жаркие условия при массовом внедрении ФЭУ, а также испытывать повышенную экономическую нагрузку (т.к. процесс внедрения ФЭУ в значительной степени дотируется из национальных бюджетов) уже сейчас ради перспективы сохранения в отдаленном будущем вечной мерзлоты в субарктических и арктических районах?

Осознание этих последствий приводит к охлаждению интереса к массовому применению ФЭУ во многих странах. Так, например, в последнее время возникли оппозиционные движения по отношению к размещению «солнечных парков» во многих европейских странах. Акции протеста против размещения солнечных парков на землях, пригодных для сельского хозяйства, в последние годы участились, например, в Дании¹⁰. Парламент Нидерландов в 2019 году одобрил предложение «Фабер» – названное в честь депутата парламента Карлы Дик-Фабер, представленное коалиционным правительством, чтобы ограничить развитие наземных солнечных парков на сельскохозяйственных землях.

⁹ Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». Минздрав России, 2003 г.

¹⁰ Dutch solar sector fights belief PV is eroding agricultural land. – URL: <https://www.pv-magazine.com/2018/05/28/dutch-solar-sector-fights-belief-pv-is-eroding-agricultural-land/> (дата обращения: 27.02.2020).

Аналогичные движения появляются в Италии¹¹, Германии, Франции. А, например, в Южной Корее общественность выдвинула обвинение властям в том, что под размещение солнечных парков было решено частично вырубать леса¹².

Выбор территории и места размещения

Массовое применение ФЭУ в мире началось с 2000-х годов. Выпускаемые в то время солнечные панели представляли собой независимые инсталляции, пригодные для автономного размещения в самых различных условиях – на кровлях зданий, навесах, технических зонах инженерных коммуникаций, брошенных землях и т.д. В то же время определилось два основных способа применения ФЭУ – в виде отдельных энергетических объектов – солнечных парков или солнечных электростанций (СЭС) в странах, обладающих значительными территориальными ресурсами, и в составе архитектурных объектов жилого, коммерческо-делового и производственного назначения. Здесь ФЭУ располагались в основном на кровлях.

В виде отдельных СЭС, занимающих десятки и сотни гектар земли, энергетические объекты, основанные на использовании солнечной энергии, как правило, размещают на своей территории страны с тропическим и субтропическим климатом, в которых, в отличие от Европы, имеются обширные аридные пустынные или полупустынные земли или горные пустыни, где отсутствует население, не ведётся хозяйственная деятельность, а растительный и животный мир в этих районах практически отсутствуют. Наиболее активно строят на своей территории СЭС Австралия, Китай (пустыни Такла-Макан и Гоби), страны Ближнего Востока (Аравийская пустыня), а также отдельные юго-западные штаты США, где преобладают полупустынные ландшафты. Такие объекты, как правило, сооружаются за счет бюджетных средств соответствующих стран, иногда с привлечением небольшой доли частного акционерного капитала.

Идея интеграции ФЭУ непосредственно в застройку виде отдельно размещенных устройств или специальных покрытий конструктивных элементов зданий и сооружений более привлекательна для Европы и стран Юго-восточной Азии (Тайвань, Сингапур, Гонконг), не имеющих свободных территориальных ресурсов. Этот способ размещения ФЭУ привлекателен ещё и потому, что не требует затрат на устройство линий электропередач, в которых происходит частичная потеря электроэнергии, а также обеспечивает их присутствие в повседневной жизни граждан, поэтому может реализовываться с привлечением внебюджетных средств, за счет самих граждан – покупателей этих ФЭУ и являющихся потребителями вырабатываемой ими электроэнергии. Практически во всех странах приобретение ФЭУ и сопутствующего оборудования в личных домохозяйствах датируется государством.

В России ФЭУ в виде малых генерирующих объектов в составе индивидуальных домохозяйств практически не распространены, т.к. даже на юге их рентабельность слишком низка, а большинство проблем с эксплуатацией и обслуживанием приходится решать самостоятельно. В том числе этому мешает и проблема передачи в магистральные сети избытка летней дневной электроэнергии (ее «буферизация», активно применяемая в западных странах), которая в российской практике так и не решена. Поэтому в России пока доминирует строительство СЭС в основном за счет бюджетных средств в рамках федеральных программ, например – СЭС «Владиславка» в Крыму или СЭС «Майминская» в горах Алтая (в зоне ландшафтов, называемых «альпийские луга»), многочисленные СЭС на пахотных землях Оренбургской области строятся компанией «Хэвел», созданной госкорпорацией Роснано за бюджетные средства. К этим же

¹¹ Italy's historic 'Tuscia' region deluged by 1.35 GW of large scale solar. – URL: <https://www.pv-magazine.com/2019/10/09/italys-historic-tuscia-region-deluged-by-1-35-gw-of-large-scale-solar/> (дата обращения: 27.02.2020).

¹² Korea's South Jeolla province is becoming a solar hub. – URL: <https://www.pv-magazine.com/2019/09/18/koreas-south-jeolla-province-is-becoming-a-solar-hub/> (дата обращения: 27.02.2020).

«достижениям» относится недавнее строительство крупнейшей в России Бурзянской СЭС на территории заповедных лугов и лесов Башкирии, сооруженной той же группой компаний, активно пользующихся государственной политической и финансовой поддержкой. Надо сказать, что такое отношение к естественным природным ландшафтам и сельскохозяйственным землям было бы немыслимо на Западе, где допускается использование только потерявших плодородность сельскохозяйственных территорий и нарушенных территорий (открытая добыча полезных ископаемых, загрязненные территории на месте предприятий, карьеров, полигонов для захоронения отходов) и то лишь на время их реабилитации [15].

Так или иначе, основным территориальным ресурсом для размещения ВИЭ в виде ФЭУ следует считать именно урбанизированные территории. Поэтому важно оценить возможное воздействие этих массово интегрированных в городскую среду ФЭУ на изменение городского климата, в первую очередь – тепловой баланс городской застройки (самое очевидное и непосредственное воздействие) и ее биоклиматическую комфортность. Для этого сначала следует рассмотреть способы интеграции ФЭУ в состав зданий и сооружений.

Интеграция ФЭУ в архитектурную среду

Согласно [16] можно выделить три уровня интеграции ФЭУ в архитектурные объекты: базовый, средний и продвинутый. *Базовый уровень* предполагает использование обычных фотоэлектрических модулей с учетом их физических габаритов и массы, задаваемых производителем. Такой наиболее простой способ добавления ФЭУ в состав архитектурных объектов получил название «добавленных ФЭУ», «BAPV»¹³ [16]. Чтобы быть адаптивными к конкретным условиям и зданиям (как новым, так и модернизируемым), производители ФЭУ должны обеспечить максимальную гибкость характеристик модулей, влияющих на внешний вид зданий и зависящих от габаритов и формы самих зданий – форму и размер ФЭУ. Кроме того, ФЭУ должны выпускаться с соответствующими устройствами по закреплению модулей на ограждающих конструкциях зданий, чтобы обеспечить, с одной стороны, достаточную прочность соединения, с другой – не требовать внесения изменений в готовые ограждающие конструкции. Также производитель должен выпускать ФЭУ в палитре цветов и фактур отделки, отвечающих цветам и текстурам поверхности зданий.

Средний уровень «интегрируемости» обеспечивают неактивные элементы, подобные самим модулям ФЭУ, но выполняющие только дополнительные декоративные функции (например – функцию огибающей). Эти элементы должны помогать расположению и выбору размерности всего массива системы ФЭУ в соответствии с особенностями архитектурно-строительной композиции здания. Эти элементы называются «манекенами», хотя это слово немного вводит в заблуждение в случае multifunctional модуля, поскольку неактивный элемент все-таки выполняет реальную функцию (например – оболочки).

Продвинутый уровень интегрируемости должен обеспечивать композиционную целостность архитектурного решения той части здания, на которой размещаются ФЭУ. Максимальная интегрируемость достигается тогда, когда предлагается полная активная прилегающая к элементам здания система, обеспечивающая также все необходимые дополнительные элементы сопряжения (соединительные, отделочные, угловые компоненты и т.д.). Такой уровень интеграции ФЭУ с архитектурными объектами называется «BIPV»¹⁴ [17].

В [18, 22, 26] отмечается, что в художественном отношении интеграция ФЭУ в архитектурную среду должна учитывать архитектурные особенности самих оснащаемых

¹³ BAPV (англ.) – Building Added Photovoltaic system.

¹⁴ BIPV (англ.) – Building Integrated Photovoltaics.

ФЭУ зданий и характер их окружения. В этом отношении выделяются два основных подхода к проектированию – «адаптация интегрированных установок к уже сложившемуся характеру застройки и создание новых архитектурно-художественных решений, использующих объекты альтернативной энергетики как основной элемент художественного образа» [18, с.162]. Во втором случае дизайн и способ интеграции ФЭУ являются определяющим элементом архитектуры всего здания и в зависимости от применяемых технологий интеграции фотопанелей в архитектурные конструкции может быть отнесен к продвинутому уровню BIPV.

Размещение ФЭУ на кровлях

Очевидно, что кровли зданий являются наиболее подходящим элементом их оболочки для размещения ФЭУ. На плоских кровлях ФЭУ могут располагаться на обычных опорах заводского изготовления, обеспечивающих оптимальный угол наклона фотопанелей к горизонту. По сути, это отдельно стоящие ФЭУ, размещенные на кровлях и не имеющие с ними никакой архитектурно-строительной интеграции. На наклонных кровлях фотопанели укладываются в виде массивов поверх скатов и закрепляются с помощью специальных креплений. При этом между конструкцией ФЭУ и материалом отделки кровли оставляется небольшой воздушный зазор, т.е. непосредственная термодинамическая связь фотопанелей с конструкцией кровли не возникает.

При средней степени интеграции ФЭУ с кровлями за счет применения дополнительных элементов крепежа и сопряжения фотопанелей удастся создать сложные кровли, полностью состоящие из ФЭУ. По такому принципу уже построены довольно масштабные здания. В отдельных случаях здания изначально проектируются с учетом возможности установки на кровлях максимального количества фотопанелей. В этом случае можно сказать, что ФЭУ выступают в качестве фактора архитектурного формообразования. Иногда результат такого формообразования выглядит довольно спорным с эстетической точки зрения [19].

Также в современных условиях возможен выпуск гибких пластиковых солнечных панелей для плоских и слабонаклонных кровель (рис. 1). Однако их применение сильно ограничено, поскольку возможно только в странах, где снежный покров не образуется, и практически отсутствует пылеветровая нагрузка. Поэтому, например, в умеренных широтах или субтропических, тропических и высокогорных пустынях (основные территории строительства крупных СЭС) их применять нельзя. Кроме того, такие пластиковые панели наносятся непосредственно на строительные конструкции кровли, т.е. имеют термодинамическую связь с конструктивной частью перекрытия. Поэтому, нагреваясь на солнце в летнюю безоблачную погоду до 65-75°C, они соответственно нагревают и перекрытие кровли, оказывая тем самым тепловую нагрузку на подкровельные пространства здания, приводя к их сильному перегреву, что далеко не всегда допустимо, исходя из назначения этих пространств.



Рис. 1. Гибкие пластиковые солнечные панели на плоской кровле

При всём удобстве размещения фотоэлектрических панелей на кровлях зданий и сооружений, для этого существует ряд ограничений и исключений. Исключения по технико-экономическим причинам, например, составляют кровли, ориентированные в северную четверть горизонта с уклоном в этом направлении более 10° . Фотоэлектрические панели, совмещенные с этими кровлями, заведомо не компенсируют энергозатрат на их производство на любой широте в любом типе климата [20]. Также исключаются кровли, имеющие угол наклона более 60° , поскольку производители стандартных ФЭУ не гарантируют их устойчивость и надёжность крепления на таких крутых скатах [20].

Также необходимо предусматривать возможность удаления снега с горизонтально и наклонно установленных фотопанелей. Если фотопанель установлена горизонтально или наклонно (например – «солнечная черепица», рис. 2), то максимальная допустимая весовая нагрузка на нее согласно стандартам ЕС (IEC 61215) составляет 2400 Па (примерно 240 кг/м^2). Это ограничение распространяется не только на сам модуль, но также и системы крепежа, зажимных приспособлений и монтажных конструкций. При превышении указанной нагрузки происходит сгибание и растяжение модуля, что может привести к вытягиванию панелей из крепежной системы, либо их физическому повреждению [21]. На большей части России снеговые нагрузки превышают указанное предельное значение. Из восьми зон, на которые делится по снеговым нагрузкам территория России¹⁵, только в первых трех зонах эти нагрузки не превышают в среднем за зиму 240 кг/м^2 – к этим зонам относятся территории Крыма, Закавказья, Северного Кавказа, юга ЕТР (южнее Воронежа и Липецка) и отдельные территории Центральной и Восточной Сибири, где зимой преобладает Азиатский антициклон, характеризующийся морозной малооблачной (а, следовательно, и с малым количеством осадков) погодой. Москва лежит в IV зоне, где снеговая нагрузка составляет в среднем 245 кг/м^2 , север и восток ЕТР лежат в V зоне с нагрузкой 326 кг/м^2 , а наибольшие нагрузки наблюдаются на дальнем Востоке, например – на п-ове Камчатка они достигают 571 кг/м^2 . Таким образом, применение горизонтальных или слабонаклонных ФЭУ на кровлях зданий практически невозможно для наиболее удаленных и труднодоступных районов России, где из-за отсутствия сетевого электричества эти источники энергии могли бы быть наиболее востребованными.



Рис. 2. ФЭУ, интегрированные в кровлю на архитектурном уровне VIP. Офисное здание «Marce International Support Office», г. Кемптхол, Швейцария. Архитектор Beat Kämpfen (по [22])

Таким образом, при проектировании фотоэлектрических установок на кровлях зданий, особенно пологих и слабонаклонных, необходимо предусматривать системы удаления с

¹⁵ Согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

них снегоотложений ручным или механическим способом, что, в свою очередь, требует проектирования дополнительных инженерных конструкций. В противном случае есть вероятность потерь значительного количества энергии из-за затемнения фотоэлектрических модулей снежным покровом. Так, например, снижение годовой выработки электроэнергии в северных штатах США (не считая Аляски) за счет снегоотложения на поверхности ФЭУ превышает 30% [23], и может составлять до 20% даже в Калифорнии [24]!

Для улучшения условий «самосброса» снега с модулей под действием силы тяжести используют модули бескаркасной конструкции, поскольку каркас служит причиной дополнительного сопротивления соскальзыванию снега с поверхности фотоэлементов. Однако этот способ работает только при положительных температурах самих модулей, при отрицательной температуре поверхности модулей снег с них сбрасывается примерно так же, как и с ФЭУ на обычных каркасах (рис. 3).



Рис. 3. Модули с каркасной и бескаркасной конструкцией сбрасывают снег примерно одинаково при температуре модуля чуть ниже 0°C и температуре наружного воздуха -10°C и ниже (по [23])

Более того, существует опасность намерзания снега, падающего на модуль с положительной температурой, если после снегопада температура наружного воздуха понижается (например – при прохождении холодного фронта зимой). Падающий на нагретый выше 0°C модуль снег тает, а образующаяся водяная плёнка по мере похолодания превращается в ледяную корку нарастающей толщины с налипающим на нее снегом, которую потом трудно удалить без повреждения поверхностей фотоэлектрического модуля. То же самое происходит, когда прогретый после эксплуатации автомобиль оставляется владельцем на открытом воздухе во время снегопада зимой. Первые порции снега тают, попадая на нагретую поверхность кузова. На растаявший снег налипают новые порции снега, которые по мере понижения температуры кузова автомобиля превращаются в снежно-ледяную корку, которую потом приходится с большим трудом счищать.

Однако, при существующем уровне технологического развития ФЭУ, собираемой ими с кровель здания электроэнергии для обеспечения нужд этих же зданий, будет не достаточно, даже если использовать для размещения фотоэлектрических модулей всю доступную (за исключением указанных выше ограничений) площадь этих кровель. Например, в США, имеющих по сравнению с Россией намного более теплый и солнечный климат, максимально возможное обеспечение потребности в электроэнергии за счет

потенциала генерирования на кровлях зданий в городах составит: Чикаго – 29%¹⁶, Вашингтон – 16%, Майями – 46%, а в среднем по всем городам в США (за исключением Аляски и островных территорий) этот потенциал оценивается примерно в 36% [20]. Даже в Австралии обеспеченность собственных нужд домохозяйств электроэнергией за счет устанавливаемых на кровлях зданий модульных ФЭУ оценивается всего в 25% в среднем за год [24].

Размещение ФЭУ на фасадах

Из приведенных выше результатов исследований авторов из стран с различными природно-климатическими условиями следует, что для увеличения доли обеспечения потребностей в электроэнергии жилых и общественных зданий за счет ФЭУ необходимо использовать не только кровли этих зданий, но и фасады. В этом случае потенциал обеспечения «солнечной» электроэнергией может существенно возрасти и составить для той же Австралии 46%, США – 58%, Испании – 48%. В более северных странах Европы, где в течение года часто наблюдается пасмурная погода, этот потенциал окажется намного ниже: в Дании и Великобритании – около 30%, Швеции и Финляндии – 19.5% [3, 25].

В отношении интеграции фотоэлектрических модулей в архитектуру зданий и сооружений применительно к фасадам зданий, так же как и к кровлям, можно выделить два уровня – добавление ФЭУ к существующим и модернизируемым фасадам (BAPV) и интеграция этих модулей с конструктивными элементами фасадов (BIPV) (рис. 4).



Рис. 4. Стена BIPV в виде сплошного витражного навесного фасада – «фотоэлектрический фасад»

С точки зрения термодинамики зданий и радиационно-теплого режима застройки BAPV и BIPV имеют принципиальное отличие. BAPV размещаются на фасадах с достаточно большим зазором, обеспечивающим циркуляцию воздуха между фотопанелями и

¹⁶ Данные приведены с учетом «буферизации» вырабатываемой электроэнергии, т.е. при условии ее перетока в городские сети или накопления, хранения и перераспределения между интервалами времени максимальной выработки и максимального потребления.

наружной поверхностью ограждающих конструкций. В этом случае большая часть солнечной энергии, поглощаемой ФЭУ и превращаемой в тепло, отдается наружному воздуху за счет турбулентного теплообмена и идет на нагревание приземного слоя атмосферы. Оставшаяся часть тепла, не преобразованная в электроэнергию, излучается в городскую среду и, в меньшей степени, в сторону фасадов. За счет этого BAPV могут даже частично затенять фасады от солнечной радиации, снижая тепловую нагрузку на них и на внутреннюю среду зданий.

В случае BAPV это дополнение фасадов может быть сугубо утилитарным – закрепление стандартных ФЭУ на глухих участках фасадов зданий без светопроемов (например – промышленных зданий, складских помещений и т.д.). При этом стандартные модули могут размещаться с элементами художественной обработки фасадов – беспорядочно или в каком-либо порядке, придавая фасадам пластическую насыщенность, вертикальное или горизонтальное членение и т.п. Иногда модули располагают по фасадам «складками», что придает фасадам подобие пластического решения и одновременно повышает эффективность работы модулей за счет их различной ориентации [22, 27, 28].

BIPV имеют более тесную термодинамическую связь с фасадами, поскольку либо выполняют функции ограждающих конструкций, либо навешиваются на них с минимальным зазором, не обеспечивающим турбулентный теплообмен фотопанелей с окружающим воздухом. В результате большая часть поглощаемого фотопанелями тепла передается фасадным конструкциям и проникает во внутреннюю среду зданий, увеличивая тепловую нагрузку. Одновременно с этим часть тепла излучается в открытое пространство, нагревая прилегающие к зданиям территории и фасады окружающей застройки.

Для архитектурных решений уровня интеграции BIPV производители применяют современные технологии, позволяющие выпускать высоко художественные решения ФЭУ, используя различную фактуру и цвет поверхности фотопанелей, варьируя их формой и размерами (рис. 5). Несмотря на то, что часто это приводит к снижению эффективности ФЭУ, такие решения позволяют создавать более интересные и выразительные архитектурные решения и учитывать при размещении BIPV-фасадов архитектурно-стилистические особенности окружающей застройки.



Рис. 5. Здание на набережной Вальми 179, Париж (Франция): семиэтажный фасад, покрытый 130 индивидуальными изумрудно-зелеными фотоэлектрическими панелями площадью 173,6 м². Архитекторы Emmanuel Saadi и Jean-Louis Rey, 2011 (по [1])

Но в любом случае, количество солнечной радиации, поглощенной элементами застройки, увеличивается, поскольку поглощающая способность ФЭУ намного выше, чем поглощающая способность традиционных отделочных материалов, применяемых на фасадах. Следовательно, увеличивается и тепловая нагрузка на застройку. Если для стран с прохладным влажным климатом (Скандинавия, штат Аляска, север Канады) это обстоятельство является благоприятным фактором, то для стран с умеренным континентальным климатом – Западная, Центральная и Восточная Европа, центральные и южные районы России, Центральная и Южная Сибирь, Средняя Азия – где в течение всего года или в летние месяцы преобладает теплая и жаркая солнечная погода, и более южных стран с субтропическим и тропическим типами климата этот фактор является крайне неблагоприятным, поскольку увеличение тепловой нагрузки снижает биоклиматическую комфортность городской среды и увеличивает тепловую нагрузку на внутреннюю среду зданий, требуя увеличения затрат электроэнергии на их вентиляцию и кондиционирование. Для городской среды в целом это приводит к усилению эффекта «городского острова тепла» за счет наложения на него «фотоэлектрического острова тепла», о чем говорилось выше.

Фотоэлементы для светопроемов и светопрозрачных конструкций

В современной международной архитектуре в зданиях самого различного назначения – от жилого до производственного – широко применяются навесные фасады со сплошным витражным остеклением, панорамное остекление, а для некоторых типов зданий – большепролетные светопрозрачные перекрытия (стадионы, атриумные общественные пространства, вокзалы и аэропорты и т.д.). Эти светопрозрачные поверхности и конструкции также активно используются для размещения фотоэлементов на уровне BIPV [1] (рис. 6).



Рис. 6. ФЭУ в составе светопрозрачных элементов фасадов и покрытий зданий

Производители фотоэлементов уже сейчас готовы предложить широкий выбор решений по интеграции фотоэлементов в ограждающие светопрозрачные конструкции [16]. В основе всех светопрозрачных фотоэлементов лежит один и тот же принцип – перфорация кремниевого слоя. Эта перфорация может выполняться лазером путем рассеечения полимерного слоя с поликристаллическим (аморфным) кремнием, служащим активным элементом ФЭУ. При рассечении этот слой может делиться на микроскопической ширины полоски или ячейки, так что генерирующая часть фотопанели состоит из прозрачных и непрозрачных участков с различным соотношением их площади и «прозрачна» лишь

условно, хотя на самом деле их точнее было бы назвать «светопропускающими». За счет перфорации снижается эффективность генерации фотоэлементов. Для большинства «прозрачных» фотоэлементов эффективность составляет 6–8%.

Этот прием предоставляет возможности для творческого поиска в области образно-стилистического решения светопрозрачных частей фасадов (рис. 7). Например, если рассеивание кремниевого слоя производится линейно, то эти линии могут иметь переменную ширину и различное направление, что придает фотоэлементу зрительный объем и направленность. Полимерный слой таких фотоэлементов может содержать различные пигменты, за счет чего остекление становится не только полупрозрачным, но и полихромным, что также добавляет фасаду выразительности как изнутри, так и снаружи [16].

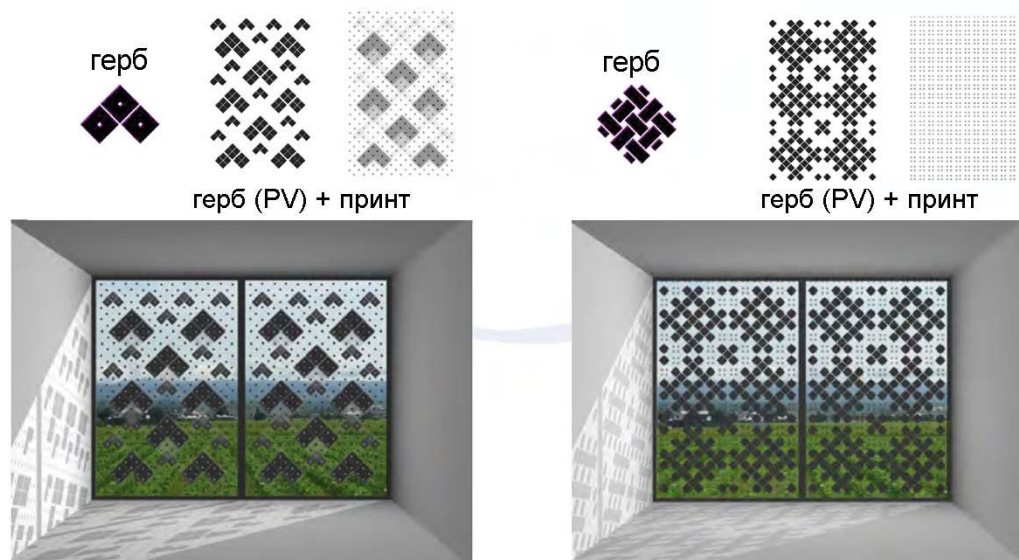


Рис. 7. Пример дизайна полупрозрачного фотоэлемента в этническом стиле: полимерная пленка с нанесенными японскими фамильными гербами из поликристаллического кремния и серым принтом на полимерной основе. Ламинированное оконное стекло (по [28])

Однако использование светопрозрачных конструкций зданий с нанесенными на них фотоэлементами связано с целым рядом конструктивно-технических проблем и ограничений, вызванных возможностью неравномерной температурной деформации прозрачных (без фотоэлементов) и условно «прозрачных» (с нанесенными пленочными фотоэлементами) частей этих конструкций. Поскольку фотоэлементы поглощают больше солнечного света и тепла, чем прозрачное стекло, они нагреваются намного сильнее, и стекло в месте их размещения расширяется, что вызывает в нем внутреннее напряжение, которое может приводить к деформации и даже разрушению листового стекла [17]. Для крупноформатного стекла также опасны случаи частичного затенения листа с ФЭУ, что также приводит к неравномерному нагреву фотоэлектрической части остекления и ее температурной деформации. С этим связано ограничение размера ячеек такого «фотоактивного» остекления. Это, в свою очередь, вызывает необходимость применения переплетов с более мелкими ячейками, что приводит к утяжелению и удорожанию всей светопрозрачной конструкции (фасада, перекрытия).

При заполнении ФЭУ светопроемов жилых и общественных зданий возникает ещё одна проблема, связанная с более активным поглощением солнечной радиации фотоэлементами. Она также заключается в их сильном нагревании на солнце. Нагретые стекла начинают излучать тепловую (длинноволновую) радиацию как наружу, так и внутрь помещений, вызывая их перегрев. Это приводит к необходимости применения двойного

стеклопакета, где внутреннее остекление выполняется из низкоэмиссионного стекла, задерживающего длинноволновое излучение. В результате помещение нагревается меньше, а внешний слой остекления, ламинированный фотоэлектрической пленкой – больше, что приводит к дополнительному повышенному нагреванию и снижению эффективности фотоэлементов, которая зависит от их температуры (с повышением температуры эффективность ФЭУ понижается).

Еще одна проблема заключается в отсутствии возможности использования солнцезащитных устройств, которые в обычных условиях для защиты от перегрева размещаются на внешней стороне фасадов. В случае с ФЭУ этот способ регулирования количества проникающего солнечного света и, соответственно, тепла внутрь помещений применять нельзя, т.к. при этом будут затеняться и сами ФЭУ на светопрозрачных элементах, что приведет к снижению их и без того низкой эффективности. Поэтому солнцезащитные устройства для светопроемов применяются внутри помещений. Но из-за попадающего на них солнечного излучения они нагреваются сами и нагревают внутреннюю среду защищаемых от избыточной солнечной радиации помещений, в результате чего увеличивается нагрузка на их вентиляцию и кондиционирование.

Все перечисленные проблемы интеграции фотоэлементов в светопрозрачные элементы фасадов приводят к усложнению и удорожанию фасадных конструкций при том, что «урожай» электроэнергии с таких фасадов получается намного ниже, чем от обычных ФЭУ, «добавленных» к фасадам в виде навесных фотопанелей.

Радиационно-тепловое воздействие. Остров тепла

Возвращаясь к основной теме статьи, следует отметить, что самым заметным и обсуждаемым климатическим событием XX–XXI веков является глобальное потепление. Начавшись еще в XIX столетии, пройдя ряд периодических флуктуаций, включая паузу середины 1990-х – начала 2000-х, оно определяет все важнейшие климатические и природные черты, особенно на территории России, где потепление происходит примерно в 2,5 раза интенсивнее, чем в среднем по земному шару [29]. Урбанизация усиливает это явление, причем, главным образом, начиная с XXI века [30, 31, 32], а ее вклад в изменение глобальной температуры оценивается в 3-4% [14] при том, что в настоящее время все города мира занимают не более 0.3% поверхности земли (1% площади суши). Эти факторы, действуя совместно, могут приводить к катастрофическим последствиям, в первую очередь проявляющимся в «волнах жары» в крупных городах, создавая крайне дискомфортные и даже опасные для здоровья условия городской среды.

Одним из основных факторов, снижающих биоклиматическую комфортность урбанизированных территорий за счет усиления ощущения перегрева людей на территории городов умеренного и более теплых типов климата в летнее время является «городской остров тепла» (UHI). Это явление заключается в повышении температуры воздуха по сравнению с прилегающей к городу сельской местностью и является следствием целого комплекса причин: загрязнения воздуха, меняющего его оптические свойства; изменения теплофизических свойств городской застройки, таких как альbedo, теплоемкость, теплопроводность, параметр шероховатости¹⁷; замены естественных поверхностей искусственными, блокирующими поступление почвенной влаги и не испаряющими сами, а также затруднения конвективного воздухо- и теплообмена между приземным слоем и более прохладными вышележащими слоями атмосферы за счет самой застройки. Все это вызывает значительные изменения радиационно-теплового баланса городов и в итоге приводит к росту температуры. При этом в разные сезоны года на первый план выходят разные причины образования UHI. Как было показано в [33, 34], в зимнее время тепловая аномалия на 90% связана с эмиссией техногенного тепла в

¹⁷ Параметр шероховатости – характеристика неровностей подстилающей поверхности, влияющих на движение воздуха в приземном слое; на уровне шероховатости средняя скорость ветра обращается в ноль.

окружающее пространство, в то время как летом более чем наполовину она формируется за счет преобразования физических свойств поверхности: 23% приходится на увеличение поглощенной радиации за счет уменьшения альбедо и около 35% – на уменьшение затрат тепла на испарение.

Особенности проявления острова тепла в Московском регионе были подробно рассмотрены в целом ряде работ [35, 36, 34, 32, 37 и др.]. Суммируя их результаты, можно констатировать, что в настоящее время максимальная среднегодовая интенсивность острова тепла в Москве ($\Delta T_{\text{макс}}$), рассчитанная как разность температур между центром города (ст. Балчуг) и Подмосковьем (величиной, осредненной по 13 станциям) достигает $2,2^{\circ}\text{C}$ [37]. Если же для характеристики теплового режима Москвы использовать не только метеостанцию Балчуг, но и другие метеостанции, в основном расположенные на ее окраинах, то интенсивность такого осредненного по площади острова тепла ($\Delta T_{\text{ср}}$) составит $1,2^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что это превосходит эффекты UHI большинства крупнейших городов мира [32].

Характерной особенностью острова тепла является его изменчивость: внутригодовая и внутрисуточная; кроме того, наилучшим образом UHI проявляется в ясную, безветренную погоду, что соответствует антициклоническим условиям погоды. В настоящее время интенсивность острова тепла в Москве летом больше, чем зимой, хотя так было и не всегда. Согласно [32], в период 1977–1988 годы зимой UHI проявлялся более ярко, а при осреднении за более продолжительный период (1950–1989 гг.) интенсивность UHI и летом, и зимой была примерно одинакова. Размах колебаний среднемесячных значений UHI может достигать существенных величин, например, в 2018 году он составил $1,9^{\circ}$ для $\Delta T_{\text{макс}}$ (от $3,3^{\circ}$ в августе до $1,4^{\circ}$ в январе) и $0,8^{\circ}$ (от $1,6^{\circ}$ до $0,8^{\circ}$ соответственно) для $\Delta T_{\text{ср}}$ [37]. В суточном ходе максимальная интенсивность острова тепла в Москве, как и в подавляющем большинстве городов, наблюдается в ночные и предрассветные часы, минимальная – днем. Так, согласно [32], в среднем за 10-летний период с 2007 по 2016 год летом $\Delta T_{\text{макс}}$ изменялась от 4° ночью до 1° днем, в то время как зимой размах колебаний уменьшается в 3 раза и составляет 1° , причем за счет уменьшения максимальной величины UHI в суточном ходе. Характерные экстремальные значения интенсивности острова тепла также наблюдаются в ночные часы, летом, и для современного периода приближаются к 10°C [32], а в отдельных случаях могут достигать $\sim 14^{\circ}\text{C}$ [35].

Столь сильное изменение температуры не может не иметь экологических и биоклиматических последствий, как прямых, так и косвенных. Некоторые из них имеют положительный характер, например, сокращение расхода топлива в холодный сезон, или «смещение» местоположения города по своим климатическим характеристикам в южном направлении, оцениваемое для Москвы в 300–400 км [34]. Это дает возможность интродуцирования в городе древесных и кустарниковых пород, характерных для более южных широт, многие из которых являются более устойчивыми к загрязнению воздуха. Однако наряду с благоприятными эффектами у UHI существует и большое количество отрицательных последствий. Так, например, летом добавочное нагревание атмосферы городов приводит к дополнительному расходу энергии на кондиционирование воздуха, причем в странах, расположенных в теплых климатах, этот дополнительный расход превышает тот выигрыш, который возникает во время отопительного периода. В свою очередь, это ведет к еще большему усилению острова тепла из-за удаления теплого воздуха из помещений наружу, в городскую среду. Еще одно косвенное отрицательное воздействие острова тепла на экологическую ситуацию Москвы состоит в увеличении количества дней с оттепелями, что создает проблемы хозяйственным и дорожно-эксплуатационным службам города и негативно сказывается на зеленых насаждениях. При оттепелях происходит полный или частичный сход снежного покрова с территорий, под которыми проходят теплотрассы, линии метрополитена неглубокого заложения, другие инженерные коммуникации. В результате обнажается зимующая под снегом растительность, которая повреждается следующими за оттепелями возвратами холодов [34]. Частые изменения знака температуры способствуют образованию гололеда и

наледы, поэтому после оттепелей городские службы вынуждены увеличивать расход антигололедных реагентов, в результате чего происходит засоление почв на примыкающих территориях, угнетаются зеленые насаждения. Гидроаэрозоль, поднимающийся с поверхности улиц и содержащий антигололедные реагенты, раздражает слизистые оболочки глаз и верхних дыхательных путей жителей. Помимо этого, ледяная корка наносит механические повреждения конструкциям зданий – кровлям, карнизам, декору фасадов. Образуюсь на поверхности рельефа, она способствует вымерзанию, изреживанию и гибели растений из-за недостатка кислорода и избытка углекислого газа под ней.

Весной, за счет более быстрого роста температуры в городе, вегетационный период начинается значительно раньше, чем в пригородах, однако в случае сильных заморозков преждевременно раскрывшиеся листья и цветы могут погибнуть. Еще большее отрицательное воздействие остров тепла оказывает в летний период года, влияя на комфортность городской среды, особенно в периоды, характеризующиеся жаркой погодой – т.н. «волны жары». Усугубление и без того дискомфортных условий в это время приводит к сильному напряжению физиологических механизмов терморегуляции организма, что повышает риск заболеваемости и смертности, как это наблюдалось, например, летом 2010 года [41].

Повышение температуры воздуха – наиболее наглядное, но не единственное проявление влияния урбанизации на метеорологический режим. Так, вследствие образования UHI и изменения шероховатости поверхности в городах в значительной степени изменяется поле ветра. Хотя в среднем максимальные скорости снижаются по сравнению с пригородными территориями, в отдельных случаях вдоль застроенных сплошным фронтом городских «каньонов» они могут достигать штормовых значений. Это усугубляется и тем, что за счет острова тепла в городе возникает своя собственная мезомасштабная циркуляция, развивающаяся по циклоническому типу. Эта циркуляция формирует поле ветра со скоростями до 2-3 м/с, направленное в приземном слое воздуха из пригорода к центру города. В результате в ночные часы, при максимальном развитии острова тепла, скорости ветра в городе могут существенно увеличиваться. Поскольку изотермы на территории города расположены не симметрично, сгущаясь у края плотно застроенной зоны, возникает ситуация, аналогичная прохождению холодного фронта, в результате чего могут наблюдаться резкие пульсации более холодного, притекающего с окраин воздуха, сопровождающиеся сильными порывами ветра.

Подобная трансформация поля ветра в городах также имеет свои экологические последствия: ввиду пониженной устойчивости городской растительности к механическим воздействиям, ущерб от сильных порывистых ветров увеличивается. Особенно ярко это проявляется в летний период в связи с усилением в городах мощной кучевой облачности (что также является следствием острова тепла) – основной причины сильных порывов ветра. Как результат – за последние годы в Москве не раз наблюдались ветровалы при шквалистых ветрах. Например, в ночь с 20 по 21 июня 1998 года на фоне сильной жары, усугубленной московским островом тепла, штормовым ветром за несколько часов было повалено более 48 тыс. деревьев, повреждено 2157 жилых строений, погибло 11 человек и около 200 получило ранения. 24 июля 2001 года в результате аналогичного явления погибло 5 человек, было повалено 14,5 тыс. деревьев. Но самое сильное за последние 100 лет стихийное бедствие произошло в Москве 29 мая 2017 года, когда в результате сильнейшего шторма с порывами до 30 м/с погибло 18 человек, около 170 получило ранения, было сломано и повалено более 27 тыс. деревьев.

Итак, учитывая, что интенсивность UHI вне зависимости от наличия пауз в глобальном потеплении постоянно увеличивается, а его существование сопровождается целым рядом неблагоприятных экологических и биоклиматических последствий, представляется чрезвычайно важным количественно оценить то, как массовое внедрение ФЭУ при их непосредственной интеграции в архитектурную среду повлияет на городской остров тепла. Не будет ли негативный эффект от усиления городского острова тепла полностью

перечеркивать все преимущества возобновляемой энергетики в городе, расположенном в умеренном континентальном климате?

Моделирование ситуации

Количественная оценка воздействия массового применения ФЭУ на микроклимат застройки и УНІ для природно-климатических условий Москвы выполнялась с использованием программного комплекса ENVI-met (v 4.4), включающего вихреразрешающую негидростатическую аэродинамическую CFD-модель¹⁸, описывающую физические процессы мезо- и микромасштабной циркуляции воздуха с учетом его молекулярного, конвективного и радиационного теплообмена со зданиями и подстилающей поверхностью. Основное достоинство модели состоит в том, что в нее включен расчетный модуль, учитывающий влияние солнечной радиации на тепловой баланс территории и зданий и теплофизических характеристик конструктивных элементов зданий и грунтов. Такого типа модели называются «дневными» и дают более точное описание мезо- и микроклиматических процессов, чем модели, не учитывающие инсоляцию (т.н. «ночные» модели) [38]. Программная реализация математического аппарата модели ENVI-met, основанного на конечно-разностной схеме решения системы уравнений Навье-Стокса, выполнена специалистами Географического института Рурского университета (г. Бохум, Германия).

В качестве начальных условий приняты климатические характеристики июля по срокам наблюдений согласно справочнику [39]. Из этого справочника для отдельных сроков наблюдений брались начальные для периода моделирования значения температуры и влажности воздуха и температуры верхних слоев почвогрунтов по данным наблюдений метеорологической обсерватории МГУ (рис. 8). Следует отметить, что эта обсерватория расположена на открытой, хорошо озелененной территории на западе Москвы, поэтому ее наблюдения можно принять в качестве «фоновых» для городской застройки при ветрах западного направления. Для всего периода моделирования принимался западный ветер со скоростью 1.0 м/с.

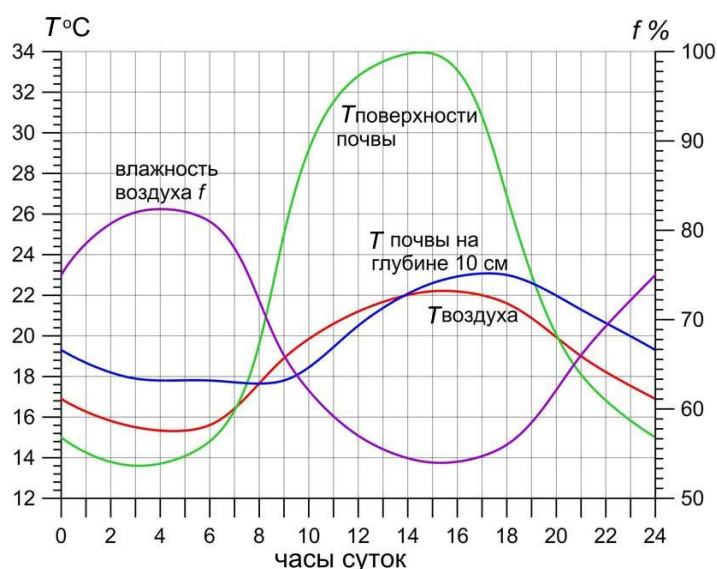


Рис. 8. Суточный ход климатических характеристик июля по наблюдениям метеорологической обсерватории МГУ (по [39])

За начало моделируемого периода принято время 00 часов по солнечному времени 14 июля (00:36 МСК 15 июля). Продолжительность моделируемого периода составила

¹⁸ CFD – Computational Fluid Dynamic.

72 часа, до 23 ч. 59 мин. 16 июля. Исходя из целей и задач моделирования принималось, что фиксация результатов моделирования микроклиматических параметров расчетной области застройки производилась с интервалом 1 час. Для каждого последующего часа модельного времени эти параметры принимались в качестве начальных условий, за исключением температурно-влажностных характеристик входящего с запада в застройку воздушного потока, которые для каждого часа суток принимались в соответствии с результатами наблюдений по [39], как указано выше.

Моделируемая область (граничные условия) принималась размером 500×500 м. Предполагалось, что на этой территории размещена контрастная (14-22-эт.) среднеплотная (ок. 7 тыс. м²/га, средняя высота зданий более 35 м) застройка (рис. 9), коэффициент застроенности – 12.5%. Такой тип характерен для районов Москвы периода 2000-х годов застройки, когда шла активная реконструкция районов 5-этажной застройки и застройка присоединенных территорий (Кожухово, Жулебино, Бутово, Куркино, Митино и др.).

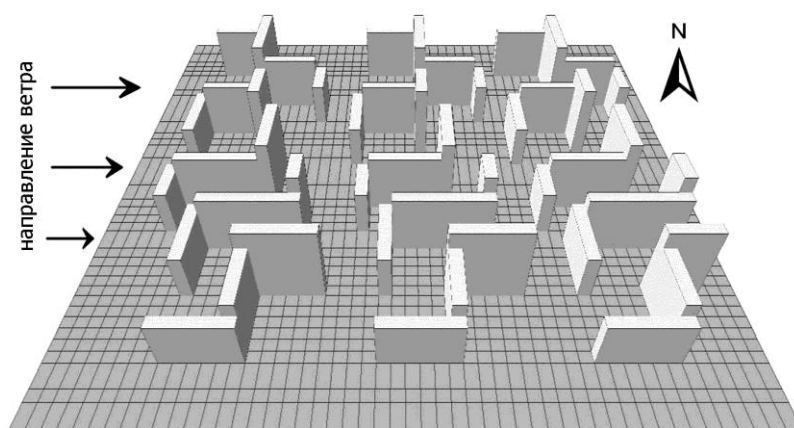


Рис. 9. Общий вид моделируемой территории

Для определения воздействия ФЭУ на микроклимат застройки было выполнено два варианта моделирования: «нулевой», т.е. теплофизические свойства застройки принимались такими, какие они есть в реальных условиях), и вариант, в котором на фасадах и кровлях зданий были размещены ФЭУ, интегрированные со строительными конструкциями.

В первом «нулевом» варианте расчета отражающая способность фасадов определялась исходя из преобладающего цвета и фактуры отделки фасадов согласно характеристикам соответствующих материалов¹⁹ с учетом площади остекления 30% от всей площади фасадов. Средневзвешенный коэффициент отражения оконных проемов с учетом оконных переплетов принимался равным 0.2²⁰. Альбедо фасадов рассчитывалось как:

$$A_{\text{фас}} = 0.7 \times \rho_{\text{отд}} + 0.3 \times \rho_{\text{окн}} = 0.7 \times 0.7 + 0.3 \times 0.2 = 0.55,$$

где 0.7 – относительная площадь непрозрачных ограждающих конструкций фасадов, 0.3 – относительная площадь светопроемов, $\rho_{\text{отд}}$ – коэффициент отражения отделочного материала фасада; $\rho_{\text{окн}}$ – средневзвешенный коэффициент отражения оконных проемов.

¹⁹ Светлота и отражательная способность принимались согласно СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* и МГСН 2.06-99 «Естественное, искусственное и совмещенное освещение».

²⁰ МГСН 2.06-99, стр. 87.

Альbedo территории застройки принималось как средневзвешенное альbedo внутренней части микрорайонов с учетом среднего баланса их территории при нормативной обеспеченности территориями зеленых насаждений в соответствии с градостроительными нормами («Нормы и правила проектирования планировки и застройки Москвы», МГСН 1.01-99), ориентировочный баланс территории жилой застройки составляет:

- заасфальтированные поверхности – 30%,
 - участки с открытым грунтом – 10%,
 - площадки и дорожки с щебеночно-гравийным покрытием – 10%,
 - зеленые насаждения – 50%,
- в том числе деревья 20%, кустарники – 10%, газоны, цветники – 20%.

Таким образом, средневзвешенное альbedo единицы площади территории жилой застройки в пределах линии застройки жилого квартала в летнее время можно рассчитать как:

$$A_{\text{ср}} = 0.3 \times A_{\text{асф}} + 0.1 \times A_{\text{грунт}} + 0.1 \times A_{\text{щеб}} + 0.2 \times A_{\text{трав}} + 0.3 \times A_{\text{др-куст.}}$$

С учетом этих соотношений получаем:

$$A_{\text{ср}} = 0.3 \times 0.2 + 0.1 \times 0.3 + 0.1 \times 0.25 + 0.2 \times 0.22 + 0.3 \times 0.20 = 0.197 \approx 0.2.$$

Это значение применялось для всей территории, свободной от зданий. Отдельно участки с различным типом покрытий (асфальт, газоны и т.д.) в моделируемой области не выделялись, чтобы связанные с ними локальные изменения микроклиматических параметров не отвлекали внимание от результатов, связанных с воздействием ФЭУ на микроклимат и биоклиматическую комфортность территории застройки.

Во втором варианте альbedo фасадов и кровель зданий принималось с учетом интеграции в них ФЭУ, которое по оценкам, приведенным в [4, 24], составляет 10–15%. В связи с исключениями и ограничениями применения фотоэлементов на фасадах, о которых говорилось выше, ФЭУ в моделируемой застройке занимали 2/3 площади неостекленной части фасадов зданий. Также свободной от ФЭУ была оставлена нижняя треть фасадов по высоте т.к. эта часть фасадов затеняется растительностью, окружающими зданиями и сильно загрязняется, а также полностью – северные фасады.

Предполагалось также, что ФЭУ занимают 50% площади кровель зданий и располагаются горизонтально. Большую долю они занимать не могут по техническим причинам (например – из-за технологических надстроек на кровлях, необходимости устройства проходов и т.п.). Вариант наклонной установки панелей не рассматривался, т.к. при этом за счет панелей, расположенных по краю кровли, увеличиваются видимые габариты зданий, а, следовательно, и отбрасываемые ими тени. Это может привести к нарушению норм КЕО и инсоляции в соседних жилых домах. Кроме того, в летнее время разница в солнечной энергии, получаемой горизонтальными и наклонными в южную часть горизонта (но не вертикальными!) ФЭУ невелика.

Показатели биоклиматической комфортности. Индекс PMV

К настоящему времени разработано более 100 индексов, характеризующих биоклиматический комфорт человека в различных тепловых средах. Цель этих индексов – оценить через какой-либо единый показатель эффект совокупного одновременного воздействия на организм человека всех параметров микроклимата. Как правило, это воздействие выражается в виде условной температуры, влияние которой на человека эквивалентно действию всех микроклиматических параметров, определяющих его тепловое состояние. В настоящее время в научно-исследовательских целях наиболее широко используется универсальный индекс теплового комфорта (Universal Thermal Climate Index, UTCI) [42], значение которого имеет хорошую корреляцию с показателями

здоровья населения в широком диапазоне погодных условий, наблюдающихся в умеренном континентальном климате [43].

В то же время в практике проектной подготовки строительства использование каких-либо величин и показателей регламентируется утверждёнными в установленном порядке нормативно-методическими документами. Так, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11399–2007 «Эргономика тепловой окружающей среды. Принципы и применение признанных международных стандартов», для сред с повышенной тепловой нагрузкой на организм человека следует применять показатель WBGT (wet bulb globe temperature)²¹. В условиях, вызывающих холодовой стресс, на основе оценки теплопотерь организма определяется требуемая теплоизоляция одежды (IREQ) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11079–2015²².

Для условий умеренной термальной среды, к которой относится данное исследование, применяется стандарт ГОСТ Р ИСО 7730–2009 «Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта». Индекс биоклиматической комфортности PMV (predicted mean vote) учитывает те же параметры, что и индекс UTCI: температуру и влажность воздуха, радиационную температуру; скорость движения воздуха относительно человека; степень теплоизоляции одежды и степень его физической активности (размер выделяемого метаболического тепла). Он широко применяется в международной и отечественной практике в самых различных отраслях для комплексной интегральной оценки микроклиматических условий как внутренней среды зданий и сооружений различного функционального назначения, так и для оценки комфортности открытых городских пространств при различных типах погоды, вызывающих у человека тепловые ощущения в диапазоне от «холодно» до «жарко».

Аналитическое выражение показателя PMV имеет достаточно сложный вид и здесь не приводится. Расчет значения показателя PMV выполнялся самой программой ENVI-met на основании полученных программой значений микроклиматических параметров и задаваемых пользователями параметров физической активности и степени одетости (теплоизоляционных свойств одежды) людей. Результатом оценки микроклиматических условий является расчетное значение теплоощущения человека. Индекс PMV означает, что при определенном сочетании метеозадающих факторов, уровне физической активности и степени одетости большинство людей (более 90% респондентов) даст следующий ответ о своих теплоощущениях: >3 – невыносимо жарко; +3 – жарко; +2 – тепло; +1 – слегка тепло; 0 – комфортно (нейтрально); -1 – слегка прохладно; -2 – прохладно; -3 – холодно.

Поскольку основным «потребителем» открытых городских пространств в летнее время днём является взрослая, экономически активная часть населения, передвигающаяся по территории застройки пешком в режиме ежедневной трудовой и бытовой активности (на работу, к остановкам общественного транспорта, в учреждения торговли и культурно-бытового обслуживания и т.д.), при расчете показателя PMV физическая активность принималась на уровне 2.8 met (165 Вт/м², ходьба со скоростью 4 км/час), 1 clo (0.155°C×м²/Вт, легкий летний костюм). Остальные категории населения – пожилые люди и дети – летом могут или уехать из города, или избегать пребывания на открытых пространствах, или уменьшить степень одетости (шорты и майка с коротким рукавом) если погода становится слишком жаркой.

Отметим, что пользуясь программой ENVI-met и учитывая различные виды функционального назначения участков городской территории (площадки отдыха, спорта,

²¹ ГОСТ Р ИСО 7243–2007 «Термальная среда. Расчет тепловой нагрузки на работающего человека, основанный на показателе WBGT (температура влажного шарика психрометра)».

²² ГОСТ Р ИСО 11079–2015. «Эргономика термальной среды. Определение холодового стресса и его интерпретация на основе показателей требуемой термоизоляции одежды и локального охлаждающего воздействия».

детские и т.д.), степень физической активности и одетости людей можно более детально и качественно выполнять функциональное зонирование территории застройки и более грамотно размещать на ней различные участки благоустройства.

Анализ результатов расчета

В соответствии с выбранными параметрами начальных и граничных условий с помощью программы ENVI-met (v 4.4) были рассчитаны микроклиматические параметры застройки за трое суток с временной дискретностью сохранения результатов 1 час. Программа способна рассчитать более 30 параметров состояния приземного слоя атмосферы, в том числе необходимые для расчета параметры скорости ветра, влажности воздуха, температуры воздуха и радиационной температуры, определяемой температурой окружающих расчетные точки поверхностей. Результаты расчетов температуры воздуха и радиационной температуры в приземном слое в их трехдневной динамике для двух вариантов расчета – обычная застройка и застройка с интегрированными ФЭУ – представлены на рис. 10. Результаты расчетов по двум другим параметрам микроклимата, определяющим биоклиматическую комфортность – скорости ветра и влажности воздуха – на рисунках не представлены, т.к. скорости ветра в обоих вариантах практически идентичны, а влажность воздуха имеет ход, почти в точности обратный ходу температуры воздуха в обоих вариантах, т.к. парциальное давление водяного пара на «входе» воздуха в застройку было одинаковым и не успевало существенно измениться в пределах расчетного прямоугольника.

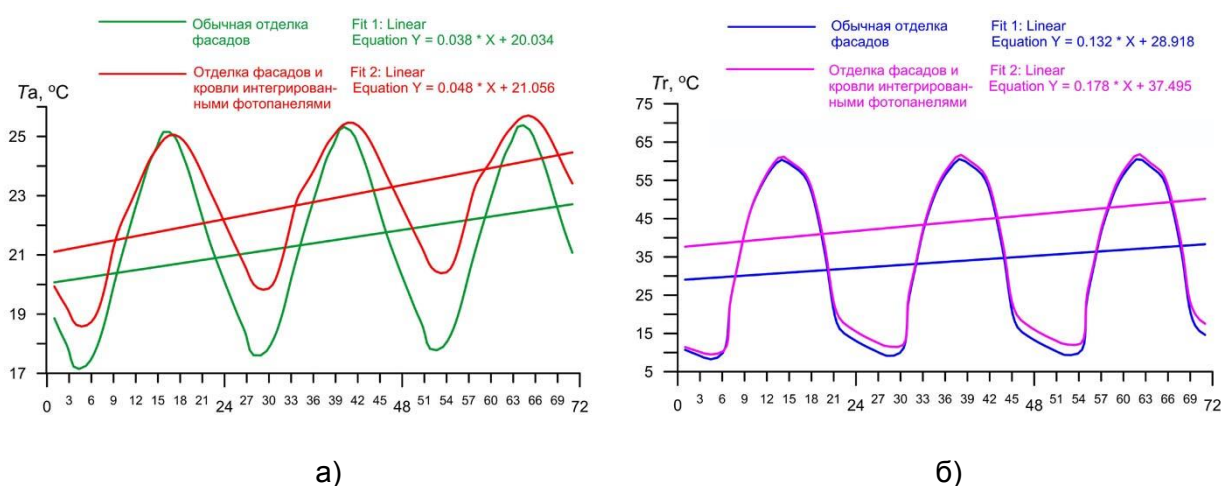


Рис. 10. Изменение температуры в приземном слое в течение моделируемого периода: а) осредненная по территории застройки температура воздуха; б) то же, радиационная температура

Как видно из рис. 10, различия в значении обеих температур с каждым моделируемым сутками увеличиваются. В первые сутки температура воздуха в разных вариантах застройки отличается мало, причем в обычной застройке в допуденные часы первых суток она даже немного выше (рис. 10а). Это связано с тем, что ФЭУ, расположенные на фасадах, поглощают больше солнечной радиации, чем обычные фасады. За счет этого снижается количество солнечной радиации, отражаемой фасадами на рельеф, вследствие чего он нагревается меньше, и температура в приземном слое растет медленнее.

Превышение температуры воздуха в варианте с ФЭУ над вариантом расчета с обычной застройкой на третьи сутки составляет уже около 0,5–0,7°C днем и 1,9–2,2°C ночью (рис. 11). Эта закономерность, обусловленная более интенсивным нагревом застройки с ФЭУ за счет большего количества поглощаемой солнечной радиации, хорошо читается и в уравнениях линейной аппроксимации температуры, приведенных на рис. 10. Используя

эти уравнения и предполагая, что линейный характер изменения температуры во времени будет сохраняться, через 5 суток перегрев приземного воздуха в застройке с ФЭУ по сравнению с обычной застройкой в среднем за день может составить около $2,5^{\circ}\text{C}$.

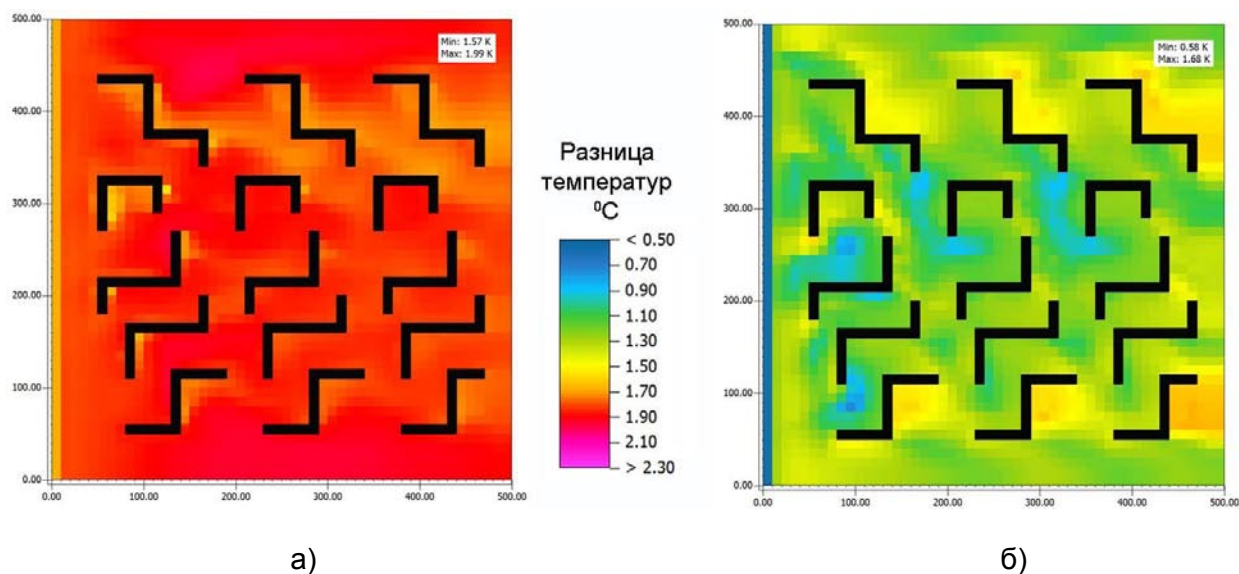


Рис. 11. Приращение температуры воздуха в приземном слое: за счет ФЭУ а) в 05 часов; б) в 12 часов

Аналогичная тенденция установлена и для радиационной температуры в приземном слое (рис. 10б). Наибольшие различия T_r между вариантами застройки достигаются в утренние часы перед восходом солнца и могут достигать $2,5\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$. В околополуденные часы на третьи сутки моделирования различия T_r составят $1,2\text{--}1,7^{\circ}\text{C}$. Это говорит о том, что интегрированные с ФЭУ фасады днём активно накапливают тепло, которое не успевает удаляться из них за ночь. Вследствие этого, в варианте застройки с ФЭУ внутренняя среда зданий будет подвергаться более устойчивому во времени и более интенсивному перегреву по сравнению с обычной застройкой. Поэтому даже в ночные часы внутри помещений будет сохраняться ощущение жары, и в этой ситуации очень важно обеспечить жилые помещения сквозным или угловым проветриванием.

Линейная аппроксимация зависимости радиационной температуры от прошедшего времени аналогична зависимости от времени температуры воздуха, но показывает более интенсивный рост T_r . В первые сутки различия T_r невелики, но уже на третьи сутки радиационная температура в застройке с ФЭУ ночью на $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$, а днём – на $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ превышает T_r в обычной застройке (рис. 12), а через пять суток это различие может превысить $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$, что не может не сказаться на радиационно-тепловом режиме и биоклиматической комфортности территории застройки и внутренней среды зданий.

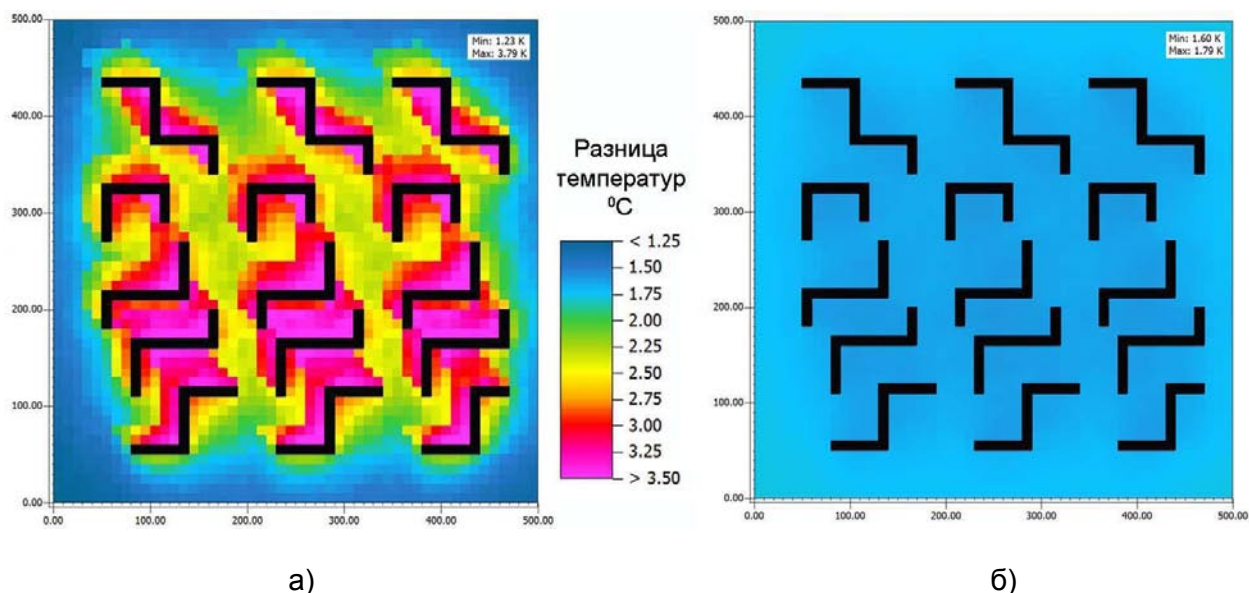


Рис. 12. Приращение радиационной температуры в приземном слое за счет ФЭУ:
а) в 05 часов; б) в 12 часов

Следует отметить, что полученные закономерности суточного хода температуры для различных условий хорошо совпадают с данными инструментальных наблюдений, представленными в [6], что говорит о высокой степени достоверности воспроизводимых программой ENVI-met механизмов формирования микроклиматических условий, связанных с переносом и поглощением коротковолновой и длинноволновой радиации в застройке.

Далее на основании расчетных значений микроклиматических параметров застройки с помощью дополнительного модуля программы «Biomet» были рассчитаны значения параметра биоклиматической комфортности PMV в приземном слое застройки на третьи сутки моделируемого периода, когда за счет «накопления» эффекта перегрева застройки с ФЭУ различия микроклиматических параметров и показателя PMV стали достаточно очевидными. Расчет для более длительного промежутка времени не производился из-за высоких требований программы к вычислительным ресурсам. Но даже полученных значений оказалось достаточно для того, чтобы можно было сделать вполне определенные выводы о характере воздействия ФЭУ на микроклимат и комфортность территории застройки и дать количественную оценку этого воздействия.

В связи с нелинейностью процессов микро- и мезомасштабной циркуляции и переноса тепла в явном виде и за счет радиационного излучения, полученные результаты невозможно масштабировать на всю траекторию движения частиц воздуха по территории города. Нелинейность процесса усиления эффекта «острова тепла» по мере движения воздуха от пригородов вглубь застройки к центру связана с тем, что интенсивность турбулентного обмена воздуха и, соответственно, тепла между территорией застройки и вышележащими слоями воздуха пропорциональна квадрату скорости движения воздуха, а интенсивность теплоотдачи зданий и рельефа за счет их теплового излучения пропорциональна четвертой степени их абсолютной температуры²³.

Для определения параметров масштабирования процессов повышения температуры городской среды и усиления ее биоклиматического дискомфорта был выполнен дополнительный диагностический расчет для участка застройки размером 5×5 км и

²³ Интенсивность теплового излучения E по закону Стефана-Больцмана составляет: $E = \epsilon \sigma T^4$, где ϵ – излучательная способность поверхности, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура излучающей поверхности (K).

интервала времени 10 суток, в течение которых задавались аналогичные первой серии расчетов антициклонические погодные условия. В этом расчете застройка задавалась соответствующей параметризацией шероховатости поверхности. В результате этого расчета получено, что с расстоянием приращение интенсивности теплового воздействия будет снижаться, принимая вид степенной функции. При 10-кратном увеличении расстояния (от 0,5 до 5 км) и увеличении продолжительности моделируемого периода в два раза (до шести суток) приращение температуры воздуха составит 1.5 раза, радиационной температуры – 1.3 раза. Таким образом, результаты изменения биоклиматической комфортности, полученные для первых 500 м, удвоятся и значение индекса PMV увеличится на отдельных участках территории застройки почти на одну единицу (рис. 13). Это означает, что там, где по ощущениям взрослого человека, одетого в легкий летний костюм, было «слегка тепло» ($PMV=1$) станет «тепло» ($PMV=2$); там, где было «тепло» станет «жарко» ($PMV=3$); там, где было «жарко» станет «невыносимо жарко» ($PMV>3$). Причем территория с условиями «жарко» и «невыносимо жарко» будет занимать почти половину площади застройки.

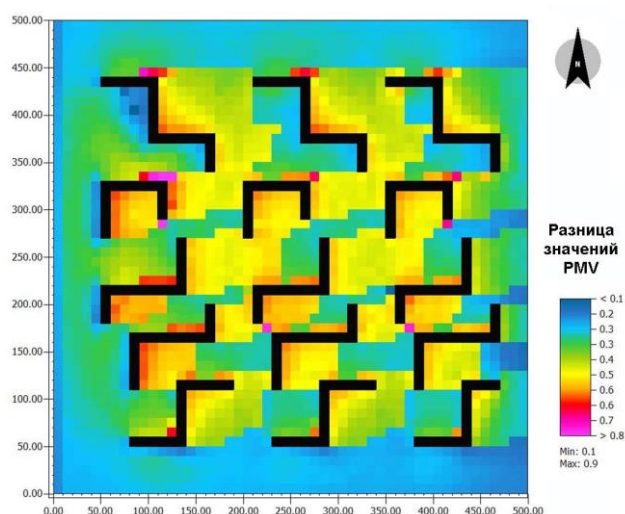


Рис. 13. Приращение значения индекса PMV в приземном слое за счет ФЭУ на расстоянии 5 км от границы застройки через 5 суток

Обращает на себя внимание то, что в наибольшей степени перегреваться будут участки застройки, расположенные во внутренних углах зданий, с подветренной стороны от них и примыкающие к южным фасадам. В меньшей степени перегрев почувствуется вблизи наветренных фасадов и в разрывах застройки, где будет происходить усиление скорости движения воздушного потока. Из этого можно сделать выводы, что перегреву будет способствовать нарушение циркуляции воздуха, мешающее турбулентному теплообмену между рельефом, фасадами и вышележащими слоями атмосферы, т.е. за счет повышения радиационной температуры, вызванной нагревом застройки за счет ФЭУ. В меньшей степени перегрев будет ощущаться на участках, обеспеченных хорошими условиями аэрации. Т.е. повышение температуры воздуха при достаточной скорости его движения будет менее значимым фактором снижения теплового комфорта, чем увеличение радиационной температуры при низкой скорости движения воздуха.

По мере приближения к центральным районам города коэффициент застроенности увеличивается, а высотная контрастность застройки уменьшается. За счет этого будет затрудняться конвекция, обеспечивающая воздухообмен приземного слоя воздуха с вышележащими слоями атмосферы. Поэтому на уровне рельефа можно ожидать ещё большего усиления биоклиматического дискомфорта в сторону перегревных условий. Почти повсеместно в центре города летом в солнечную погоду будет «жарко» и «невыносимо жарко», температура воздуха днем будет находиться на отметке 30–32°C, т.е. приблизительно равной средней температуре поверхности тела человека. При такой

температуре воздуха конвективная теплоотдача избыточного тепла от тела человека в окружающее пространство невозможна, поэтому организм будет вынужден пользоваться единственным оставшимся в таких условиях механизмом терморегуляции – испарением диффузной влаги с поверхности кожи. Однако возможности этого механизма терморегуляции очень ограничены и составляют в обычных условиях (состояние «комфортно» и «слегка тепло») не более 10% от всего теплообмена организма с окружающей средой. При этом возникает опасность обезвоживания организма, что будет требовать постоянного пополнения в нем воды. Но даже если в этих условиях обеспечить достаточное количество выпиваемой воды, в организме будет нарушаться водно-солевой баланс, что при длительной экспозиции к условиям перегрева также может привести к нарушению состояния здоровья, не говоря уже о физиологическом дискомфорте, связанном с постоянно повышенной влажностью кожных покровов. В результате человеку придется перемещаться по центральным районам города «мелкими перебежками» от одного кондиционируемого помещения к другому.

Выводы

Сказанное выше позволяет сделать следующие основные выводы, касающиеся теплового режима и биоклиматической комфортности урбанизированной среды в случае массового применения фотоэлектрических элементов в составе архитектурно-градостроительных объектов.

1. Технология преобразования солнечной энергии в электричество рассматривается как альтернативный источник энергии, который в будущем позволит значительно сократить выработку энергии за счет сжигания ископаемых углеводородов. Однако на современном уровне развития эта технология сопровождается большим количеством проблем как технико-экономического и социального, так и экологического характера. По ходу увеличения количества эксплуатируемых ФЭУ выявляются ранее не прогнозировавшиеся экологические последствия разного масштаба, требующие выработки соответствующих мер по их предотвращению.

2. Одной из таких ранее не предвиденных проблем является усиление городских островов тепла за счет уменьшения альбедо территорий размещения ФЭУ и, соответственно, увеличение количества поглощенной солнечной радиации, что является фундаментальным принципом работы ФЭУ. Однако вместе с этим происходит повышение температуры воздуха, нагреваемого от этих ФЭУ. Это повышение настолько хорошо выражено, что в международной научной лексике уже получило название «фотоэлектрический остров тепла».

3. Фотоэлектрические острова тепла возникают не только в местах размещения солнечных электростанций с большой площадью ФЭУ, но и в масштабе урбанизированных территорий или их частей, где ФЭУ интегрируются в состав архитектурно-градостроительных объектов. Такая тенденция особенно широко распространена в странах, где отсутствуют достаточно большие свободные территории, не вовлеченные в хозяйственный оборот (пустыни, полупустыни). Такие страны расположены, например, в Европе и Северной Америке, где именно наружные поверхности зданий и сооружений (кровли, фасады) рассматриваются как основной резерв для приращения площади фотоэлектрических мощностей.

4. Проведенные расчеты продемонстрировали, что массовое применение фотоэлектрических панелей, интегрированных в оболочку зданий, в природно-климатических условиях Москвы приведет почти к двукратному усилению «городского острова тепла» в теплое время года в условиях антициклонической погоды. В свою очередь это может способствовать увеличению повторяемости и интенсивности неблагоприятных погодных явлений, обусловленных усилением термической конвекции – развития мощной кучевой и кучево-дождевой облачности, вызывающей сильные порывистые ветры и осадки высокой интенсивности. Зимой усиление острова тепла

приведет к увеличению повторяемости перехода температуры через 0°C и связанных с этим гололедных явлений, представляющих опасность для передвижения транспорта, пешеходов, нарушающего вегетационные циклы зеленых насаждений и т.д.

5. Моделирование биоклиматической комфортности на участке застройки размером 5×5 км показало, что через 5 суток на расстоянии 5 км от границы застройки значение индекса PMV на отдельных участках увеличится почти на единицу. При этом территория с условиями «жарко» и «невыносимо жарко» будет занимать почти половину площади застройки. Таким образом, усиление острова тепла за счет ФЭУ в летнее время в условиях антициклонической погоды вызовет ухудшение биоклиматической комфортности урбанизированной территории и внутренней среды зданий в сторону перегрева до критических для человека значений. При этом из всех факторов, влияющих на тепловой комфорт, наибольший рост получен для радиационной температуры, которая на третьи сутки моделирования в застройке с ФЭУ ночью на 3–4°C, а днём – на 1–2°C превысила значения в обычной застройке.

6. Там, где высока повторяемость облачной погоды и на несколько месяцев образуется устойчивый снежный покров, т.е. в природно-климатических условиях, аналогичных московским, на территории России и за рубежом применение ФЭУ не эффективно с точки зрения затрат энергии на жизненный цикл этих ФЭУ по сравнению с вырабатываемой ими электроэнергией, а также не эффективно с экономической точки зрения – затрат на ФЭУ и их эксплуатацию по сравнению с получаемой экономической выгодой. Учитывая это и все экологические последствия, связанные с жизненным циклом ФЭУ, их массовое применение в умеренном климате в районах, обеспеченных централизованными источниками энергоснабжения, не целесообразно на современном технологическом уровне развития этой индустрии.

Производители фотоэлектрических панелей и пленок уже сейчас готовы предложить широкий ассортимент таких устройств, обладающих возможностью различной степени интеграции в архитектурные объекты и имеющих художественно-декоративные свойства поверхностей, позволяющих использовать их в различных архитектурно-стилистических решениях зданий и сооружений.

В международной практике в архитектурном и градостроительном проектировании обычно рассматриваются сразу несколько стратегий приспособления архитектурной среды к природно-климатическим условиям с точки зрения ее энергоэффективности и экологичности. Причем в обеспечении энергоэффективных, адаптированных к климату архитектурных решениях приоритет отдается способам архитектурно-планировочного характера (ориентация и взаиморасположение объемов, колористика и пластика фасадов, размер и расположение светопроемов и т.д.), а использование ФЭУ стоит далеко не на первом месте. Учитывая климатические особенности России, такая стратегия, ориентированная на пассивные архитектурные методы проектирования «зеленых» зданий и комфортной городской среды, наиболее оправдана с точки зрения концепции устойчивого развития и именно она в первую очередь должна направлять архитектурное проектирование на оптимальный путь решения задачи экономии энергоресурсов и сокращения выбросов парниковых газов.

Источники иллюстраций

Рис. 1. – URL: https://www.daviddarling.info/images/unglazed_collector.jpg (дата обращения: 27.02.2020).

Рис. 2. По [22].

Рис. 3. По [23].

Рис. 4. – URL: <https://www.stylepark.com/en/solteature/standard-module-scq-hv-f-integrated> (дата обращения: 27.02.2020).

Рис. 5. по [1].

Рис. 6. – URL: <http://www.energor.com/Solar%20Panel.html> (дата обращения: 27.02.2020).

Рис. 7. по [28].

Рис. 8–13. Рисунки авторов.

Литература

1. Heinsteinst P. Christophe Ballif and Laure-Emmanuelle Perret-Aebi Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths // *Green*. – 2013. – № 3(2). – pp. 125–156. DOI:10.1515/green-2013-00120.
2. Hassanpour A.E. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency / A.E. Hassanpour, J.S. Selker, C.W. Higgins // *Universita degli Studi della Tuscia, Italy*. – 2018. – PLoS ONE 13(11). DOI:10.1371/journal.pone.0203256.
3. Hernandez R.R. Environmental impacts of utility-scale solar energy / R.R. Hernandez, S.B. Easter, M.L. Murphy-Mariscal at al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – № 29. – 2014. – pp. 766–779.
4. Brian R.B. Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates / R.B. Brian, R. Patrick at al. // *ELSEVIER: Solar Energy*. – 2017. – №147. – pp 399–405. DOI:10.1016/j.solener.2017.03.004.
5. Ma S. et al. Pricing the urban cooling benefits of solar panel deployment in Sydney, Australia // *Science Report*. – №7:43938. – 6 p. DOI:10.1038/srep43938(2017).
6. Barron-Gafford G. A. et al. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures // *Science Report*. – №6:35070. – 7 p. DOI:10.1038/srep35070 (2016).
7. Jessica G. Lambert, Charles A.S. Hall, Stephen Balogh, Ajay Gupta, Michelle Arnold. Energy, EROI and quality of life // *Energy Policy*, №64, – 2014. – pp. 153–167.
8. Ferroni F. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation / F. Ferroni, R.J. Hopkirk // *ELSEVIER: Solar Energy*. – 2017. – №147. – pp. 399–405. DOI:10.1016/j.enpol.2016.03.034.
9. Ferroni F. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation / F. Ferroni, A. Guekos, R.J. Hopkirk // *ELSEVIER: Energy Policy*. – 2017. – №107. – pp 153–167. DOI:10.1016/j.enpol.2017.05.007.
10. Бубенчиков А.А. Оценка Энергетической и экономической эффективности применения альтернативных источников энергии в Омском регионе / А.А. Бубенчиков, Н.Г. Демидова, Д.В. Авдеев и др. // *Омский научный вестник*. – 2017. – №6(1516). – С. 67–75.
11. Ковалев Р.А. Анализ целесообразности ввода новых и реконструкции существующих источников тепловой энергии с использованием возобновляемых ресурсов / Р.А. Ковалев, А.Р. Ковалева // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2018. – Вып. 10. – С. 626–629.
12. Heiskanen E., et al. Demonstration buildings as protected spaces for clean energy solutions e the case of solar building integration in Finland // *Journal of Cleaner Production*. –2015. – Vol. 109.– pp.347–356. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.090.

13. Schmid D. Analyzing transformation pathways to a sustainable European energy system – Internalization of health damage costs caused by air pollution / D. Schmid, H. Korkmaz, M. Blesl, U. Fahl, R. Friedrich // *Energy Strategy Reviews*. – 2019. – Vol. 26. – pp. 1–11. DOI:10.1016/j.esr.2019.100417.
14. Jacobson M.Z. Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate / M.Z. Jacobson, J.E. Ten Hoeve // *JOURNAL OF CLIMATE*. – 2012. – Vol. 25. – pp. 1028–1044. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00032.1
15. Ruiz P. ENSPRESO – an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials / P. Ruiz, W. Nijs, D. Tarvydas, A. Sgobbi et al. // *Energy Strategy Reviews*. – 2019. – Vol. 26. – 12 p. DOI:10.1016/j.esr.2019.100379.
16. Farkas K. Designing photovoltaic systems for architectural integration. Criteria and guidelines for product and system developers / K. Farkas, F. Frontini, L. Maturi, A. Scognamiglio Scognamiglio et al. // International Energy Agency. Report T.41.A.3/2: IEA SHC Task 41 Solar Energy and Architecture. – 2013. – 92 p.
17. *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*. Editor Reccab M. Ochieng / Published by Sciyo/Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – 2010. – 454 p.
18. Ильвицкая С.В. Использование средств альтернативной энергетики при формировании художественного образа в архитектуре / С.В. Ильвицкая, И.А. Поляков // *Architecture and modern information technologies*. – 2017. – № 1(38). – С. 160–173. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/1kvart17/PDF/12_AMIT_38_ILVITSKAYA_POLYAKOV_PDF.pdf
19. Казанцев П.А. Архитектурные решения жилых малоэтажных домов с солнечным отоплением для 40–50° северной широты // *Вестник Дальневосточного государственного технического университета*. – 2010. – № 2 (4). – С. 80–91.
20. Gagnon P. Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment / P. Gagnon, R. Margolis, J. Melius, C. Phillips, R. Elmore // National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-6A20-65298. – 2016. – 82 p.
21. Фронтини Ф. Фотоэлектрические модули, интегрированные в ограждающие конструкции зданий / Ф. Фронтини, Т. Фризен // *Здания высоких технологий*. – 2013. – с. 86–91.
22. Frontini F. BIPV Product Overview for Solar Facades and Rroofs / F. Frontini, P. Bonomo, A. Chatzipanagi // University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland. – 2015. – 47 p.
23. Heidari N. Impact of Snow and Ground Interference on Photovoltaic Electric System Performance / N. Heidari, J. Gwamuri, T. Townsend and J.M. Pearce // *IEEE Journal of Photovoltaics*. – 2015. – Vol. 5. – №.6Nov. – pp. 1680–1685.
24. Gevorkian P. *Alternative energy systems in building design* // The McGraw-Hill Companies, Inc. USA. – 2010. – 545 p. ISBN:978-0-07-162524-1.
25. Cowen J. *Planning for solar: an examination of photovoltaic technology within the built form* // Australia, BPLAN. – 2008. – 95 p.
26. Черных Н.Д. Влияние средств возобновляемой энергетики на формирование архитектурного образа зданий / Н.Д. Черных, А.Ю. Сидякина // *Университетская наука*. – 2019. – №1(7). – С. 70–76.

27. Susan Ir. Optimation of BIPV by folding architecture and users behavior in office building at Surabaya / Ir. Susan, I.G.N. Antaryama, Ir.V. Totok Noerwasito et al. // Proceedings of International Conference: Sustainable built environment in the tropics: New technology, new behaviour? School of Architecture, Tarumanagara University, Jakarta, Indonesia, 12–13 November. – Jakarta, 2012. – p. 13.
28. Baum R. Culturally Inspired Patterns for Photovoltaics / R. Baum, S-J. Liotta // The Asian Conference on Arts and Humanities Official Conference Proceedings. ACAH 2011, Osaka, Japan. – Osaka, 2011. – pp. 284-302.
29. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – Москва: Росгидромет, 2014. – 61 с.
30. Kislov A. Urban amplification of the global warming in Moscow megacity / A. Kislov, P. Konstantinov, M. Varentsov, T. Samsonov, I. Gorlach, K. Trusilova // EGU General Assembly 2015. Geophysical Research Abstracts. – 2015. – V. 17. EGU2015-5620.
31. Кислов А.В. «Остров тепла» Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления / А.В. Кислов, М.И. Варенцов, И.А. Горлач, Л.И. Алексеева // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2017. – № 4. – С. 12–19.
32. Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2017. – 288 с.
33. Алексеева Л.И. Нарушение структуры теплового баланса деятельной поверхности в Москве под воздействием антропогенных факторов / Л.И. Алексеева, М.С. Мягков // Устойчивое развитие. Наука и Практика. – 2004. – № 3. С. 41–50.
34. Город, архитектура, человек и климат / под ред. М.С. Мягкова. – Москва: «Архитектура-С», 2007. – 344 с.
35. Lokoshchenko M.A. Urban 'heat island' in Moscow // Urban Clim. – 2014. – Vol.10. – № 3. – pp. 550–562.
36. Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes // J. App. Meteorol. And Climatol. – 2017. – Vol. 56. – № 10. – pp. 2729–2745.
37. Алексеева Л.И. Особенности городского «острова тепла» в Москве в 2018 году в приземном слое воздуха по данным метеорологической сети. В кн.: «Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова» / под ред. М.А. Локощенко. – Москва: МАКС Пресс, 2019.
38. 10 Grimmond C.S.B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere // Theoretical and Applied Climatology. – 2006. – Vol. 84. – № 1-3. – pp. 3–22.
39. Справочник эколого-климатических характеристик Москвы. – Том 2 (под ред. д.г.н. А.А. Исаева). – Москва: Изд-во географического ф-та МГУ, 2005. – 410 с.
40. Mertens K. Photovoltaics: fundamentals, technology and practice / K. Mertens, G. Roth // John Wiley & Sons Ltd, 2014. – 297 p.
41. Konstantinov P.I. Modeling of thermal comfort conditions inside the urban boundary layer during Moscow's 2010 summer heat wave (case-study) / P.I. Konstantinov, M.I. Varentsov, E.P. Malinina // Urban Climate. – 2014. – Vol.10. – № 3. – pp. 563–572.

42. Blazejczyk K. et al. Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices // Int. J. Biometeorol. – 2012. – № 56. – pp. 515–535.
43. Шартова Н.В. Определение порогов температурно-зависимой смертности на основе универсального индекса теплового комфорта – UTCI / Н.В. Шартова, Д.А. Шапошников, П.И. Константинов, Б.А. Ревич // Анализ риска здоровью. – 2019. – №3. – С. 83–93.

References

1. Heinsteinst P. Christophe Ballif and Laure-Emmanuelle Perret-Aebi Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. Green, 2013, no. 3(2), pp. 125–156. DOI:10.1515/green-2013-00120.
2. Hassanpour A.E, Selker J.S., Higgins C.W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. Universita degli Studi della Tuscia, Italy. PLoS ONE 13(11) 2018. DOI:10.1371/journal.pone.0203256.
3. Hernandez R.R., Easter S.B., Murphy-Mariscal M.L. et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, no. 29, pp. 766–779.
4. Brian R. Burg, Patrick Ruch et al. Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates. ELSEVIER: Solar Energy, 2017, no. 147, pp. 399–405. DOI:10.1016/j.solener.2017.03.004.
5. Ma S. et al. Pricing the urban cooling benefits of solar panel deployment in Sydney, Australia. Science Report, 2017, no. 7:43938, 6 p. DOI:10.1038/srep43938(2017).
6. Barron-Gafford G.A. et al. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. Science Report, 2016, no. 6:35070, 7 p. DOI:10.1038/srep35070 (2016).
7. Jessica G. Lambert, Charles A.S. Hall, Stephen Balogh, Ajay Gupta, Michelle Arnold. Energy, EROI and quality of life. Energy Policy, 2014, no. 64, pp. 153–167.
8. Ferroni F., Hopkirk R.J. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. ELSEVIER: Solar Energy, 2017, no. 147, pp. 399–405. DOI:10.1016/j.enpol.2016.03.034.
9. Ferroni F., Guekos A., Hopkirk R.J. Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. ELSEVIER: Energy Policy, 2017, no. 107, pp. 153–167. DOI:10.1016/j.enpol.2017.05.007.
10. Bubenichikov A. A., Demidova N. G., Avdeev D. V. et al. *Ocenka Energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya alternativnykh istochnikov energii v Omskom regione* [Assessment of Energy and economic efficiency of alternative energy sources in the Omsk region. Omskij nauchnyj vestnik]. 2017, no. 6 (1516), pp. 67–75.
11. Kovalev R.A., Kovaleva A.R. *Analiz celesoobraznosti vvoda novykh i rekonstrukcii sushchestvuyushchih istochnikov teplovoj energii s ispol'zovaniem vozobnovlyаемых ресурсов* [Analysis of the application of new and reconstruction of existing sources of thermal energy with using renewable energy sources. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki]. 2018, Issue 10, pp. 626–629.

12. Heiskanen E., et al. Demonstration buildings as protected spaces for clean energy solutions e the case of solar building integration in Finland. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 109, pp. 347–356. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.090.
13. Schmid D., Korkmaz H., Blesl M., Fahl U., Friedrich R. Analyzing transformation pathways to a sustainable European energy system – Internalization of health damage costs caused by air pollution. *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, pp. 1–11. DOI:10.1016/j.esr.2019.100417.
14. Jacobson M.Z., Ten Hoeve J.E. Effects of Urban Surfaces and White Roofs on Global and Regional Climate. *JOURNAL OF CLIMATE*, 2012, vol. 25, pp. 1028–1044. DOI:10.1175/JCLI-D-11-00032.1.
15. Ruiz P., Nijs W., Tarvydas D., Sgobbi A. et al. ENSPRESO – an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials. *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 12 p. DOI:10.1016/j.esr.2019.100379.
16. Farkas K., Frontini F., Maturi L., Scognamiglio Scognamiglio A. et al. Designing photovoltaic systems for architectural integration. Criteria and guidelines for product and system developers. International Energy Agency. Report T.41.A.3/2: IEA SHC Task 41 Solar Energy and Architecture, 2013, 92 p.
17. *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*. Editor Reccab M. Ochieng. Published by Sciyo/Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2010, 454 p.
18. Ilvitskaya S., Polyakov I. The artistic image of architecture usin alternative energy devices. *Architecture and modern information technologies*, 2017, no. 1(38), pp. 160–173. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2017/1kvart17/PDF/12_AMIT_38_ILVITSKAYA_POLYAKOV_PDF.pdf
19. Kazancev P.A. *Arhitekturnye resheniya zhilyh maloetazhnyh domov s solnechnym otopeniem dlya 40-50° severnoj shirotы* [Architectural concepts for solar-heated low-rise houses located 40-50 degrees North latitude. *Vestnik Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*]. 2010, no. 2(4), pp. 80–91.
20. Gagnon P., Margolis R., Melius J., Phillips C., Elmore R. Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-6A20-65298, 2016, 82 p.
21. Frontini F., Frizen F. *Fotoelektricheskie moduli, integrirovannye v ograzhdayushhie konstrukcii zdaniy* [Building envelope integrated photovoltaic modules. *Zdaniya vysokih tehnologij*]. 2013, pp. 86–91.
22. Frontini F., Bonomo P., Chatzipanagi A. BIPV Product Overview for Solar Facades and Roofs. University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland, 2015, 47 p.
23. Heidari N., Gwamuri J., Townsend T. and Pearce J.M. Impact of Snow and Ground Interference on Photovoltaic Electric System Performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, no.6 Nov, pp. 1680–1685.
24. Gevorkian P. *Alternative energy systems in building design*. The McGraw-Hill Companies, Inc. USA, 2010, 545 p. ISBN: 978-0-07-162524-1.
25. Jaclyn Cowen. *Planning for solar: an examination of photovoltaic technology within the built form Australia*, BPLAN, 2008, 95 p.

26. Chernish N.D., Sidiakina A.Y. *Vliyanie sredstv vozobnovlyaemoj energetiki na formirovanie arhitekturnogo obraza zdaniy* [The effect of using renewable energy for the formation of the architectural image of buildings. Universitetskaya nauka]. 2019, no. 1(7), pp. 70–76.
27. Susan Ir., Antaryama I. G.N., Totok Noerwasito Ir. V. et al. Optimization of BIPV by folding architecture and users behavior in office building at Surabaya. Proceedings of International Conference: Sustainable built environment in the tropics: New technology, new behaviour? School of Architecture, Tarumanagara University, Jakarta, Indonesia, 12–13 November, 2012, 13 p.
28. Baum R., Liotta S.-J. Culturally Inspired Patterns for Photovoltaics. The Asian Conference on Arts and Humanities Official Conference Proceedings. ACAH 2011, Osaka, Japan, 2011, pp. 284–302.
29. *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshchee rezyume* [The 2nd Roshydromet assessment report about climate changes and their consequences over the area of the Russian Federation]. Moscow, Rosgidromet, 2014, 61 p.
30. Kislov A., Konstantinov P., Varentsov M., Samsonov T., Gorlach I., Trusilova K. Urban amplification of the global warming in Moscow megacity. EGU General Assembly 2015. Geophysical Research Abstracts, 2015, vol. 17. EGU2015-5620.
31. Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alekseeva L.I. «*Ostrov tepla*» *Moskovskoj aglomeracii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepeleniya* [«Heat island» of the Moscow agglomeration and the urban-induced amplification of global warming. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya]. 2017, no. 4, pp. 12–19.
32. *Klimat Moskvy v usloviyah globalnogo potepeleniya* [Climate of Moscow in conditions of global warming. Ed. A.V. Kislova]. Moscow, 2017, 288 p.
33. Alekseeva L.I., Myagkov M.S. *Narushenie struktury teplovogo balansa deyatel'noj poverhnosti v Moskve pod vozdeystviem antropogennykh faktorov* [Thermal imbalance of the active surface in Moscow under the influence of anthropogenic factors. Ustojchivoe razvitie. Nauka i Praktika]. 2004, no. 3. pp. 41–50.
34. *Gorod, arhitektura, chelovek i klimat* [City, architecture, men and climate. Ed. M.S. Myagkova]. Moscow, «Arhitektura-S», 2007, 344 p.
35. Lokoshchenko M.A. Urban 'heat island' in Moscow. Urban Clim, 2014, vol.10, no. 3, pp. 550–562.
36. Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. J. App. Meteorol. And Climatol, 2017, vol. 56, no. 10, pp. 2729–2745.
37. Alekseeva L.I. *Osobennosti gorodskogo «ostrova tepla» v Moskve v 2018 godu v prizemnom sloe vozduha po dannym meteorologicheskoy seti* [Features of the urban “heat island” in Moscow in 2018 in the surface air layer according to the meteorological network. In the book Ekologo-klimaticheskie harakteristiki atmosfery Moskvy v 2018 g. po dannym Meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V.Lomonosova. Ed. M.A. Lokoshchenko]. Moscow, MAKS Press, 2019, pp. 95–110.
38. Grimmond C.S.B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology, 2006, vol. 84, no. 1–3, pp. 3–22.

39. *Spravochnik ekologo-klimaticheskikh harakteristik Moskvy. Tom 2 (pod red. d.g.n. A.A. Isaeva)* [Guide to the ecological and climatic characteristics of Moscow. Volume 2]. Moscow, 2005, 410 p.
40. Mertens K., Roth G. *Photovoltaics: fundamentals, technology and practice*. John Wiley & Sons Ltd, 2014, 297 p.
41. Konstantinov P.I., Varentsov M.I., & Malinina E.P. Modeling of thermal comfort conditions inside the urban boundary layer during Moscow's 2010 summer heat wave (case-study). *Urban Climate*, 2014, vol.10, no. 3, pp. 563–572. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.05.002>
42. Blazejczyk K. et al. Comparison of UTCI to Selected Thermal Indices. *Int. J. Biometeorol*, 2012, no. 56, pp. 515–535.
43. Shartova N., Shaposhnikov D., Konstantinov P., Revich B. *Opredelenie porogov temperaturno-zavisimoy smernosti na osnove universalnogo indeksa teplovogo komforta – UTCI* [Universal thermal climate index (UTCI) applied to determine thresholds for temperature-related mortality. *Health Risk Analysis*]. 2019, no. 3, pp. 83–93.

ОБ АВТОРАХ

Мягков Михаил Сергеевич

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Архитектурная физика», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: eco-climate@mail.ru

Алексеева Любовь Игоревна

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии, географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: rapira2005@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Myagkov Mikhail

PhD of Technical Sciences, Professor of «Architectural Physic» Department, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia
e-mail: eco-climate@mail.ru

Alekseeva Liubov'

PhD in Geography, Senior Scientific Researcher, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
e-mail: rapira2005@yandex.ru