

УДК 551.588.7

## АНТРОПОГЕННЫЕ МЕЗО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2019 г. А. С. Гинзбург\*, П. Ф. Демченко

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 3*

*\*E-mail: gin@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 19.07.2019 г.

Принята к печати 07.08.2019 г.

Антропогенное воздействие на климатическую систему Земли (ЗКС) в настоящее время является одним из основных факторов, определяющих изменение климата на всех пространственных масштабах — от локального до глобального. Много научных исследований посвящено прямому и опосредованному влиянию различных видов человеческой деятельности на состояние ЗКС. С помощью климатических моделей достаточно подробно исследованы обратные связи, усиливающие или ослабляющие антропогенные эффекты в процессе глобального потепления. В последние годы большое развитие получают региональные модели климатических и метеорологических процессов, позволяющие подробно описывать особенности климата в городских агломерациях и роль обратных связей в развитии мезомасштабных атмосферных процессов. Данный обзор посвящен описанию и анализу мезомасштабных обратных связей в климатической системе, включая зависящее от климатических и погодных условий энергопотребление городского хозяйства, и роли этих обратных связей в формировании и динамике климата урбанизированных территорий и потребности городского хозяйства в энергоснабжении.

**Ключевые слова:** климатическая система, мезомасштабные атмосферные процессы, антропогенное воздействие, положительные и отрицательные обратные связи, энергопотребление городского хозяйства.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-351555694-113>

### ВВЕДЕНИЕ. ГЛОБАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В земной климатической системе (ЗКС) действует большое количество положительных и отрицательных обратных связей, которые являются важнейшим регулятором динамики климата, как на глобальном, так и на локальном уровне. Положительные обратные связи усиливают внешнее и антропогенное воздействие, а отрицательные смягчают такое воздействие. Поэтому результирующее воздействие внешних и антропогенных факторов на ЗКС невозможно оценить без учета обратных связей.

Наибольший интерес вызывают положительные обратные связи, поскольку именно они усиливают эффект антропогенного глобального потепления, что представляет особую опасность для человечества. Отрицательные обратные связи изучены меньше, хотя именно их понимание

может оказаться существенным для адаптации к климатическим изменениям и возможно для создания механизмов смягчения последствий этих изменений.

Обратные связи в ЗКС проявляются как на глобальном уровне, так и в конкретных региональных (локальных) условиях. Причем локальные обратные связи действуют на фоне глобальных процессов в ЗКС, что существенно затрудняет их выявление и исследование.

Мировая энергетика вносит определяющий вклад в эмиссию парниковых газов и, тем самым, в значительной мере формирует антропогенный радиационный форсинг, влияющий на земную климатическую систему. На локальном уровне энергопотребление городских агломераций с одной стороны формирует городской климат, а с другой стороны само существенно зависит от региональных климатических условий. В итоге на урбанизированных территориях возникают как отрицательные, так и поло-

жительные антропогенные обратные связи, учет которых необходим для устойчивого развития городского хозяйства и повышения качества жизни населения путем обеспечения термического комфорта в жилых, производственных и общественных помещениях. Понимание механизмов действия мезо-метеорологических обратных связей необходимо также для создания городских программ по адаптации к последствиям глобальных и локальных изменений климата и возможным мерам по смягчению этих последствий.

Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1] и предыдущие доклады МГЭИК всегда уделяли большое внимание роли обратных связей в ЗКС при оценке чувствительности ЗКС к антропогенному воздействию.

В четвертом оценочном докладе МГЭИК 2007 г. [2] есть глава 7 «Физические климатические процессы и обратные связи» («Physical Climate Processes and Feedbacks»). Эта глава в значительной мере базируется на подробных исследованиях обратных связей в ЗКС, опубликованных в начале XXI в.

В докладах МГЭИК равновесная чувствительность климата (Equilibrium Climate Sensitivity) к внешнему воздействию, измеряемая в  $^{\circ}\text{C}/(\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2})$  определяется как «изменение равновесного состояния средней годовой глобальной приземной температуры в ответ на удвоение концентрации  $\text{CO}_2$ -эквивалента в атмосфере».

В [1] определена также эффективная чувствительность, которая оценивается «по результатам моделирования или по данным наблюдений за изменяющимися условиями в неравновесном состоянии». Эффективная чувствительность ЗКС «является мерой силы климатических обратных связей в конкретный момент времени и может изменяться по мере изменения тенденции внешнего воздействия и состояния климата и поэтому может отличаться от чувствительности климата в равновесном состоянии».

Согласно [1] климатическая обратная связь (Climate Feedback) это «взаимодействие, при котором возмущение одного из количественных показателей климата вызывает изменения в другом показателе, а изменение во втором количественном показателе в конечном итоге ведет к дополнительному изменению в первом показателе». Климатическая обратная связь измеряется в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}/^{\circ}\text{C}$ .

Концепция обратных связей в электротехнике используется с первой половины XX в. Исследования роли различных обратных связей

в формировании отклика ЗКС на внешнее воздействие начались примерно полвека назад.

Важным шагом в формировании понятийного аппарата описания обратных связей в ЗКС стали работы [3–6] и другие. Особое развитие исследований обратных связей в ЗКС началось в первые десятилетия XXI века [7–11] и многие другие. В данном обзоре мы будем пользоваться терминологией и обозначениями, принятыми в [5, 7, 8].

Главная и наиболее полно исследованная обратная связь в ЗКС — это связь между температурой земной поверхности —  $T_s$  и радиационным бюджетом на верхней границе атмосферы (ТОА — top of atmosphere) —  $R$

$$R = (S/4)(1 - A) - L_{\infty}^{\uparrow}, \quad (1)$$

где  $S$  — солнечная постоянная на орбите Земли,  $A$  — планетарное альbedo Земли,  $L_{\infty}^{\uparrow}$  — глобально осредненное уходящее тепловое излучение ЗКС на верхней границе атмосферы. Можно сказать, что классическая формула М.И. Будыко  $L_{\infty}^{\uparrow} = a + bT_s$  простейшим образом описывает линейную обратную связь между температурой поверхности Земли и уходящим тепловым излучением.

В равновесном состоянии  $R = 0$ . При наличии внешнего воздействия на климат (форсинга) —  $\Delta Q$  меняется радиационный баланс на верхней границе атмосферы на величину

$$\Delta R = \Delta Q + \lambda \Delta T_s. \quad (2)$$

Под воздействием обратных связей в земной климатической системе изменения радиационного баланса Земли —  $\Delta R$  и, соответственно, сам баланс —  $R$  — становятся снова равны нулю. Величина, необходимая для восстановления нулевого радиационного баланса ЗКС в целом,  $\lambda$  называется параметром обратной связи. В линейных моделях, где учитывается только зависимость уходящего излучения от температуры поверхности Земли, в соответствии с законом Стефана–Больцмана  $\lambda_0 = 1/4\sigma T_s^3$ ,  $\lambda_0$  характеризует основную радиационную обратную связь в ЗКС. При этом  $\Delta T_s = \Delta T_R$ , т.е. не учитываются никакие обратные связи кроме основной радиационной.

В реальности в ЗКС действует множество обратных связей, они могут усиливать или ослаблять друг друга, поэтому вводится коэффициент усиления обратной связи —  $g$ , характеризующий долю равновесного изменения температуры —  $\Delta T_{fb}$  за счет обратных связей,

дополнительных к основной радиационной обратной связи,

$$g = \Delta T_{fb} / \Delta T_s = -\lambda_{fb} / \lambda_R. \quad (3)$$

Для описания итогового эффекта суммарного действия всех обратных связей вводится результирующий фактор обратной связи —  $f$ , характеризующий отличие итогового изменения приземной температуры воздуха от изменения под воздействие только радиационной обратной связи. С его помощью итоговое изменение температуры записывается в виде

$$\Delta T_s = f \Delta T_R. \quad (4)$$

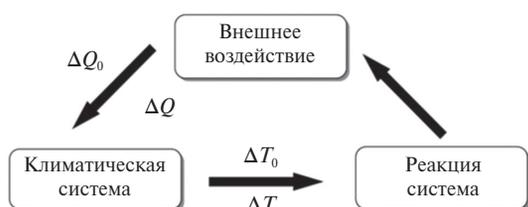


Рис. 1. Общая схема действия обратных связей в климатической системе Земли.

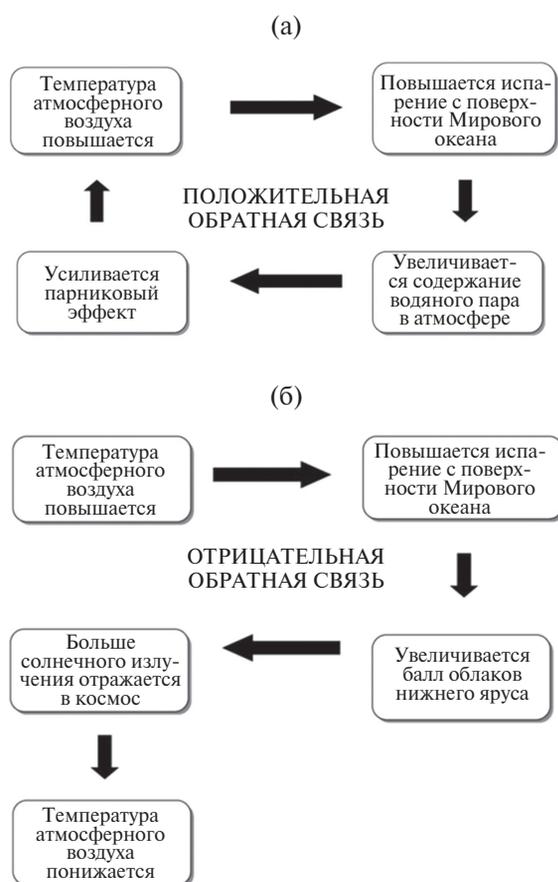


Рис. 2. Примеры положительной (а) и отрицательной (б) обратной связи между глобальным повышением температуры и испарением с поверхности Мирового океана.

Фактор и коэффициент усиления обратной связи простейшим образом взаимосвязаны между собой

$$f = 1 / (1 - g). \quad (5)$$

Общая схема контура действия обратных связей в ЗКС, используемая для оценки отклика ЗКС на внешнее воздействие показана на рис. 1.

На рис. 1  $\Delta Q_0$  — исходное внешнее воздействие, например, радиационный форсинг за счет удвоения содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\Delta T_0$  — прямое изменение приземной температуры,  $\Delta Q_{fb}$  — изменение внешнего воздействия за счет обратной связи,  $\Delta T_{fb}$  — изменение приземной температуры за счет обратной связи,  $\Delta Q = \Delta Q_0 + \Delta Q_{fb}$  и  $\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_{fb}$  — результирующие изменения форсинга и реакции системы с учетом обратных связей.

Наиболее полно исследованы такие внешние воздействия на ЗКС как изменение концентрации парниковых газов или вулканического аэрозоля в атмосфере, а также колебания приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации. Эти воздействия формируют глобальный климатический форсинг.

Главной отрицательной обратной связью на глобальном уровне является рост величины уходящего в космос теплового излучения при росте температуры подстилающей поверхности  $T_s$ . При увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере этот рост компенсирует уменьшение уходящего в космос теплового излучения, вызванного, например, увеличением концентрации  $\text{CO}_2$ .

Наиболее сложным является исследование роли «круговорота воды в природе» — содержания водяного пара в атмосфере, испарения, осадков, облачности, снега и льда, поскольку процессы фазовых переходов воды формируют как положительные, так и отрицательные обратные связи в ЗКС.

В качестве примера можно привести влияние повышения температуры воздуха на испарение воды с поверхности океана, приводящих к увеличению содержания водяного пара и балла нижней облачности, которые создают противоположные обратные связи (рис. 2). Рис. 2 является адаптацией схемы, приведенной в [9].

Повышение температуры воздуха вызывает рост испарения и увеличение содержания водяного пара в атмосфере. Рост содержания водяного пара в атмосфере при всех условиях приводит к росту парникового эффекта (рис. 2а) и к усилению глобального потепления — это положительная обратная связь. В определенных

условиях увеличивается количество и мощность облаков нижнего яруса (рис. 2б), за счет чего увеличивается альbedo ЗКС и глобальное потепление замедляется — отрицательная обратная связь.

Контур положительной обратной связи в ЗКС, как правило замкнут, т.е. он дополнительно к исходному внешнему воздействию усиливает, например, глобальное потепление до тех пор, пока другие (отрицательные) обратные не стабилизируют ситуацию. Отрицательная обратная связь, на первый взгляд, создает практически разомкнутый (открытый) контур. Однако, на самом деле контур остается замкнутым, поскольку понижение температуры противодействует ее повышению, вызванному первоначальными причинами.

Очевидно, что на рис. 2 показаны две из множества обратных связей, действующих в ЗКС. В равновесной ситуации все обратные связи действуют параллельно и в конце концов уравновешивают друг друга.

Существенно отличной является ситуация с обратными связями на локальном (мезомасштабном) уровне, например в атмосфере городской агломерации, когда необходимо учитывать выделение тепла за счет энергопотребления городского хозяйства, жилых и офисных помещений. Схема мезомасштабных обратных связей в климатической системе городской агломерации представлена на рис. 3.

В холодный период года при понижении температуры атмосферного воздуха в городе увеличивается потребление энергии на обогрев помещений, растут теплопотери зданий и величина антропогенного потока тепла (рис. 3а). В результате температура атмосферного воздуха может несколько повыситься под воздействием отрицательной обратной связи.

В теплый период года при повышении температуры атмосферного воздуха может возникнуть дополнительная потребность в энергии для кондиционирования помещений (рис. 3б). При этом растут теплопотери зданий и величина антропогенного потока тепла. В результате температура атмосферного воздуха может несколько повыситься под воздействием положительной обратной связи.

### ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДЕЙСТВИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

В изменения структуры баланса потоков энергии на верхней границе атмосферы через обратные связи могут давать вклад, помимо  $\text{CO}_2$ ,

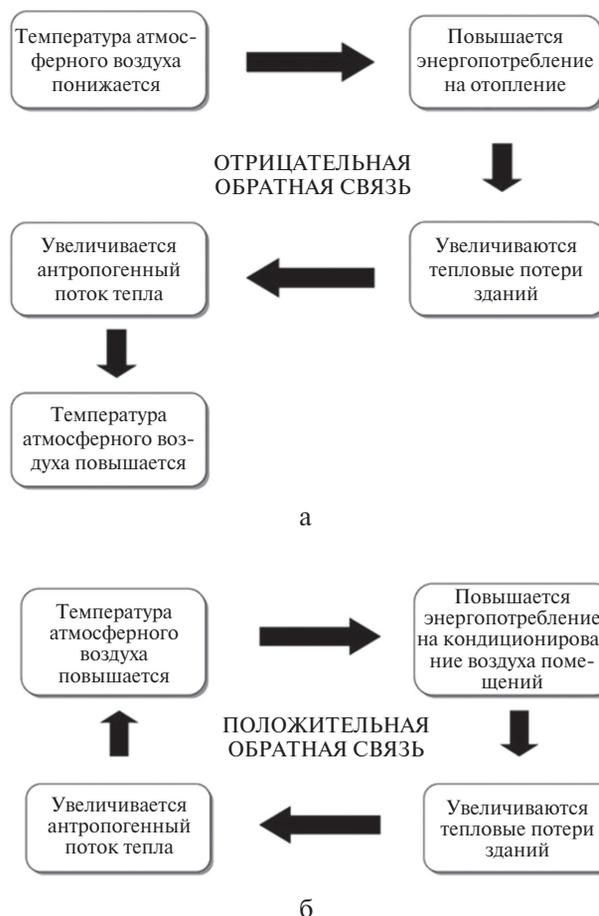


Рис. 3. Мезомасштабные обратные связи на урбанизированных территориях в холодный (а) и в теплый (б) период года.

и другие параметры ЗКС. К наиболее значимым можно отнести абсолютную влажность, вертикальный градиент температуры в атмосфере, альbedo и облачность [8, 10, 11].

Радиационный форсинг, как и отклик ЗКС на него, может быть распределен географически неоднородно. Наряду с глобальным параметром радиационной обратной связи рассматриваются и распределенные по глобусу или отдельным широтным зонам локальный радиационный форсинг и локальные параметры радиационной обратной связи [10, 12]. Благодаря перемешиванию парниковых газов в атмосфере, локализации климатически значимого вулканического аэрозоля в стратосфере и внешнему к ЗКС положению источника солнечного излучения, оправдано использование глобально осредненного значения форсинга для процессов отклика ЗКС, которые охватывают всю толщу тропосферы.

Помимо роста концентрации парниковых газов антропогенное влияние на ЗКС оказывают

факторы жизнедеятельности человека, действие которых сосредоточено у земной поверхности.

К этим факторам, в первую очередь, относятся условия землепользования (сельское и лесное хозяйство) [13, 14], урбанизация [15] и антропогенное выделение тепла [16–19].

Влияние землепользования на глобальный климат через общую циркуляцию атмосферы и глобальные биогеохимические циклы рассмотрено в [13, 14]. Благодаря включению блока биогеохимических циклов модели климата трансформировались в последнее время в модели земной климатической системы (МЗКС) [20]. В таких моделях антропогенным форсингом является не концентрация парниковых газов, а их эмиссия. Концентрация рассчитывается с учетом углеродного цикла и его обратных связей с земной климатической системой.

Условия землепользования и урбанизация влияют на альбедо и тепловое излучение поверхности, долю потока скрытого тепла в балансе энергии, шероховатость поверхности, газообмен между сушей и атмосферой и способность приповерхностных слоев к накоплению тепла. Антропогенное выделение тепла связано с расходом энергии на отопление и кондиционирование зданий, транспорт и человеческий метаболизм [16, 17, 21]. Оно приводит к возникновению дополнительного слагаемого в уравнении баланса энергии — антропогенного потока тепла (АНФ — anthropogenic heat flux).

#### АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Эффекты урбанизации и антропогенных потоков тепла АНФ особенно заметно проявляются в нижних слоях атмосферы и сильно подвержены действию суточного хода солнечной радиации. При скоростях ветра  $U = 1–10$  м/с частица воздуха пройдет за сутки расстояние от 100 до 1000 км. Линейный размер городов меняется от десятков до нескольких десятков километров, а сливающиеся городские агломерации могут достигать и сотни километров. Все перечисленные горизонтальные масштабы относятся к мезомасштабному диапазону. Поэтому в данном случае речь идет о мезомасштабных форсинге, отклике и обратных связях.

Урбанизация оказывает влияние на локальный энергетический баланс поверхности. Наиболее заметным проявлением антропогенного изменения энергетического баланса поверхности является городской остров тепла

(UHI — urban heat island), который проявляется в том, что городские территории в среднем теплее соседних сельских [22, 23].

Начиная с [24] эффекту городского острова тепла посвящено огромное число публикаций (см. обзоры [15, 25, 26]). Помимо тепла, города являются также «островами» загрязнения [27]. При определенных условиях городские территории могут становиться холоднее сельских (городской остров холода) [15]).

Существует ряд попыток выявить вклад антропогенного приповерхностного форсинга в наблюдаемые тренды температуры. Анализ данных наблюдений 1950–1999 гг. за приземной температурой воздуха на территории США в сопоставлении с данными реанализа [28], показал, что связанный с урбанизацией и землепользованием тренд приповерхностной температуры воздуха составляет  $0.27$  °C/100 лет. При этом урбанизация отвечает примерно за половину этих изменений. По некоторым оценкам на основе данных наблюдений в среднем по поверхности суши сигнал вклада UHI в глобальное потепление не выявляется [29]. Однако для быстро растущих урбанизированных территорий большой протяженности, таких как городские агломерации Китая, оценки по данным наблюдений показывают значительную роль приповерхностных антропогенных факторов [30]. Эмпирические оценки для китайских мегаполисов были дополнены модельными расчетами [31–33]. Расчеты показали значимую роль вклада урбанизации и антропогенного потока тепла в метеорологию нижней атмосферы мегаполисов и для Китая в целом уже на современном этапе.

Проведенные в [34] расчеты изменений глобального климата при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$  и различных сценариях урбанизации и АНФ показали, что в отдельных регионах потепление и увеличение случаев экстремального нагрева сравним с действием глобального радиационного форсинга. Расчеты изменения UHI, проведенные на глобальной модели климата при различных сценариях роста концентрации парниковых газов в атмосфере [35] показали, что в некоторых областях интенсивность UHI, измеряемая по разности температур в урбанизированных и сельских частях расчетной сетки, может уменьшаться. Это происходит вследствие более интенсивного иссушения сельских территорий.

Расчеты влияния глобальных изменений климата с усвоением их расчетов на мезо-метеорологических моделях также показали влияние

прогнозируемых изменений радиационного форсинга и увеличения площади урбанизированных территорий на изменение термического режима и подверженность населения тепловым шокам [36, 37]. При этом была показана роль смены режима увлажнения при смене типов поверхности с сельского на городской.

Построение сценариев ожидаемых изменений климата потребовало их совмещения с экономическими, демографическими и теплоэнергетическими моделями [38]. В такие модели необходимо включать новые обратные связи, которые учитывают антропогенную реакцию на изменения внешних условий — антропогенные обратные связи. Например, глобальную реакцию энергетических затрат на отопление/кондиционирование при повышении температуры [39, 40] с последующим изменением скорости эмиссии парниковых газов [27, 38]. Реакция урбанизированных территорий на локальные проявления глобального радиационного форсинга проявляется, в том числе, как мезомасштабная обратная связь в ЗКС, действующая наряду с такими обратными связями, как альbedo-температура для элементов криосферы.

Географическое положение, численность и плотность населения в больших городах также оказывает очень существенное и даже определяющее влияние на величину антропогенного потока тепла и интенсивность городского острова тепла [41–44].

На мезо-метеорологических масштабах могут действовать локальные обратные связи между температурой и антропогенным потоком тепла ( $T$ -АНФ обратная связь [45, 46]). На важность учета этой обратной связи при работе систем кондиционирования воздуха в условия слабых ветров указано в [27, 47]. В последние годы все больше появляется работ по другим аспектам чувствительности климатической изменчивости к обратным связям в ЗКС (см., например, [48, 49] и другие публикации).

Исследованию воздействия климатических факторов на энергопотребление больших городов посвящен ряд работ, выполненных в рамках проекта «Анализ влияния региональных изменений климата на энергопотребление городского хозяйства российских мегаполисов» [40, 45, 46, 50–54].

Наличие в мезомасштабной метеорологической модели города блока теплового баланса зданий с расчетной температурой внутри помещений и параметризацией работы приборов кондиционирования позволило провести чи-

сленные расчеты эффекта взаимодействия энергопотребления, температуры и мезомасштабной циркуляции для городов: Нью-Йорк [55, 56], Гонконг [57], Париж [58], Токио [59], Осака [60], Мадрид [61].

Антропогенные обратные связи, аналогичные  $T$ -АНФ, могут возникать и при адаптации урбанизированных территорий к изменениям климата. В [62] описаны эксперименты по влиянию различных методов адаптации урбанизированных территорий США к изменениям глобального радиационного форсинга при сопутствующей урбанизации и выявлена чувствительность городского климата к мерам по адаптации и смягчению последствий климатических изменений.

Обратные связи, возникающие между адаптационными (смягчающими) изменениями энергетического баланса поверхности (уменьшение альbedo городских поверхностей, озеленение крыш и т.д.) и изменениями климата на мезомасштабах также относятся к антропогенным обратным связям. Эти связи надо учитывать в интегрированных системах развития мегаполисов [63].

Для урбанизированных территорий мезомасштабные обратные связи возникают вследствие действия двух факторов: реакции системы (города) на изменение внешних условий (форсинга) и реакции внешних условий на изменения городской инфраструктуры.

Для урбанизированных территорий городов, помимо основного мезо-масштаба, внутри выделяются микро-масштабы (здание или городской каньон), масштаб соседства (neighborhood scale) — 100–1000 м. По однородности свойств поверхности и застройки городские территории разделяются на городские климатические зоны [64].

Локальный антропогенный форсинг проявляется, в том числе, во вкладе мегаполисов в эмиссию парниковых газов в атмосферу [65] и, тем самым, дает вклад и в глобальный радиационный форсинг [66]. В то же время отклик температуры на глобальный радиационный форсинг может играть роль форсинга для территорий с характерными размерами города и приводить к отклику на мезо-метеорологических масштабах.

Для поддержания комфортных температур внутри зданий при изменении внешней температуры адаптационный отклик выражен включением нагревательных или охлаждающих устройств. Это приводит к появлению антропогенного потока тепла из-за энергопотребления, который поступает в атмосферу [16, 17].

Антропогенный поток тепла приводит к дополнительному разогреву внешней для зданий атмосферы. Тем самым при охлаждении помещений возникает положительная (дестабилизирующая) обратная связь, а при отоплении — отрицательная (стабилизирующая) обратная связь [45].

Более сложные антропогенные обратные связи могут возникать при осуществлении мер адаптации по снижению влияния внешнего нагревания при помощи озеленения крыш зданий — отрицательной обратной связи. Прямой эффект охлаждения может сопровождаться изменением горизонтальной и вертикальной адвекции тепла, приводя к положительной обратной связи [67].

Для исследования и оценки роли мезомасштабных обратных связей на урбанизированных территориях надо рассматривать энергетический баланс поверхности (SEB — surface energy balance)

$$B_S = Q^* + Q_F - Q_H - Q_E - \Delta Q_S. \quad (6)$$

В (6) для компонент энергетического баланса использованы обозначения, принятые в [22]:  $Q^*$  — суммарный баланс радиационных потоков на поверхности (солнечного и теплового),  $Q_H$  и  $Q_E$  — потоки явного и скрытого тепла от поверхности в атмосферу,  $\Delta Q_S$  — поток тепла в грунт и сооружения, называемый также потоком теплового накопления — heat storage flux [68],  $Q_F$  — антропогенный поток тепла (в [45] и ряде других публикаций этот поток обозначен  $Q_A$ , но  $Q_F$  — наиболее распространенное обозначение в работах, цитируемых в данном обзоре).

В моделях баланса энергии на урбанизированной территории уравнение (6) зачастую применяют ко всему слою от поверхности Земли до огибающей крыши зданий поверхности. Этот слой называется городской покрывающий слой (UCL — urban canopy layer). Над ним распола-



Рис. 4. Схема покрывающего (UCL) и пограничного слоя (UBL) в городских условиях.

гается городской пограничный слой атмосферы (UBL — urban boundary layer), имеющий сложную структуру [69–71]. В этом случае в правую часть (6) следует добавить горизонтальную адвекцию тела  $Q_{adv}$ . Мерой интенсивности городского острова тепла принято считать его интенсивность  $T_{UHI} = T_{urb} - T_{rur}$ , равную разности температур между центром города областями и периферийными сельскими областями. Схема покрывающего (UCL) и пограничного слоя (UBL) в городских условиях представлена на рис. 4.

В интегральных моделях весь UCL характеризуется одной эффективной температурой  $T_S$ , по которой определяется интенсивность острова тепла покрывающего слоя. В литературе различают остров тепла в покрывающем слое и остров тепла в вышележащем пограничном слое атмосферы [72]. Внутри UCL в зависимости от выбора температуры (подстилающей поверхности или воздуха) различают поверхностный и воздушный остров тепла [73].

В линейном приближении мерой интенсивности обратной связи, связанной с антропогенным фактором  $x$ , является коэффициент  $\lambda_x$ . По аналогии с глобальным радиационным форсингом [8] для мезомасштабных возмущений  $B_S$  можно представить  $\lambda_x$  в следующем виде

$$\lambda_x = (\Delta B_S / \Delta x) \cdot (\Delta x / \Delta T). \quad (7)$$

В отсутствие обратной связи отклик температуры  $\Delta T_0 = \Delta B_S / \lambda_0$ . В линейном приближении отклик  $T_{UHI}$  или средней по городу температуры на внешний форсинг связан с откликом  $T_{UHI,0}$  через коэффициент усиления  $g_x$

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot (1 - g_x)^{-1}, \quad (8)$$

где  $g_x = -\lambda_x / \lambda_0$ .

Если невозмущенная система устойчива, то  $\lambda_0 < 0$ . В линейной теории чувствительности каждый из процессов обратных связей дает аддитивный вклад в коэффициент усиления, то есть

$$g = \sum g_x. \quad (9)$$

Каждое слагаемое состоит из произведения двух сомножителей

$$g_x = (\Delta T / \Delta x)_{resp} \cdot (\Delta T / \Delta x)_{antr}. \quad (10)$$

Первый сомножитель  $(\Delta T / \Delta x)_{resp} = \lambda_0^{-1} \times \Delta B_S / \Delta x$  определяется откликом процессов в атмосфере на возмущения теплового баланса UCL,

которые возникают из-за фактора  $x$ . Для оценивания отклика мезомасштабных атмосферных процессов на различные как внешние, так и внутренние возмущения, создан спектр моделей взаимодействия UCL и городского пограничного слоя различной степени сложности [69, 71]. Обзор моделей SEB и первые результаты их сравнения в рамках проекта PILPS-urban приведены в [74–76].

Процессы термического отклика UCL во многом зависят от внешних циркуляционных факторов, таких, как мезомасштабная адвекция тепла. Вопросы взаимодействия мезомасштабных процессов в атмосфере и взаимодействия их с UCL изложены в обзорах [26, 77, 78].

Второй сомножитель  $(\Delta T/\Delta x)_{antr}$  определяется процессом адаптации городских объектов к внешним для них температурным возмущениям. Например, процессами нагревания и кондиционирования помещений при изменении температуры снаружи зданий  $T_{outdoor}$ . Расчет процессов адаптации городских строений потребовал, например, создания моделей энергетики зданий (BEM — building energy models) [47, 79] и др. В то же время для интегральных оценок возможно привлечение более простых параметризаций [45].

В реальных условиях взаимодействие урбанизированных территорий с атмосферой происходит в широком спектре масштабов, начиная от масштаба городского каньона до масштаба всего города. Эти процессы нелинейно взаимодействуют между собой. Поэтому наиболее подробные модели для учета антропогенных обратных связей урбанизированных территорий являются совместными моделями мезомасштабной циркуляции, городского покрывающего слоя и энергетики зданий. Это не отменяет роли анализа отклика и обратных связей на моделях различной степени сложности.

### ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ГОРОДСКОГО ПОКРЫВАЮЩЕГО СЛОЯ НА ВНЕШНИЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Нас будет интересовать в первую очередь термический отклик городских территорий —  $(\Delta T/\Delta x)_{resp}$ . Термический отклик проявляется в изменении отдельных слагаемых уравнения энергетического баланса (6), которые подвержены действию внешних и внутренних факторов [22, 23]. Интегральной мерой действия специфических городских эффектов служит  $T_{UHI}$ . Суточный и сезонный ход  $T_{UHI}$  связан в основ-

ном суточным ходом поступающей на внешнюю границу UCL солнечной радиации и, возможно, с суточным ходом жизнедеятельности.

К внешним факторам относятся метеорологические, в первую очередь, ветер, облачность и осадки. Самые большие значения  $T_{UHI}$ , как правило, наблюдаются ночью в безветренную погоду [80]. По данным наблюдений на территории США найдены значимые корреляционные связи между  $T_{UHI}$  и интенсивностью осадков [81].

Внутренними факторами UCL являются геометрические параметры (плотность городской застройки и ее высотность), физические свойства материалов зданий и подстилающей поверхности, степень покрытия территории растительностью, степень перекрытия поверхности взаимодействия с почвой. Действие этих факторов в городах приводит, как правило, к увеличению поглощенной солнечной радиации и уменьшению уходящей тепловой, уменьшению доли скрытого и увеличению доли явного турбулентного тепла, увеличению потока теплового накопления [22, 26]. В совокупности действие перечисленных факторов в литературе называют эффектами урбанизации [31] или эффектами покрытия [82].

Часть планируемой деятельности по адаптации урбанизированных территорий к изменениям климата и/или смягчения последствий этих изменений осуществляется как обратная связь между потоками энергии в (6) и эффектами покрытия (озеленение территории и крыш, увеличение альбедо поверхностей, увеличение площадей открытой воды и т.д.). Эффективность таких мероприятий оценивается в том числе и в экспериментах по чувствительности [83, 62].

Отдельно от эффектов урбанизации рассматривается действие антропогенной эмиссии тепла, связанный с расходом энергии на отопление/охлаждение помещений, транспорт и метаболизм. В итоге антропогенный расход энергии превращается в тепло, которое в уравнении (6) учитывается отдельным слагаемым — антропогенным потоком тепла ANF [16, 22].

Одним из методов исследования отклика  $T_{UHI}$  на изменения факторов урбанизации является использование локальных моделей UCL при заданных метеорологических условиях на верхней границе UCL, которая является нижней границей атмосферного пограничного слоя (ABL — atmospheric boundary layer) [84–87]. Такие модели отклика позволяют проводить массовые расчеты чувствительности, варьируя параметры в широких пределах, и проводить их анализ.

Примером применения метода для одномерного блока UCL мезо-метеорологической модели [88] являются проведенные в [85] для летних условий г. Базеля расчеты чувствительности суточного хода  $T_{UHI}$  к изменениям внутренних параметров. В расчетах изменялись: фактор видимости неба (SVF — sky view factor), альbedo и излучательная способность поверхностей городского каньона, степень покрытия земли растительностью (индекс вегетации), озеленение крыш, теплоемкость и теплопроводность материалов зданий. Для летних антициклонических условий найдены линейные зависимости для максимального ночного  $T_{UHI}$  от SVF и максимального дневного  $T_{UHI}$  от индекса вегетации. Найденные коэффициенты чувствительности можно непосредственно вставлять в формулы для коэффициентов обратных связей.

Аналогичные расчеты на одномерном блоке метеорологических моделей, проведенные в [87], выявили роль немоной зависимости радиационных притоков к UCL от SVF, связанную с конкуренцией захвата теплового противоизлучения и затенением поступающей солнечной радиации в городском каньоне.

Расчет влияния АНФ на UCL, проведенный по одномерной модели [89] для различных районов г. Лондона показал, что в местах плотной застройки эффект АНФ значителен (до +1.5 °C), его учет приближает результаты расчетов к данным наблюдений. В местах редкой застройки эффект не является значимым. Увеличение температур поверхности и воздуха в городском каньоне происходит в основном в ночные часы, что связано с уменьшением толщины ABL.

В условиях резких температурных контрастов, например на границе суши и крупного водоема, горизонтальная адвекция тепла может играть существенную роль. В [86] на одномерном блоке с параметризацией горизонтальной адвекции тепла был проведен расчет чувствительности  $T_{UHI}$  при изменении альbedo крыш для г. Чикаго. Рассчитанная величина падения температуры с ростом альbedo (один из способов антропогенной адаптации) при простом способе учета бризовой циркуляции уменьшился вдвое.

Вентиляция UCL воздушным потоком является важным фактором, который влияет на  $T_{UHI}$ . Первой найденной закономерностью для интенсивности городского острова была эмпирическая зависимость  $T_{UHI}$  от скорости ветра  $U$  для ночных безоблачных условий:  $T_{UHI} \sim U^{-0.5}$  [72, 90]. Эта приближенная зависимость задает тенденцию, не учитывая действия многих важ-

ных факторов, помимо скорости ветра (например, SVF [80]), и их взаимодействия с потоком.

Вентиляция UCL осуществляется как за счет горизонтального, так и за счет вертикального теплообмена. Горизонтальным теплообменом на масштабах города в (6), как правило, пренебрегают. Однако для компактных мегаполисов (Гонконг) горизонтальная вентиляция может играть существенную роль [91, 92]. Нульмерные модели компактного города с простой параметризацией вентиляции позволили проводить грубые оценки чувствительности  $T_{UHI}$  в широком диапазоне параметров городской застройки и интенсивности вентиляции, заданной аналогом коэффициента сопротивления для теплообмена [91, 92].

Для протяженных городских агломераций вертикальная вентиляция через теплообмен UCL с вышележащим городским пограничным слоем (UBL — urban boundary layer) может блокироваться компенсирующими изменениями температуры  $T_{ubl}$  в верхней части городского пограничного слоя. Этот эффект горизонтальной адвекции воздуха, предварительно нагретого над урбанизированными областями вверх по потоку, был установлен по данным наблюдений в [93]. Предварительные аналитические оценки этого эффекта для чувствительности  $T_{UHI}$  к возмущениям антропогенного потока тепла даны в [46] на упрощенной модели.

Простым способом учета эффекта компенсирующих эффектов является дополнение уравнения (6) моделью энергетического баланса ABL с учетом горизонтальной адвекции для определения эффективной температуры  $T_{ubl}$ . Такая модель реализована, как городской генератор погоды (UWG — urban weather generator) и прошла успешное сравнение с данными наблюдений в ряде мегаполисов [94]. Используя в качестве входа данные близлежащей метеорологической станции, модели UWG не требуют больших вычислительных затрат и позволяют эффективно рассчитывать входные данные для моделей энергетического баланса зданий. Аналогичный подход с переменной высотой ABL и параметризацией городского бриза был осуществлен в [95]. Авторы назвали свой метод лагранжевой адвективной моделью, так как он опирается на баланс энергии в движущемся со скоростью ветра контрольном объеме ABL.

Наиболее подробно взаимодействие динамических факторов и пространственной неоднородности на масштабах города описываются в мезомасштабных (ММ) моделях [26, 77, 78].

В рамках моделирования на ММ-моделях проводится как расчет чувствительности температуры UCL к действию внутренних и внешних факторов [62, 96–99], а также сравнение различных схем описания UCL [100, 101].

Проведенное на ММ-модели исследование чувствительности температуры воздуха у поверхности к скорости ветра [102] подтвердило эффект вентиляции. По приведенным в [102] графикам можно оценить  $\Delta T/\Delta U \approx -0.2 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$ . В то же время оценка зависимости  $T_{UHI}$  от размера города  $L$  до сих пор является дискуссионным вопросом. В [96] при изменении  $L$  с 30 км до 40 км  $T_{UHI}$  изменилось на  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , и из этого был сделан вывод о малом влиянии  $L$ .

Проведенные в [99] эксперименты (на примере г. Бильбао) по чувствительности  $T_{UHI}$  к изменению площади города и изменению антропогенного потока тепла АНФ показало, что удвоение площади приводят к увеличению  $T_{UHI}$ , равному увеличению  $T_{UHI}$  при удвоении АНФ без изменения площади. В экспериментах [99], возможно, уже сказывался эффект компенсирующих изменений температуры  $T_{ubl}$ , которые должны зависеть от соотношения размера города к характерному расстоянию нагрева  $T_{ubl}$  [46]. В любом случае, вопрос определения чувствительности  $T_{UHI}$  к размеру урбанизированной территории еще остается открытым.

Дополнительно к экспериментам по термической реакции UCL на эффекты городского покрытия [62, 83, 96] на ММ-моделях проведено большое количество экспериментов по оцениванию термического отклика на изменения АНФ — слагаемого  $Q_F$  в (6) [31–33, 82, 98, 103–107]. Эксперименты показали, что АНФ приводит к росту  $T_{UHI}$ , в отличие от действия городского покрова, который иногда приводит к «острову охлаждения» в дневные часы [82, 107]. Для условий г. Сидней вклад АНФ в  $T_{UHI}$  в зимний период ночью может достигать 80%. В это время в среднем наблюдаются и максимальные значения интенсивности острова тепла [82]. Для типичного арктического города (г. Аппатиты, Россия), вклад АНФ в  $T_{UHI}$  в зимний период оценивается в 50% [106]. При этом ночная реакция приземной температуры воздуха, например, в мегаполисе Осака, может в несколько раз превышать ее реакцию днем даже при уменьшении АНФ [105, 107]. Многие авторы связывают усиление роли АНФ ночью с подавлением вертикального перемешивания и уменьшением толщины ABL [108], однако частично это может быть связано и с исчезновением ночью влияния солнечной радиации.

Эксперименты по чувствительности показали, что совместный эффект действия городского покрова и АНФ не складывается из суммы действий, зависит от условий для отдельных мегаполисов, времени суток и сезона [44, 82, 105].

#### АНТРОПОГЕННЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КЛИМАТА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Реакция городского климата на изменения термических условий в покрывающем слое, которые действуют на времена суточного и сезонного хода, связаны с расходом энергии на отопление и кондиционирование помещений.

Для характеристики режимов теплопотребления вводится некоторая характерная температура  $T_*$ , которая, например, может соответствовать принятой для данного места комфортной температуре внутри помещений  $T_{indoor}$ . В исследованиях зависимости энергопотребления от температуры снаружи помещений для величины  $T_*$  используется термин «базовая температура» [109]. В моделях энергетического баланса здания используется термин «целевая температура» [79]. На самом деле комфортной температуре соответствует некоторый диапазон  $[T_*] = [T_*^{(-)}, T_*^{(+)}]$ .

Для грубых интегральных оценок реакции антропогенных потоков тепла на изменения температуры UCL можно использовать эмпирические зависимости, принятые в энергетике для отдельных регионов или городов. Математической моделью для таких оценок является функция температурной зависимости/отклика (TDF/TRF — temperature dependence/response function) [110–113] энергопотребления (energy demand), которая в методе инвентаризации [21] пересчитывается в антропогенный поток тепла  $Q_F$  в (6) для энергопотребления, отнесенного к единице площади в единицу времени.

В параметрических моделях  $U$ -образная форма TDF приближается кусочно-линейной и, возможно, кусочно-экспоненциальной зависимостями [110–113]. Для отдельных ветвей TDF (отопления и охлаждения) можно получить эмпирические оценки температурной чувствительности  $q'_F = \Delta Q_F / \Delta T$ .

По эмпирическим данным для летних условий мегаполиса Токио [114] можно получить оценку  $q'_F = 3.7 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ , а для зимних условий мегаполиса Москва  $q'_F = -0.93 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$  [45]. Иногда температурную зависимость затрат энергии на нагревание/охлаждение оценивают

в относительных единицах. Например, в [17] приводятся оценки различных авторов для прироста затрат энергии на 5% при уменьшении температуры на 1 °С в холодный период и на 3% при увеличении на 1 °С в теплый период.

Полученные грубые оценки температурной чувствительности АНФ можно сравнить, например, с коэффициентами температурной чувствительности теплового излучения поверхности  $\Delta L_s^\uparrow / \Delta T = 5 \div 6 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$  или на верхней границе атмосферы  $\Delta L_\infty^\uparrow / \Delta T = 1.8 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$  [12].

Интегральная модель, построенная по функциям температурного отклика, опирается на эмпирические коэффициенты для определенной территории, полученные с грубым временным разрешением. Результаты таких моделей не позволяют проводить прогностические расчеты для меняющихся условий хозяйственной деятельности — например, смене типа охлаждающих устройств и их количества. Интегральные модели задают АНФ, но не содержат важную информацию о распределении антропогенной эмиссии тепла между различными составляющими потоков энергии внутри покрывающего слоя.

Во многих моделях UCL в уравнении баланса (6) АНФ считается добавкой к потоку явного тепла [33, 115]. Если снаружи зданий не происходит фазовых переходов влаги, антропогенная эмиссия скрытого тепла не дает вклада в нагрев UCL. В то же время ее вклад в  $Q_E$  в уравнении (6) происходит по иным закономерностям в сравнении с законами турбулентного обмена (например, с законом сопротивления). Значительные антропогенные источники влаги в UCL могут возникать при использовании систем кондиционирования воздуха в зависимости от их рабочих характеристик. Это приводит, в частности, к погрешностям метода инвентаризации тепловых источников при определении АНФ [21].

Для преодоления отмеченных недостатков в модели UCL включаются в виде отдельных блоков модели энергетического баланса зданий (BEM — building energy models) [47, 58, 79, 84, 116–119]. В BEM энергетический баланс зданий рассчитывается исходя из условия поддержания внутри помещений комфортного диапазона температур и, возможно, влажности. Возникающие при этом затраты энергии преобразуются, с одной стороны, в тепловые нагрузки на отопление или охлаждение помещений, которые затем поступают в атмосферу через поверхности зданий. С другой стороны, часть энергопотребления преобразуются в стоки явного и скрытого тепла,

которые поступают непосредственно в атмосферу или другие природные резервуары. Модели BEM отличаются различной степенью детализации процессов, а также количеством этажей: однослойные [47, 84, 116–118] и многослойные [79].

Совместные модели «здание—поверхность—атмосфера», которые формулируются для отдельных фрагментов городской застройки [85, 88, 100, 120] для MM-моделей и моделей ЗКС являются параметризациями эффектов зданий в UCL (BER — building effect parameterization) [88]. Они являются основой для расчета термодинамических и динамических процессов при осреднении внутри относительно однородных по строению областей урбанизированных территорий, например, городских климатических зон [64]. Такие области формируют процессы вблизи нижней границы мезомасштабных метеорологических моделей и моделей земной системы. Горизонтальное осреднение отдельных деталей микроструктуры в случае их изменчивости внутри интересующей нас области можно проводить с помощью функций распределения (например, зданий по высоте [59, 88]).

Другой тип антропогенных обратных связей, который действует на характерных временах от нескольких лет и более, связан с мерами по смягчению воздействий изменений климата. К ним относятся: устройство холодных крыш и тротуаров с увеличенным альбедо, зеленых крыш с растительностью, озеленение и обводнение подстилающей поверхности, повышающие долю потока скрытого тепла в тепловом балансе [62, 121, 122], устройство солнечных батарей.

Для моделирования таких процессов существующие модели городского каньона дополняются блоками на поверхности крыш и пространства между ними. Реализация таких моделей для расчетов действия на энергетический баланс зданий и температуру атмосферы внутри UCL эффектов озеленения крыш была осуществлена в [108, 123], эффектов солнечных элементов — в [124].

Учет в моделях UCL зданий, энергетический баланс которых настраивается на поддержание целевой температуры за счет устройств с отводом тепла (явного и скрытого) в окружающую атмосферу, делает такие модели совместными и обеспечивает расчет действия обратной связи T-АНФ. При расчете действия других антропогенных обратных связей зачастую используются совместные модели со встроенным интерактивным блоком UCL + BEM. Совместные модели

позволяют рассчитывать как воздействие энергетики на городскую атмосферу, так и воздействие климатических факторов на энергопотребление.

Таблица 1 содержит перечень некоторых численных экспериментов, проведенных с совместными мезо-метеорологическими моделями по определению реакции городских территорий на действие антропогенных обратных связей

при использовании систем кондиционирования воздуха АС и АСW (с отводом скрытого тепла в атмосферу и в другие резервуары), совместных систем обогрева и кондиционирования (НАС — heating and air conditioning), зеленых крыш и солнечных батарей.

В первую очередь совместные модели были применены для расчета влияния на атмосферу систем кондиционирования воздуха АС (air

**Таблица 1.** Численные эксперименты по оценке реакции городского климата на действие антропогенных обратных связей

Авторы	Механизмы антропогенной реакции	Место, время	Метеорологические и энергетические эффекты
Krpo et al. [125]	АС	Два модельных города (Европа, США), июль	Рост температуры воздуха днем, максимальный на уровне крыш до 1–2 °С, рост скорости ветра и турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) днем
Kikegawa et al. [47]	АС	Токио, лето 1998 г.	Рост температуры воздуха в среднем до 1 °С, максимальный эффект ночью
de Munk et al. [58]	АС, АСW	Париж, август 2003 г.	Рост температуры воздуха на 1 °С для АС, на 0.5 °С для АСW, в основном ночью
Ohashi et al. [59]	АС	Токио, июль–август 2002 г.	Рост температуры воздуха до 1–2 °С днем в рабочие дни
Gutierrez et al. [55]	АС	Нью-Йорк, июль 2010 г.	Рост температуры воздуха до 1–2 °С, рост скорости ветра и ТКЭ, ночью исчезает приземная инверсия температуры
Gutierrez et al. [56]	АС, АСW	Нью-Йорк, июль 2010 г.	Переход на АСW уменьшает температуру воздуха в среднем на 0.8 °С и увеличивает приземную влажность в сухую погоду
Wang et al. [57]	АС, АСW	Гонконг, июль 2016 г.	Переход на АСW уменьшает температуру воздуха на 0.8 °С днем и на 1.5 °С ночью, уменьшает ТКЭ, толщину слоя перемешивания, скорость ветра, силу морского бриза и мезо-циркуляции, увеличивает абсолютную влажность
Salamanca et al. [61]	АС, альbedo, теплоизоляция	Мадрид, июль–июль 2008 г.	Увеличение альbedo, теплоизоляция и отключение сброса тепла АС в атмосферу уменьшает интенсивность городского острова тепла на 1–2 °С
Salamanca et al. [126]	АС	Феникс (Аризона, США), июль 2009 г.	Рост ночных температур на 0.5–1.5 °С при увеличении доли охлаждаемых помещений, увеличение перемешивания в приземном слое ночью, улучшение метеорологического прогноза ночных температур
Salamanca et al. [127]	АС, зеленые крыши, солнечные батареи	Феникс, Таксон (Аризона, США), июль 2009 г.	Холодные крыши уменьшают приземную температуру днем на 0.4–0.8 °С, вдвое эффективнее солнечных батарей. В то же время в ночное время роль этих смягчающих механизмов меняется: солнечные батареи уменьшают приземную температуру днем на 0.4–0.8 °С, вдвое эффективнее холодных крыш
Sun et al. [67]	Зеленые крыши	Пекин, июль 2010 г.	Уменьшение температуры воздуха до 2.5 °С, скорости ветра и толщины ABL днем, уменьшение притока тепла к ABL за счет вовлечения и уменьшение адвективного притока тепла
Takane et al. [60]	НАС	Осака, годовой цикл 2013–2014 гг.	Рост температуры воздуха до 2 °С ночью в отопительный сезон и согласование с данными наблюдений

conditioning) внутри помещений. Актуальность исследования действия АС связана, во-первых, с расчетом теплового стресса населения в условиях тепловых волн [36, 55]. Во-вторых, при действии АС обратная связь  $T$ -АНФ является положительной, дестабилизирующей. Учет ее влияния в сравнении с режимом отопления при тех же абсолютных значениях  $|\Delta Q_F/\Delta T|$  приводит к более сильной реакции температуры воздуха [45].

Результаты действия АС на окружающую атмосферу зависят от распределения теплового сброса между потоками явного и скрытого тепла. Проведенные расчеты показали, что смена режима кондиционирования с сухого на влажный приводит к существенному снижению приземной температуры воздуха на 0.5–1.5 °C [56, 57, 108].

АС приводят в основном к увеличению ночных температур несмотря на то, что пик выделения тепла в атмосферу за счет действия АС приходится на дневное время [47, 55–57, 59, 108, 126]. В [108] ночное усиление реакции температуры на АНФ связывают с уменьшением толщины ABL. Однако существенную роль играет и поток теплового накопления, который обеспечивает инерционность воздействия АНФ и проявление эффекта в ночных условиях.

Широкое использование различных типов систем кондиционирования может вызывать рост ночных температур от 0.5 до 1 °C. При удвоении числа кондиционеров сухого режима увеличение температуры достигает 2 °C. Сравнение действия различных систем АС на атмосферу для крупных городов (Нью-Йорк, Гонконг) было проведено в [56, 57] с использованием ММ-модели и уточненных термодинамических схем функционирования АС. В [57] изменение типа АС с целью уменьшения тепловых выбросов в атмосферу привело к уменьшению температуры воздуха до 1.5 °C в ранние утренние часы по сравнению с базовым вариантом АС. При этом отключение АС в течение всего дня приводило к уменьшению температуры на 4 °C. Уменьшение реакции приземной температуры воздуха на 0.8 °C при использовании увлажняющей тепловые отходы АС технологии в сравнении с базовым вариантом получено при моделировании для г. Нью-Йорка [56, 57].

Проведенные в [127] оценки для летних условий г. Хьюстон и г. Феникс, расположенных в жарком и сухом климате, показали, что холодные крыши уменьшают приземную температуру днем на 0.4–0.8 °C, вдвое эффективнее солнечных батарей. Для снижения ночных температур

условий более эффективным адаптационным механизмом (по сравнению с холодными крышами) является использование солнечных батарей (в дневное время). Это показывает, что связанные с дневным нагревом факторы действуют на ночные температуры.

По расчетам действие АС приводит к увеличению турбулентной кинетической энергии и толщины ABL [55–57], а также к возможному исчезновению ночной приземной инверсии температуры [55, 57]. Также может наблюдаться усиление скорости ветра в ABL [55, 57, 125].

Модели, настроенные на поддержание климатических условий внутри помещений, могут включать учет и других антропогенных обратных связей, например, холодных крыш (с увеличенным альбедо) и солнечных панелей [61, 127].

Суточный ход реакции температуры на озеленение крыш отличается от реакции на увеличение альбедо крыш и размещение солнечных панелей, а также действия АС, когда максимум реакции приходится на ночное время. Проведенные в [123] эксперименты с ММ-моделью с блоком зеленых крыш [67] в синоптических условиях летней тепловой волны в г. Пекин показали, что максимум уменьшения температуры воздуха за счет зеленых крыш (2.5 °C) в сравнении с базовым сценарием достигается днем. Уменьшение температуры воздуха связано с увеличением испарения. Оно сопровождается уменьшением толщины перемешанного слоя в атмосфере, что, по мнению авторов [123], приводит к подавлению перемешивания и к полученному в расчете уменьшению скорости ветра днем на 1 м/с.

В [126] предпринята попытка оценить влияние учета изменений АС на качество метеорологического прогноза ММ-модели. Статистически значимого улучшения при прогнозе дневных температур выявлено не было, в то время как небольшое увеличение качества прогноза ночных температур в расчетах отмечалось.

Исследования действия антропогенных обратных связей на совместных ММ-моделях, которые охватывают весь годовой ход со сменой режимов охлаждения и нагревания помещений, на сегодняшний день менее многочисленны в сравнении с аналогичными для летних условий действия АС. Эксперименты с ММ-моделью г. Осака [60] включающие как период с кондиционированием, так и с отоплением помещений, показали, что учет действия  $T$ -АНФ обратной связи приближает результаты расчетов к данным наблюдений в отопительный период.

Совместные модели позволяют рассчитывать действие связи  $T$ -АНФ не только на городскую атмосферу, но и на энергопотребление. В [47] сравнение расчетов по совместной ММ-модели с подключенной и отключенной системой кондиционирования — АС показало, что включение  $T$ -АНФ обратной связи увеличивает энергопотребление ED на 6%.

Это значение соответствует эмпирическим оценкам увеличения энергопотребления на кондиционирование и соответственно  $Q_F$  на  $3 \div 6\%$ , представленным в [17], а также оценке по упрощенной параметризации действия обратной связи  $T$ -АНФ [45].

Такую оценку можно получить, используя фактор обратной связи

$$f = \Delta T_s / \Delta T_0 = k_s / (k_s - q'_F), \quad (11)$$

где  $q'_F = \Delta Q / \Delta T$ , а  $k_s$  — коэффициент температурной чувствительности теплового баланса урбанизированной поверхности, имеющие размерность  $\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$ . В локальном приближении зависимость  $f$  от  $q'_F$  при различных значениях  $k_s$  описана в [45] и представлена на рис. 5.

При уменьшении эффективного коэффициента температурной чувствительности обратная связь антропогенный поток тепла—температура может приводить к заметному усилению реакции температуры поверхности. В условиях слабой вентиляции при  $k_s$  порядка  $10 \text{ Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$  дополнительные изменения температуры могут составлять несколько градусов.

Воспроизведение полного годового цикла действия АНФ при изменениях климата XXI в. проведено на совместной модели климата с встроенным блоком ВЕМ в [35, 128, 129]. В [129] в дополнение к действию обратной связи  $T$ -АНФ учитывались и возможное антропогенное увеличение альbedo крыш. Прогнозируемые изменения энергопотребления показали, что увеличение альbedo снижает глобальное энергопотребление на кондиционирование, но увеличивает энергопотребление на нагревание, что находится в противофазе с действием парниковых газов.

В [130] были проведены эксперименты с совместной моделью мезомасштабных процессов и энергопотребления на нагревание и охлаждение для модельных городов сухого климата средних широт в зимних и летних условиях. В [130] варьировались плотность застройки и плотность населения, а также доля растительного покрова. Эксперименты показали, что в сухом климате средних широт компактные города минимизи-

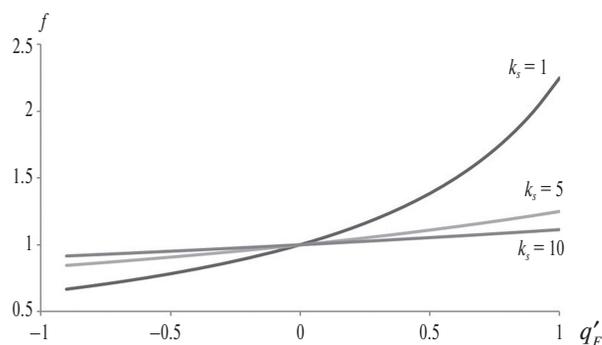


Рис. 5. Зависимость фактора обратной связи  $f$  от значений коэффициентов  $q'_F$  и  $k_s$ .

руют энергопотребление зданий, но увеличивают тепловой стресс снаружи помещений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования действия антропогенных обратных связей находятся в стадии развития. Этим, в частности, объясняются различия в терминологии и обозначениях, используемых в различных публикациях. Объектом исследования являются процессы, которые связывают между собой антропогенные модификации подстилающей поверхности и атмосферный отклик на эти процессы. Антропогенные процессы связаны не только с масштабами зданий и городских каньонов, но также с их кластеризацией. Это связано с горизонтальными масштабами систем управления теплотребления — городским районом и/или локальной климатической зоной, то есть с мезо-метеорологическими процессами.

Не только в глобальном, но и в мезо-метеорологическом масштабе антропогенные процессы оказывают существенное влияние на максимальные и максимально достижимые значения температуры воздуха, ее годовой и суточный ход. Авторы обзора планируют в дальнейшем развивать это направление исследований, которым они занимается последние четверть века [131, 132]. В последние годы все большее внимание уделяется исследованию возникновению экстремальных ситуаций, связанных с изменением климата и развитием энергетического хозяйства больших городов [133–135].

Приведенные в данном обзоре результаты исследований показали, что отклик атмосферы на антропогенные возмущения и влияние атмосферных процессов на энергопотребление городов очень ярко проявляется именно на масштабах городской агломерации и прилегающих территорий.

В обзоре не рассматривалось возможное действие связей загрязнения атмосферы с радиационными притоками и осадкообразованием, а также проблемы включения антропогенных обратных связей в численные гидродинамические модели, предназначенные для расчетов с более подробным горизонтальным разрешением.

Это связано с тем, что, с одной стороны, увеличение разрешения в моделях позволит описать городские каньоны, но, с другой стороны, даже это разрешение остается слишком грубым, чтобы разрешить процессы, связанные с обтеканием отдельных зданий и, следовательно, они должны быть параметризованы.

Такие параметризации сильно зависят от конкретной градостроительной среды и измеримых параметров зданий, в итоге схема параметризации оказывается своя для каждого города. Поэтому модельные расчеты свойств мезомасштабных эффектов антропогенного воздействия на климат городских агломераций имеют скорее оценочное, чем прогностическое значение.

При этом первые результаты моделирования действия антропогенных обратных связей показали важность их учета в мезо-метеорологических и климатических моделях, а также при оценке энергопотребления урбанизированных территорий в различных климатических и погодных условиях.

**Благодарности.** Авторы благодарят рецензентов за полезные замечания.

**Источник финансирования.** Обзор подготовлен при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00114).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. Cambridge—NY. Cambridge University Press. 2013. 1552 p.
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Solomon S., D. Qin M. Manning Z. Chen M. Marquis K.B. Averyt M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge—NY. Cambridge University Press. 2007. 996 p.
- Cess R.D. Global climate change: An investigation of atmospheric feedback mechanisms. *Tellus*. 1975. V. 27. P. 193–198.
- Paltridge G.W. Cloud-radiation feedback to climate. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1980. V. 106. P. 367–380.
- Hansen J., Lacis A., Rind D., Russell G., Stone P., Fung I., Ruedy R., Lerner J. Climate Sensitivity: analysis of feedback mechanisms. In *Climate Processes and Climate Sensitivity*. J.E. Hansen and T. Takahashi, Eds. AGU Geoph. Monogr. 29, Maurice Ewing Vol. 5. American Geophysical Union. P. 130–163.
- Cess R.D., Potter G.L., Blanchet J.P., Boer G.J., Del Genio A.D., Deque M., Dymnikov V., Galin V., Gates W.L., Ghan S.J., Kiehl J.T., Lacis A.A., Treut H.Le, Li Z.-X., Liang X.-Z., McAvaney B.J., Meleshko V.P., Mitchell J.F.B., Morcrette J.-J., Randall D.A., Rikus L., Roeckner E., Royer J.F., Schlese U., Sheinin D.A., Slingo A., Sokolov A.P., Taylor K.E., Washington W.M., Wetherald R.T., Yaga I., Zhang M.-H. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in seventeen atmospheric general circulation models. *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 16601–16615.
- National Research Council. *Understanding Climate Change Feedbacks*. Washington, DC: The National Academies Press. 2003. 166 p. <https://doi.org/10.17226/10850>
- Bony S., Colman R. et al. How well do we understand and evaluate climate feedback processes? // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 3445–3482.
- Understanding and responding to climate change: highlights of National academies reports. Washington, DC: The National Academies Press. 2008. 28 p.
- Klocke D., Quas J., Stevens B. Assessment of different metrics for physical climate feedbacks // *Clim. Dyn.* 2013. V. 41. P. 1173–1185.
- Knutti R., Rugenstein M.A.A. Feedbacks, climate sensitivity and the limits of linear feedbacks models // *Phil. Trans. Roy. Soc. A*. 2015. V. 373:20150146
- Merlis T.M. Interacting components of the top-of-atmosphere energy balance affect changes in regional surface temperature // *Geoph. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 7291–7297.
- Pielke Sr R.A. et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effects of greenhouse gases // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 2002. V. A360. P. 1–15.
- Pielke R.A. et al. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. // *Wiley Interdiscip. Rev.* 2011. V. 2. P. 828–850.
- Chapman S., Watson J.E.M., Salazar A., Thatcher M., McAlpine C.A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review // *Landscape Ecol.* 2017. V. 32, P. 1921–1935.
- Sailor D.J., Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas // *Atmospheric Environment* 2004. V. 38. P. 2737–2748
- Allen L., Lindberg F., Grimmond C.S.B. Global city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 1990–2005.

18. *Flanner M.G.* Integrating anthropogenic heat flux with global climate models // *Geoph. Res. Lett.* 2009. V. 36. L02801.
19. *Chaiisson E.J.* Long-term global heating from energy usage // *EOS, Trans. Amer. Geoph. Union.* 2008. V. 89. № 28. P. 253–254.
20. *Flato G.M.* Earth system models: an overview // *Wires Clim. Change.* 2011. V. 2. P. 783–800.
21. *Sailor D.J.* A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 189–199.
22. *Oke T.R.* The energetic basis of the urban heat island // *Quart. J. R. Met. Soc.* 1982. V. 108. № 455. P. 1–24.
23. *Oke T.R.* *Boundary layer climates* // London, Routledge. 1987. 435 p.
24. *Howard L.* *The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighborhood of the Metropolis.* V. 1. London: W. Phillips. 1818. 346 p.
25. *Arnfield A.J.* Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island // *Int. J. Climatol.* 2003. V. 23. P. 1–26.
26. *Masson V.* Urban surface modelling and mesoscale impact of cities // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. V. 84. P. 35–45.
27. *Crutzen P.J.* New directions: the growing urban heat and pollution “island” effect – impact on chemistry and climate. // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. P. 3539–3540.
28. *Kalnay E., Cai M.* Impact of urbanization and land-use change on climate // *Nature.* 2003. V. 423. P. 528–531.
29. *Parker D.E.* A demonstration that large-scale warming is not urban // 2006. *J. Clim.* V. 19. P. 2882–2895.
30. *Zhou L.M. et al.* Evidence for a significant urbanization effect on climate in China // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2014. V. 101. P. 9540–9544.
31. *Feng J.-M., Wang Y.-I., Ma Z.-J., Liu Y.-H.* Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China // *J. Clim.* 2012. V. 2012. P. 7187–7203.
32. *Feng J., Wang J., Yan Z.* Impact of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China // *Adv. Atmos. Sci.* 2014. V. 31. P. 363–373.
33. *Xie M., Liao J., Wang T., Zhu K., Zhuang R, Hah Y., Li M., Li S.* Modeling of the anthropogenic heat flux and its effect on regional meteorology and air quality over Yangtze River Delta // *Atm. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 6071–6089.
34. *McCarthy M.P., Best M.J., Betts R.A.* Climate change in cities due to global warming and urban effects // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L09705.
35. *Oleson K.W.* Contrasts between urban and rural climate in CCSM4 CMIP5 climate change scenarios. *J. Clim.* 2012. V. 25. P. 1390–1412.
36. *Argüeso D., Evans J. P., Fita L., Bormann K.J.* Temperature response to future urbanization and climate change // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 2183–2199.
37. *Arqueso D., Evans J.P., Di Lucca F.* Expansion of heat stress conditions under climate change conditions // *PloS. ONE.* 2015. V. 10. e117066.
38. *Labriet M. et al.* Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 2015. V. 20. P. 111–136.
39. *Isaac M., Van Vuuren D.P.* Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change // *Energy Policy.* 2009. V. 37. P. 507–521.
40. *Клименко В.В., Гинзбург А.С., Демченко П.Ф., Терешин А.Г., Белова И.Н., Касилова Е.В.* Влияние урбанизации и потепления климата на энергопотребление больших городов // *ДАН.* 2016. Т. 470. № 5. С. 519–524.
41. *Мохов И.И.* Связь интенсивности «острова тепла» города с его размерами и количеством населения // *ДАН.* 2009. Т. 427. № 4. С. 530–533.
42. *Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В.* Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях // *ДАН.* 2011. Т. 439. № 2. С. 256–259.
43. *Александров Г.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С.* Антропогенные потоки тепла в столичных агломерациях России и Китая // *ДАН.* 2014. Т. 457. № 1. С. 101–106.
44. *Гаврилова Ю.В., Смышляев С.П., Махура А.Г.* Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды // *Ученые записки РГМУ.* 2010. № 15. С. 107–116.
45. *Гинзбург А.С., Демченко П.Ф.* Обратные связи температурного режима и энергопотребления урбанизированных территорий // *Изв. РАН. ФАО.* 2017. Т. 53. № 5. С. 751–759.
46. *Демченко П.Ф., Гинзбург А.С.* Влияние обратных связей в системе «климат-энергетика» на интенсивность городского острова тепла // *Изв. РАН. ФАО.* 2018. Т. 54. № 4. С. 371–380.
47. *Kikegawa Y., Genchi Y., Yoshikado H., Kondo H.* Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings’ energy-demands // *Appl. Energy.* 2003. V. 76. P. 449–466.
48. *Солдатенко С.А., Юсупов Р.М.* Чувствительности нульмерной климатической модели и ее обратные связи в контексте проблемы управления погодой и климатом Земли // *Тр. СПИИРАН.* 2017. Т. 52. С. 5–31.
49. *Солдатенко С.А., Юсупов М.Р.* Оценка чувствительности климатической изменчивости к тепловой инерции и обратным связям в системе «атмосфера–океан» // *Изв. РАН. ФАО.* 2019. Т. 55. № 6. С. 114–126.

50. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 20–27.
51. Клименко В.В., Терешин А.Г., Касилова Е.В. Москва: естественный тестовый полигон для оценки последствий сильного потепления // ДАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 30–34
52. Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment // Energy Procedia. 2018. V. 149. P. 161–169.
53. Belova I.N., Ginzburg A.S., Krivenok L.A. Heating seasons length and degree days trends in Russian cities during last half century // Energy Procedia. 2018. V. 149. P. 373–379.
54. Ginzburg A.S., Dokukin S.A. Numerical modeling of anthropogenic heat flux impact on air temperature in Moscow in wintertime // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 211. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012019
55. Gutierrez E., Gonzalez J.E., Martilli A., Bornstein R., Arend M. Simulation of heat wave event in New York City using a multilayer urban parameterization // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2015. V. 54. P. 283–301.
56. Gutierrez E., Gonzalez J.E., Martilli A., Bornstein R. On the anthropogenic heat fluxes using an air conditioning evaporative cooling parameterization for mesoscale urban canopy models // J. Sol. Energ. Engineering. 2015b. V. 137. 051005-1.
57. Wang X., Li Y., Yang X., Chan P.W., Nichol J., Li Q. The street air warming phenomenon in a high-rise compact city // Atmosphere. 2018. V. 9. P. 402.
58. De Munck C., Pigeon G., Masson V., Meuner F., Tramuac B., Poef P., Merchaider C. How much can air conditioning increase air temperatures for city like Paris, France? // Int. J. Climatol. 2013. V. 33. P. 210–227.
59. Ohashi, Y., Genchi Y., Kondo H., Kikegawa Y., Yoshikado H., Hirano Y. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2007. V. 46. P. 66–81.
60. Takane Y., Kikegawa Y., Hara M., Ihara T., Ohashi Y., Sachiho A., Adachi S.A., Kondo H., Yamaguchig K., Kaneyasua N. A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity // Int. J. Climatol. 2017. V. 37 (Suppl. 1). P. 1035–1052.
61. Salamanca F., Martilli A., Yague C. A numerical study of the urban heat island during the DESIREX (2008) campaign with WRF and the evaluation of simple mitigation strategies // Int. J. Climatol. 2012. V. 38. P. 2372–2386
62. Krayenhoff E.C., Moustauoi M., Broadbent A.M., Gupta A.M., Georgescu M. Diurnal interaction between urban expansion, climate change and adaptation in US cities // Nature Climate Change. 2018. V. 18. P. 1097
63. Masson V. et al. Adaptive cities to climate change: A systematic modelling approach // Urb. Clim. 2014. V. 10. P. 407–429.
64. Stewart I.D., Oke T.R., Krayenhoff S.E. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations // International Journal of Climatology. 2014 V. 34. P. 1062–1080
65. Baklanov A., Molina L.T., Gauss M. Megacities, air quality and climate // Atm. Environ, 2016. V. 126. P. 235–249.
66. Folberth G.A., Rumbold S.T., Collins W.J., Butler T.M. Global radiative forcing and megacities // Urb. Clim. 2012. V. 1. P. 4–19.
67. Sun T., Grimmond C.S.B. Ni G.-H. How green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves // J. Geoph. Res. 2016. V. 121. P. 5320–5335.
68. Grimmond C.S.B., Cleugh H.A., Oke T.R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes // Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere. V. 25. № 3. P. 311–326. doi: 10.1016/0957-1272(91)90003-w
69. Pringer M., Joffre S. (Eds.) The urban surface energy budget and mixing height in European cities: Data, models and challenges for urban meteorology and air quality. Final Report of WG2 COST Action 715. 2005. 194 p.
70. Baklanov A., Mestayer P., Clappier A., Zilitinkevich S., Joffre S. et al. On the parameterization of the urban atmospheric sublayer in meteorological models // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2005, V. 5. P. 12119–12176
71. Barlow J.F. Progress in observing and modelling the urban boundary layer // Urban Climate. 2014. V. 10. P. 216–240.
72. Oke T.R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands // Atmosphere. 1976. V. 14. № 4. P. 268–277.
73. Wang K.S., Jiang J., Wang C., Zhou X., Wang X., Lee X. Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing meteorological network // J. Geoph. Res. Atmos. 2017. V. 122. P. 2131–2154.
74. Grimmond C.S.B. et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from Phase 1 // J. Appl. Met. Climatol. 2011. V. 49. P. 1268–1290.
75. Grimmond C.S.B. et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison // Int. J. Climatol. 2011. V. 31. P. 244–272.
76. Best M.J., Grimmond C.S.B. Investigation of the impact of anthropogenic heat flux within an urban land surface model and PILPS-urban // Theor. Appl. Climatol. 2016. V. 126. P. 51–60.
77. Martilli A. Current research and future challenges in urban mesoscale modelling // Int. J. Climatol. 2007. V. 27. P. 1909–1918.

78. *Chen F. et al.* The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // *Int. J. Climatology*. 2011. V. 31. P. 273–288.
79. *Salamanca F., Krpo A., Martilli A., Clappier A.* A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – Part I. Formulation, verification and a sensitive analysis of the model. *Theor Appl Climatol*. 2010. V. 99. P. 331–344.
80. *Oke T.R.* Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations // *Journal of Climatology*. 1981. V. 1. № 3. P. 237–254
81. *Zhao L., Lee X., Smith R.B., Oleson K.* Strong contributions of local background climate to urban heat islands // *Nature*. 2014. V. 511. P. 216–219.
82. *Ma S., Pitman A., Hart M., Evans J.P., Haghdad N., MacGill I.* The impact of an urban canopy and anthropogenic heat fluxes on Sydney's climate // *Int. J. Climatol*. 2017. V. 37. P. 255–270.
83. *Krayenhoff E.S., Martilli A., Bass B., Stull R.* Mesoscale simulation of urban heat mitigation strategies in Toronto, Canada // *Fifth International Conference on Urban Climate*. 2003, 1–5 September, Lodz, Poland.
84. *Oleson K.W., Bonan G.B., Feddema J., Vertenstein M., Grimmond C.S.B.* // An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities // *J. Appl. Meteor. Climatol*. 2008. V. 47. P. 1038–1060.
85. *Hamdia R., Schayes G.* Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics // *Int. J. Climatol*. 2008. V. 28. P. 973–982.
86. *Krayenhoff E.S., Voogt J.A.* Impacts of urban albedo increase on local air temperature at daily–annual time scales: model results and synthesis of previous work // *J. Appl. Meteorol. Climatol*. 2010. V. 49. P. 1634–1648.
87. *Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Ronda R.J., Heusinkveld B.G., Van Hove L.W.A., Holtslag A.A.M.* Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio // *Quart. J. Roy. Met. Soc*. 2014. V. 140. P. 2197–2210.
88. *Matrilli A., Clapier A., Rotach M.* An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // *Bound.-Layer Meteorol*. 2002. V. 104. P. 261–304.
89. *Bohnenstengel S.I., Hamilton I., Davies M., Belcher S.E.* Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*. 2014. V. 140. P. 687–698.
90. *Oke T.R.* City size and the urban heat island // *Atmos. Environ*. 1973. V. 7. P. 769–779.
91. *Yang X., Li Y., Luo Z., Chan P.W.* The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms // *Int. J. Climatol*. 2016. V. 37. P. 890–904.
92. *Wang Y., Li Y., Sabatino S.D., Martilli A., Chan P.W.* Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong // *Environ. Res. Lett*. 2018. V. 13. 034015.
93. *Zhang D.L.Y., Shou Y.X., Diskerson R.R., Chen J.* Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along Washington-Baltimore corridor // *J. Appl. Meteor. Climatol*. 2011. V. 50. P. 2012–2029.
94. *Bueno B., Roth M., Norford L., Li R.* Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighborhood scale // *Urban Climate*. 2014. V. 9. P. 35–53.
95. *Le Bras J., Masson V.* A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale // *Front. Earth Sci*. 2015. V. 3. P. 27.
96. *Atkinson B.W.* Numerical modelling of urban heat-island intensity. *Boundary-Layer Meteorol* // 2003. V. 109. P. 285–310.
97. *Taha H.* Episodic performance and sensitivity of the urbanized MM5 (uMM5) to perturbations in surface properties in Houston Texas // *Boundary-Layer Meteorol*. 2008. V. 127. № 2. P. 193–218.
98. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps, J., Tielemans, D., van Lipzig N.P.M.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer // *Geosci. Model. Dev*. 2016. V. 9. P. 3027–3054.
99. *González-Aparicio I., Baklanov A., Hidalgo J., Korsholm U., Nuterman R., Mahura A.* Impact of city expansion and increased heat fluxes scenarios on the urban boundary layer of Bilbao using EnviroHIRLAM // *Urban Clim*. 2014. V. 10. P. 831–845.
100. *Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., Kimura F.* A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. // 2001. *Bound.-Layer Meteorol*. V. 101. P. 329–358.
101. *Kusaka H., Kimura F.* Coupling single layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case // *J. Meteorol. Soc. Japan*. 2004. V. 82. P. 67–80.
102. *Martilli A.* Numerical study of urban impact on boundary layer structure: sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture // *J. Appl. Met*. 2002. V. 41. P. 1247–1266.
103. *Fan H., Sailor D.* Modelling the impact of anthropogenic heating on urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes // *Atmos. Environ*. 2005. V. 39. P. 73–84.
104. *Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K.* Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo // *Atmos. Environ*. 1999. V. 33. P. 3897–3909.
105. *Narumi D., Kondo A., Shimoda Y.* Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity // *Environ. Res*. 2009. V. 109. P. 421–431.
106. *Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R.* Anthropogenic and natu-

- ral drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 17573–17587.
107. *Li X.-X., Koh T.Y., Entekhabi D., Roth M., Panda J., Norford L.K.* A Multi-resolution ensemble study of a tropical urban environment and its interactions with the background regional atmosphere // *J. Geoph. Res.: Atmospheres*. 2013. V. 118. P. 9804–9818.
  108. *De Munck C., Lemonsu A., Bouzouidja R., Masson V., Claverie R.* The greenroof module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. P. 1941–1960.
  109. *Lee K., Baek H.-J., Cho C.H.* The estimation of base temperature for heating and cooling degree-days for Southern Korea // *J. Appl. Met/Clim.* 2014. V. 53. P. 300–309.
  110. *Fazelieli R., Ruth M., Davidsdottir B.* // Temperature response functions for residential energy demand // *Urban Climate*. 2016. V. 15. P. 45–59.
  111. *Ranson M., Morris L., Katz-Rubin A.* Climate change and space heating energy demand: A review of the literature // U.S. Environmental protection agency. 2014. NCEE Working Paper № 14–07. 44 p.
  112. *Auffhammer M., Mansur E.T.* Measuring Climatic Impacts on Energy Expenditures: A Review of the Empirical Literature. *Energy Economics*. 2014. V. 14. P. 522–530.
  113. *Hekkenberg M., Moil H.C., Schoot Uiterkamp A.J.M.* Dynamical temperature dependence patterns in future energy demand models in the context of climate change // *Energy*. 2009. V. 34. P. 1797–1806.
  114. *Hirano Y., Imura H., Ichinose T.* Effects of the heat island phenomenon on energy consumption in commercial and residential sectors of metropolitan Tokyo // *Proc. 7th Int. Conf. on Urban Climate*. 29 June–3 July, 2009, Yokohama, Japan.
  115. *De Rider K., Lauwaet D., Maiheu B.* UrbClim — fast urban boundary layer climate model // *Urban Climate*. 2015. V. 12. P. 21–48.
  116. *Oleson K.W., Bonan G.B., Feddema J., Jackson T.* An examination of urban heat island characteristics in a global climate model // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. P. 1848–1865.
  117. *Bueno B., Norford L., Pigeon G., Britter R.* Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model // *Boundary-Layer Meteorol.* 2011. V. 140 P. 471–489.
  118. *Bueno B., Pigeon G., Norford L.K., Zibouche K., Marchadier C.* Development and evaluation of building energy model integrated in the TEB scheme // *Geosci. Model Dev.* 2012. V. 5. P. 433–448.
  119. *Bueno B., Norford L., Pigeon G., Britter R.* A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate // *Build. Environ.* 2012a. V. 54. P. 116–125.
  120. *Masson V.* A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models // *Boundary-Layer Meteorol.* 2000. V. 94. P. 357–397.
  121. *Meng C.* Mitigating the surface urban heat island: mechanism study and sensitivity analysis // *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.* 2017. V. 53. P. 327–338.
  122. *Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D.* Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas // *Geosci. Model Dev.* 2012. V. 5. P. 1377–1393.
  123. *Sun T., E. Bou-Zeid E., Wang Z.-H., Zerba E., Ni G.-H.* Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically resolved model for heat and water transport // *Build. Environ.* 2013. V. 60. P. 211–224.
  124. *Masson V., Bonhomme M., Salagnac J.-L., Briottet X., Lemonsu A.* Solar panels reduce both global warming and urban heat island // *Front Environ Sci.* 2014. V. 2. P. 14.
  125. *Krpo A., Salamanca F., Martilli F., Clappier A.* On the impact of anthropogenic heat fluxes on the urban boundary layer: a two-dimensional numerical study // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2010. V. 136. P. 105–127
  126. *Salamanca F., Georgescu M., Mahalov A., Moustaooui M., Wang M.* Anthropogenic heating of the urban environment due to AC. // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 5949–5965.
  127. *Salamanca F., Georgescu M., Mahalov A., Moustaooui M., Martilli A.* Citywide impacts of cool roof and rooftop solar photovoltaic deployment on near-surface air temperature and cooling energy demand // *Boundary-Layer Meteorol.* 2016. V. 161. P. 203–221.
  128. *Oleson K.W., Bonan G.B., Feddema J., Vertenstein M., Grimmond C.S.B.* // An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2008. V. 47. P. 1061–1076.
  129. *Oleson K.W., Bonan G.B., Feddema J.* Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model // *Geoph. Res. Lett.* 2010. V. 37. L03701
  130. *Martilli A.* An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality // *Urban Climate*. 2014. V. 10. P. 430–446.
  131. *Демченко П.Ф., Вельтищев Н.Н., Гинзбург А.С., Голицын Г.С.* Оценка суточного цикла парникового эффекта CO<sub>2</sub> по одномерным моделям вертикальной структуры атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1994. Т. 30. № 5. С. 595–600.
  132. *Гинзбург А.С.* Региональные максимумы температуры воздуха и возможность их простых энергобалансовых оценок // *Изв. РАН. ФАО*. 2011. Т. 47. № 6. С. 722–728.
  133. *Zang G.-J., Cai M., Hu A.* Energy consumption and unexplained winter warming over northern Asia and North America // *Nature Clim. Change*. 2013. V. 3. P. 466–470.

134. *Auffhammer M., Baylis P., Hausman C.H.* Climate change is projected to have severe impacts on frequency and intensity of peak electricity demand across the United States // *Proc. Nat. Ac. Sci.* 2017. V. 114. P. 1886–1891.
135. *Tewari M., Salamanca F., Martilli A. Treinish L., Mahalov A.* Impacts of projected urban expansion and global warming on cooling energy demand over a semiarid region // *Atmos. Sci. Let.* 2017. V. 18. P. 419–426.

## **Anthropogenic Meso-meteorological Feedbacks: a Review of Recent Research**

**A. S. Ginzburg, P. F. Demchenko**

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science  
Pyzhevsky Avenue, 3, Moscow, 119017, Russia  
e-mail: gin@ifaran.ru*

Received: 19.07.2019

Accepted: 07.08.2019

The anthropogenic impact on the Earth's climate system is currently one of the main factors determining climate change on all spatial scales, from local to global. A lot of scientific research is devoted to the direct and indirect influence of various types of human activity on the state of the Earth's climate system. Using different climate models, feedbacks that enhance or weaken anthropogenic effects in the process of global warming have been studied in enough detail. Developed in recent years regional models of climatic and meteorological processes are allowing to describe in detail the climate features in urban agglomerations and the role of feedback in the development of mesoscale atmospheric processes. This review is devoted to the description and analysis of mesoscale feedbacks in the climate system, including the energy consumption of an urban economy that depends on climatic and weather conditions, and the role of these feedbacks in the formation and dynamics of urban climate and the needs of the urban economy in energy supply.

**Keywords:** climate system, mesoscale atmospheric processes, anthropogenic impact, positive and negative feedbacks, urban energy consumption.