

Г.В. Менжулин, А.А. Павловский

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ
ЕСТЕСТВЕННОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА
В МЕГАПОЛИСЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

G.V. Menzhulin, A.A. Pavlovskii

**COMBINED TECHNIQUE FOR ANALYSIS
OF NATURAL CLIMATE INFRACTIONS BY MEGACITIES:
EVALUATIONS FOR SAINT-PETERSBURG**

Рассматривается проблема возмущения естественного климатического режима в крупных городах. Развита комплексная методика реконструкции значений метеопараметров, которые имели место на территории мегаполиса, но при его гипотетическом отсутствии. Методика базируется на приемах интерполяции метеопараметров по ансамблю окружающих мегаполис станций. Обсуждаются результаты реконструкции исторической динамики метеорологических показателей в применении к виртуальному аналогу метеостанции Санкт-Петербург.

Ключевые слова: климат мегаполисов, пространственная интерполяция метеоэлементов.

The problem of natural climate perturbation in megacities is analyzed. The complex technique of meteorological values reconstruction which they have taken place in megacities but in their hypothetical absence is developed. The technique is based on the interpolation methodologies for meteorological parameters using the ensemble of the surrounding stations. The results of reconstruction of the historical time trajectories of meteorological parameters in application to St. Petersburg virtual analog weather station are discussed.

Key words: climate of big cities, spatial interpolation of meteorological parameters.

Введение

Одна из основных целей исследований по тематике особенностей мезоклимата современных урбанизированных территорий состоит в оценке степени возмущения естественного климатического режима и ее временной динамики на территории крупных городов. Авторами была предпринята попытка построить по возможности максимально универсальную методику такого оценивания, которая могла бы быть использована в применении к большинству мегаполисов вне зависимости от того, в каком географическом регионе он расположен. При разработке такой методики авторы, в первую очередь, ориентировались на использование ее в расчетах применительно к Санкт-Петербургу.

Проблема особенностей климатического режима в крупных городах в течение продолжительного времени привлекает к себе неослабевающее внимание ученых, в том числе и российских. Можно вспомнить об отечественных публикациях, имеющих, в основном, справочный характер. Однако цели отличия климата крупных городов от

естественного (невозмущенного антропогенными факторами) климата окружающих территорий в ранних разработках не преследовались. Количественный анализ закономерностей таких отличий и расчет соответствующих показателей стали предметом исследований по климатологии крупных городов в последние два десятилетия [8, 3, 6]. К сожалению, универсальные количественные методики такого анализа и до настоящего времени продолжают ждать своей разработки. Все полученные оценки различий в значениях климатических параметров в мегаполисах и на окружающей территории в ранее выполненных разработках получены при прямом сравнении данных наблюдений в мегаполисе и нескольких станциях вне его [1, 7, 10]. Это позволяет говорить лишь о знаке различий, делает получаемые результаты условными, ограничивает расчет количественных показателей их сезонной и многолетней динамики.

Не вызывает сомнений, что в последние десятилетия все ярче проявляются факты развивающегося глобального потепления. Очевидно, при неблагоприятных изменениях климата наиболее уязвимыми объектами глобальной инфраструктуры станут крупные города. В мегаполисах и агломерациях сконцентрированы большие массы населения, промышленные объекты, транспортные пути, объекты культуры и многое другое, что существенно увеличивает суммарную уязвимость урбанизированных территорий при изменениях климата. Другими словами, в крупных городах и на окружающих территориях в силу глобальности потепления значительно изменятся локальные климаты, и мегаполисы сами по себе дополняют эти изменения своими локально спровоцированными климатическими изменениями [9, 11]. В настоящее время для ряда крупных городов мира характерен такой климат, который мог бы иметь место на их территории (в случае отсутствия мегаполиса) через многие десятилетия. Более того, в крупных городах в силу специфики антропогенной нагрузки реализуются такие сочетания режимов различных метеорологических элементов, которые принципиально не могут реализоваться в естественных условиях даже в будущем. По этой причине не представляется возможным обсуждать экологические, инфраструктурные и другие проблемы будущего в применении к разным мегаполисам без изучения того сочетания климатических условий, которые сформировали и продолжают формировать их «искаженные климатические портреты».

Итак, конечной целью наших исследований является выявление особенностей динамики и расчет количественных характеристик формирования «антропогенного острова климата» Санкт-Петербурга, начиная с конца XIX — начала XX в. Для достижения этой цели авторами сделана попытка построить новые, ранее не применявшиеся полуэмпирические эмпирико-статистические модели, в которых используются различные схемы пространственной интерполяции среднемесячных величин климатических параметров, рассчитанных по данным измерений на метеорологических станциях, окружающих мегаполис.

Анализ репрезентативности исходных данных

Естественно называть совокупность окружающих Санкт-Петербург пунктов, на которых проводятся метеорологические наблюдения, его метеорологическим кустом. Принципиальная идея вычислений с использованием данных, полученных на

станциях Санкт-Петербургского куста, состоит в том, что данные наблюдений в самом мегаполисе в расчеты невозмущенных значений метеорологических элементов в его «географической точке» не используются. В вычислениях используются только географические координаты и высота метеорологической станции мегаполиса. Данные по метеорологической станции мегаполиса привлекаются только на заключительном этапе анализа — при сравнении интерполированных с окружающими мегаполис станций значений конкретного метеорологического элемента. По разности интерполированных и реально измеренных величин метеорологических параметров будет делаться вывод об уровне «возмущения» мегаполисом данного климатического параметра, то есть, какие значения параметра зафиксировала бы городская станция, если бы мегаполиса бы не существовало. Представляется удобным называть такую станцию виртуальной.

Общая логика подбора станций, включаемых в метеорологический куст мегаполиса, состоит в следующем. При валидации параметров той или иной методики расчета изменений климатических показателей в мегаполисе исследователю необходимо выбрать одну станцию из куста, находящуюся вне «климатического влияния» мегаполиса, по данным на которой будут рассчитываться параметры интерполяционных формул и будет анализироваться точность алгоритмов интерполяции. Такую станцию естественно называть спутниковой по отношению к мегаполису. Желательно, чтобы такая станция располагалась не вдалеке от него, но обязательно так, чтобы деформированный климатический режим на территории мегаполиса не искажал показания ее приборов. С одной стороны, такая станция должна быть удалена от мегаполиса не более чем на 100–150 км, с другой — расстояние до нее от города должно быть более 50 км. Применительно к Санкт-Петербургу в качестве спутниковой станции авторами чаще всего использовалась станция Белогорка. Что касается желательного расположения станций куста мегаполиса вокруг него, то этот вопрос требует особого внимания, так как решается по-разному в зависимости от алгоритмов интерполяции.

При отборе станций куста важно быть уверенным в том, чтобы на каждом шаге расчетов (каждый месяц всех расчетных лет) вычислительный алгоритм проводил анализ показателей пространственной однородности и симметричности расположения величин изучаемого метеоэлемента на станциях на линейке их значений относительно положения отметки его величины на спутниковой станции. Это становится понятным, если принять во внимание, что основная цель интерполяции не сможет считаться достигнутой, когда в какой-либо год-месяц на всех станциях куста значения метеоэлемента будут выше или ниже такового на спутниковой станции. Заметим, что вопрос выбора станций для метеорологического куста мегаполиса в отдельных случаях не удавалось решить в полностью автоматическом режиме, поэтому авторам приходилось прибегать к использованию некоторых эвристических приемов, которые реализовывались при интерактивной работе с алгоритмом отбора.

Интерполяция сглаженных значений метеоэлементов

Очевидно, что всем требованиям по качеству и репрезентативности данных наблюдений на станциях метеорологического куста мегаполиса удовлетворить непросто. Отсевание нерепрезентативных для проведения пространственной интерполяции

данных ежегодных наблюдений решается неоднозначно и порой требует привлечения интерактивных приемов работы с разработанными алгоритмами, что при проведении массовых расчетов крайне неудобно. Поэтому найти способы применения для этой цели более универсальные приемы «облагораживания» исходной эмпирической информации представляется весьма желательным.

В метеорологии известен прием «облагораживания» примитивных рядов ежегодных или ежемесячных данных, который позволяет отчасти избавиться от высокочастотной компоненты их изменчивости, — это временное сглаживание. Если иметь в виду применение такого приема, можно предложить использовать в качестве пространственно интерполируемых величин сглаженные по нескольку лет метеоданные. Использование в качестве «прединтерполяционной» процедуры многолетнего сглаживания имеет большое значение для таких «капризных» метеорологических параметров, как облачность, характеристики солнечной радиации и, в особенности, атмосферные осадки. Перечисленные метеопараметры характеризуются высокой пространственно-временной изменчивостью, что в нашем случае существенно затрудняет получение достоверных выводов. Можно надеяться, что подвергнув ряды среднемесячных значений метеоэлементов скользящему многолетнему сглаживанию, мы, отфильтровав мелкомасштабную компоненту их изменчивости, уменьшим трудности нахождения обоснованных решений задачи пространственной интерполяции.

Прединтерполяционная обработка исходной информации

Несмотря на то, что в случае Санкт-Петербургского метеорологического куста проблема различий в высотах расположения станций не является особенно существенной, так как высоты расположения первоначально выбранных станций куста не превышают 100–130 м, данный вопрос может стать важным при построении эмпирических моделей для мегаполисов, расположенных на более сложных по орографии территориях. Поэтому универсальная методика расчета закономерностей нарушения естественного климата в пределах крупных городов должна предусматривать расчеты по приведению исходных эмпирических данных к единому уровню (уровню моря или уровню расположения мегаполиса). Подчеркнем, что в нашем случае это относится не только к первородным данным по среднемесячным значениям метеопараметров, но и к их скользящим средним значениям для выбранных нами временных промежутков (например, 3-, 5-, 7-, 9-, 11-летним скользящим средним).

Алгоритм расчетов по приведению исходных данных по каждому метеорологическому параметру к одному уровню реализовывал следующую процедуру. Применительно к каждой станции метеорологического куста мегаполиса производился поиск трех окружающих ее станций, лежащих в вершинах такого треугольника, для которого отношение площади к периметру максимально. Затем, при обращении к известному уравнению гиперплоскости в четырехмерном пространстве рассчитываются параметры a_φ , a_λ и a_h , аппроксимирующие линейную зависимость значений исследуемого метеоэлемента от широты φ , долготы λ и высоты h . Последний из этих трех параметров использовался в расчетах по приведению значения метеоэлемента к уровню расположения мегаполиса или спутниковой для него станции. В каждом

случае такого расчета каждой из четырех участвующих в нем станций приписывалось найденное значение параметра a_h . Заметим, что случаев использования данных наблюдений на каждой из станций метеорологического куста мегаполиса было столько, сколько раз она привлекалась к расчетам в качестве центральной или периферийной для четверок станций, определяющих положение соответствующих ей локальных гиперплоскостей. В конечном счете «в списке» для каждой станции накапливалось до пяти значений параметра линейной зависимости значений метеоэлемента от высоты, среднее по которым использовалось в процедуре приведения данных к одному уровню. Как показали расчеты для Санкт-Петербурга, в применении к каждому метеоэлементу эти несколько значений параметра a_h для каждой станции из его куста оказались довольно близкими друг к другу, что позволило считать гипотезу о линейной зависимости значений метеоэлементов от высоты расположения станции вполне справедливой.

Полуэмпирическая модель интерполяции

Нами использовался подход, базирующийся на универсальной методике двумерной интерполяции, реализующей алгоритм расчета различающихся от года к году весов, вычисляемых для каждой из станций метеорологического куста мегаполиса в применении к среднемесячным значениям метеоэлемента для всех двенадцати месяцев года. При этом значения метеоэлементов, были приведены к уровню мегаполиса. Будем называть такой подход полуэмпирической моделью интерполяции.

Согласно алгоритму этой модели, значения метеорологических элементов на станциях метеорологического куста мегаполиса интерполируются с использованием данных о географических координатах каждой из них на спутниковую станцию (или несколько таких станций), с тем, чтобы оценить значения параметров априорно выбранной интерполяционной формулы (или нескольких формул), которые обеспечивают максимально возможную точность расчетов в применении к спутниковой станции. Алгоритм, использованный в расчетах по этой методике, реализовывал поиск двух параметров интерполяционной формулы, обеспечивающих минимум невязки между измеренными на спутниковой станции и интерполированными на ее координаты значениями метеоэлемента в каждый месяц каждого года на всем временном промежутке сравнения. Например, в случае выбора экспоненциальной формулы для описания спада веса метеоэлемента Y , измеренного на станции k в месяц j года i в показания приборов спутниковой станции при увеличении удаленности r_{ok} станции k от нее, минимизируемый функционал имеет вид

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M Y_{ij,k} \exp\left[-(r_{ok}/\rho_{ij})^{n_{ij}}\right]}{\sum_{k=1}^M \exp\left[-(r_{ok}/\rho_{ij})^{n_{ij}}\right]} - Y_{ij,o} \right| = \min,$$

где M — количество станций в метеокусте мегаполиса (помимо спутниковой).

Задача нахождения значений эмпирических параметров ρ_{ij} и n_{ij} , обеспечивающих минимум соответствующих функционалов, решалась методом наискорейшего спуска.

Безусловно, успех нахождения точного решения данной задачи зависит от многих обстоятельств. Предположим, что при наличии вокруг спутниковой станции небольшого количества вовлеченных в расчеты станций куста, на самой спутниковой станции в конкретный месяц конкретного года по причине погодных особенностей сформировалась аномалия, когда значение метеоэлемента находится вне естественного диапазона его значений на окружающих станциях или когда данные наблюдений оказались ошибочными. В таких случаях бывает невозможно найти абсолютно точное решение задачи о минимизации функционала невязки, то есть задача минимизации ни при каких значениях эмпирических параметров интерполяционной формулы ρ и n теоретически не имеет точного решения. В таких случаях вновь можно поставить вопрос о необходимости привлечения как можно большего количества станций. Однако можно ожидать, что и при корректировке набора станций нахождение абсолютно точного решения задачи интерполяции (обращения в нуль невязки) не всегда возможно. Тем не менее, в численных экспериментах удалось показать, что при увеличении количества станций количество точных решений задачи минимизации невязки возрастает. По мнению авторов, не стоит полностью отбраковывать результаты менее точных вычислений применительно к отдельным годо-месяцам. Заметим, что в случаях невозможности найти решение задачи с использованием нашего базового алгоритма полуэмпирической интерполяции, в расчетах применялись и другие методики, позволяющие скорректировать неудовлетворяющие нас по точности результаты. Эти методики описаны ниже.

Объективная интерполяция

Подход, базирующийся на методах объективного анализа, позволяет рассчитать веса метеостанций куста мегаполиса, не отличающиеся от года к году, то есть только усредненные показатели в применении ко всем годам изучаемого периода. Вместе с тем, методика двумерной пространственной интерполяции, частично базирующаяся на приемах объективного анализа, нами также использовалась. В некоторых случаях появления недостаточно надежных данных применительно к отдельным (экстремальным) годам такие расчеты помогали откорректировать получаемые оценки. В целом же, в силу отмеченной ограниченности ее возможностей, такая модель применялась в наших расчетах эпизодически — для проверки результатов, полученных другими методами.

Локально-линейная интерполяция

Суть этой методики состоит в следующем. Вначале мегаполис окружается четырьмя метеорологическими станциями из всего набора привлеченных к расчетам станций. На первом шаге таких расчетов в качестве станций окружения выступают четыре ближайшие, но расположенные вне территории воздействия мегаполиса станции. После расчета параметров уравнения гиперплоскости в четырехмерном пространстве «метеоэлемент—широта—долгота—высота» для первого случая конфигурации

метеостанций вокруг мегаполиса рассчитываются параметры линейной зависимости метеоэлемента от координат и вычисляется его значение в точке расположения мегаполиса. На следующем шаге расчетов по данной методике рассчитываются параметры линейной зависимости значений метеоэлемента для другой четверки метеостанций, также содержащей внутри себя мегаполис. С привлечением построенного уравнения гиперплоскости получается вторая оценка значения метеоэлемента в точке расположения мегаполиса. На третьем шаге такая процедура проводится с использованием третьего набора из четырех метеостанций и так далее. Желательно, чтобы при формировании каждого последующего набора четверки станций три из предыдущего их набора использовались в последующем расчете. Повторим, что такая процедура проводится в применении к тому случаю «годо-месяца», расчеты для которого по описанной выше базовой методике эмпирической интерполяции не обеспечили желаемой точности. Проводя такую процедуру, мы можем выявить ту метеостанцию, данные по которой являются причиной нарушения точности расчета по базовой методике. Если при исключении данной станции и при повторном расчете желаемая точность будет достигнута и значения верифицируемых параметров интерполяционной формулы примут приемлемые значения, считается, что применительно к этому (выбывающемуся) «годо-месяцу» решение задачи найдено. Если же такая цель при проведении описанной процедуры не достигается, то считается приемлемым использование в качестве окончательной оценки значения метеоэлемента, рассчитанного по наборам из четырех окружающих мегаполис станций, для которых оценки оказывались близкими друг к другу. В самом крайнем случае, когда и этого не удавалось достичь, оценки для данного «годо-месяца» отбраковывались. Подобные крайние случаи в наших расчетах были эпизодическими.

Четырехмерная пространственная регрессия

Реализация описанной процедуры выявления аномальных «годо-месяцев» достаточно трудоемка, поэтому в ряде случаев нами использовался более быстрый, но менее точный вычислительный прием, который можно назвать четвертой процедурой интерполяции. Его алгоритм базируется на проведении гиперплоскости с использованием данных по выбранному «годо-месяцу» для всех отобранных станций метеорологического куста мегаполиса. Понятно, что такая процедура может быть реализована только в модели, базирующейся на методе наименьших квадратов при построении четырехпараметрической регрессионной зависимости значений метеоэлемента (три сомножителя при широте, долготе, высоте плюс константа). Такая технология оказалась весьма полезной в случае ее применения на начальном этапе интерполяционных расчетов, когда полезно было представить себе пространственную картину поля исследуемого метеоэлемента в целом на окружающей мегаполис территории в конкретный год-месяц. Базируясь на результатах таких расчетов, появлялась возможность выявить те «годо-месяцы», которые можно назвать аномальными, приводящими к существенной потере точности расчетов по базовой методике. Такие «годо-месяцы» можно было заранее или выводить из расчетов, или данные по таким станциям исключать из анализа.

Результаты и обсуждение

Использованные подходы составили единую комплексную методику, отдельные модели которой привлекались к расчетам с учетом специфики поля конкретных метеорологических элементов в конкретный год-месяц. В качестве примера могут послужить расчеты, проведенные применительно к таким существенно различающимся по характерным масштабам пространственных и временных неоднородностей, как температура приземного воздуха и атмосферные осадки. В первом случае методика интерполяции может быть ориентирована на возможность привлечения к расчетам не только близких к паре мегаполис – спутниковая станция, но и удаленных метеостанций, во втором же случае эффект от удаленных станций будет заведомо менее существенным. Поэтому даже если в расчетах в обоих случаях и привлекались все (или большинство) из разработанных методик интерполяции, следует принимать во внимание, что предпочтение результатам расчетов в каждом конкретном случае нами отдавалось разным методикам вплоть до того, что результаты некоторых расчетов отбраковывались.

Термический режим. На первом этапе расчетов данные о среднемесячных значениях температуры, также как и среднемесячных минимальных и максимальных ее величин, для каждой из выбранных метеорологических станций и все годо-месяцы приводились к одному уровню — уровню мегаполиса с использованием процедуры расчета параметров локальных гиперплоскостей. Затем реализовывалась сама процедура интерполяции на показания метеостанции, например, Белогорка, как спутниковой для Санкт-Петербурга пункта. В подавляющем большинстве годо-месяцев, привлеченных к расчетам температурных рядов с применением алгоритма эмпирической интерполяции, при реконструкции значений температуры для спутникового пункта удалось достичь уровня невязки, меньшего $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Приблизительно для 3 % случаев, характеризующихся усложненной пространственной картиной поля среднемесячной температуры, когда невязка расчетов по алгоритму эмпирической интерполяции превышала эту величину, проводились вычисления по методике «локальных гиперплоскостей», что позволило довести точность оценок для «выбывающих» годо-месяцев до приемлемого уровня.

На рис. 1 приведен график динамики среднегодовой температуры на виртуальной станции Санкт-Петербург. Расчеты показали, что во все годы после начала 20-го столетия величины среднегодовой температуры приземного воздуха, вычисленные по данным наблюдений (черные точки), превышают значения температуры, рассчитанные для виртуальной станции (серые точки). Подчеркнем, что различия между трендовыми значениями среднегодовой температуры на станции Санкт-Петербург и виртуальной станции со временем возрастают. Так, угол наклона линейного тренда для среднегодовой температуры в Санкт-Петербурге в прошедшем столетии при его расчете по показаниям городской станции завьшается более чем на 25 %. Из графиков видно, что величина завьшения реконструированных значений средней годовой температуры в каждый год исследованного промежутка времени различна, что связано с естественной изменчивостью метеорологического режима приземного слоя воздуха. Однако в те периоды, когда следует ожидать уменьшения такого прироста, например, в годы военной блокады города, он уменьшен.

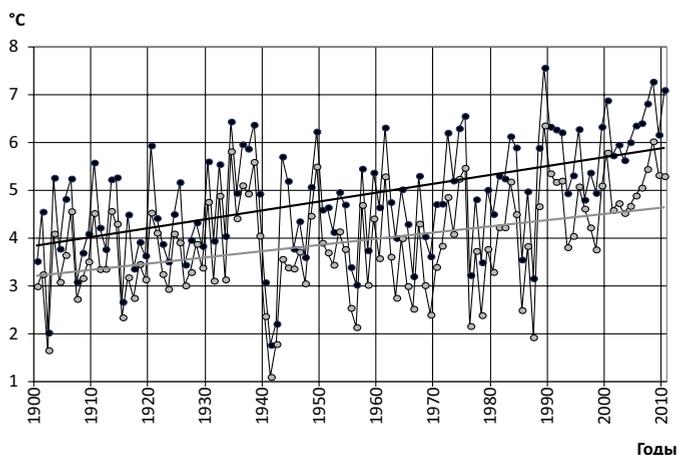


Рис. 1. Динамика среднегодовых значений температуры приземного воздуха в Санкт-Петербурге и их линейные тренды: черные точки и линия — расчет по данным измерений на городской станции; серые точки и линия — расчет по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом термического режима (на виртуальной станции)

Расчеты показали, что величина прироста температуры приземного воздуха (эффект острова тепла) имеет явно выраженный сезонный ход, который демонстрируют графики на рис. 2, иллюстрирующие проявление этого эффекта в центральные месяцы четырех сезонов года. Из графиков видно, что в наибольшей степени эффект острова тепла в Санкт-Петербурге проявляется поздней осенью и в зимний сезон — линейная аппроксимация временной динамики этого эффекта от начала прошедшего столетия до 2010 г. указывает на его увеличение на $1,38^{\circ}\text{C}$. На линии динамики прироста среднемесячных значений температуры приземного воздуха в январе, так же, как и на линии их среднегодового прироста, проявляется минимум 1940-х гг. Прирост температуры в весенний сезон за счет эффекта острова тепла в Санкт-Петербурге существенно меньше. В апреле согласно оценкам по линейному тренду прирост температуры приземного воздуха от эффекта острова тепла от начала XX в. увеличился не более чем на $0,35^{\circ}\text{C}$. Согласно графику на рис. 2, для июля эффект острова тепла в Санкт-Петербурге также выявляется слабее, чем в зимний сезон, прирост температуры в июле при оценке по линейному тренду за все прошедшее столетие составил $0,70^{\circ}\text{C}$. В осенний же сезон к 2010 г. по сравнению с началом XIX столетия оценка прироста температуры приземного воздуха за счет эффекта острова тепла по тренду приближается к оценке для зимнего сезона и составляет $1,15^{\circ}\text{C}$.

Интересными представляются результаты расчетов разности среднемесячной минимальной, рассчитанной с использованием данных измерений на станции Санкт-Петербург, и реконструированной по методикам интерполяции на аналогичной ему виртуальной станции. Прирост средней минимальной температуры за счет роста острова тепла в Санкт-Петербурге заметно превосходит такой прирост для ее средних месячных значений. Если для среднемесячной температуры в январе такой прирост составил $1,38^{\circ}$, то для средней минимальной температуры он оказался равным $2,27^{\circ}\text{C}$. Это факт указывает на то,

что эффект острова тепла в мегаполисе в первую очередь связан с повышением температуры ночью в зимний сезон. Этот эффект ранее упоминался в известных публикациях [2].

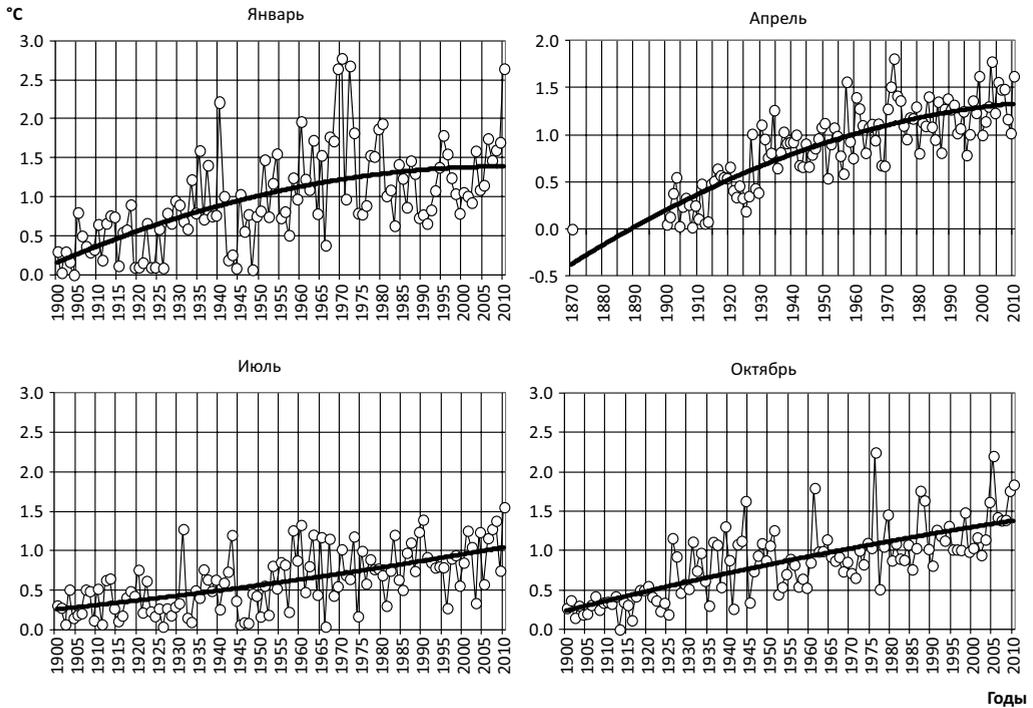


Рис. 2. Динамика и линейные тренды разности значений среднемесячной температуры приземного воздуха в центральные месяцы сезонов года в Санкт-Петербурге, рассчитанные по данным измерений на городской станции и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом термического режима (на виртуальной станции)

Непосредственное отношение к эффекту острова тепла имеет изменение суточной амплитуды температуры приземного воздуха на территории мегаполиса по сравнению с ее реконструированным значением. Возмущение мегаполисом значений этого метеорологического показателя определяется несимметричными изменениями температуры на территории острова тепла в дневное и ночное время. Расчеты по построенной методике, проведенные применительно к оценке влияния мегаполиса на режим среднемесячной максимальной температуры, хотя и выявили определенные изменения по отношению к невозмущенному режиму этого элемента на виртуальной метеостанции, но такое влияние оказалось не столь существенным.

Небезынтересны результаты расчетов влияния мегаполиса на суточную амплитуду температуры приземного воздуха, которая для Санкт-Петербурга и станций его климатического куста вычислялась как помесячно осредненная разность суточных показаний максимального и минимального термометров, так и по данным о среднемесячных

значениях этих метеопараметров. Оба способа расчета этой характеристики привели к близким результатам. На графиках рис. 3 представлена динамика нормированного сокращения суточной амплитуды температуры в мегаполисе в процентах от ее невозмущенных значений на виртуальной станции. Расчеты показали, что наибольшему влиянию городского острова тепла подверглись среднемесячные величины суточной амплитуды температуры в зимний сезон. Так, согласно линейному тренду, «размах» суточных колебаний температуры приземного воздуха в январе в Санкт-Петербурге уменьшен более чем на 35 % от его реконструированных значений. Оценки такого сокращения в апреле и июле меньше и составляют, соответственно, 13 и 8 %; для октября она выше почти в два раза, чем в июле.

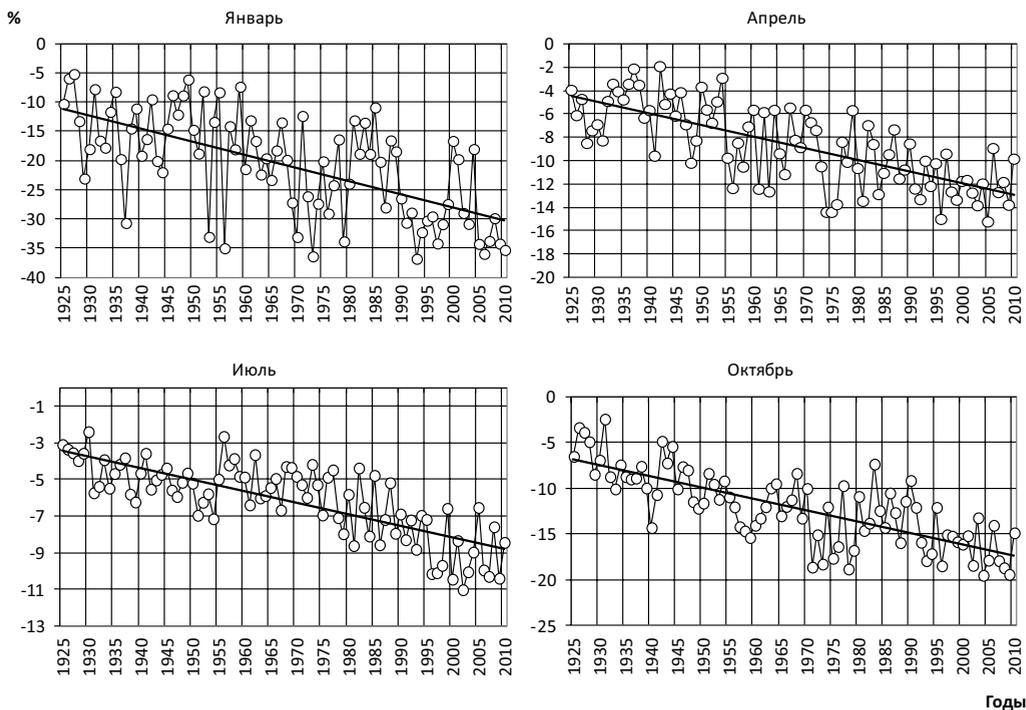


Рис. 3. Динамика и линейные тренды нормированной разности среднемесячной суточной амплитуды температуры приземного воздуха в центральные месяцы сезонов года, рассчитанной по данным измерений на городской станции и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом термического режима (на виртуальной станции)

Прибегнув к процедуре экстраполяции назад, можно получить оценку даты, когда эффект острова тепла в растущем Санкт-Петербурге стал его отличительной чертой. Так, например, проводя такую экстраполяцию назад по квадратичному тренду динамики разности температуры воздуха в апреле (см. рис. 2) можно заключить, что первые проявления феномена острова тепла в Санкт-Петербурге приходится на десятилетие

1885–1895 гг., когда население города возросло до 800 тыс. человек. Справедливости ради следует отметить, что понятие даты начала проявления феномена острова тепла условное, так как в теоретическом смысле любой город начинает формировать свой климат с самого начала своего существования.

Влажность приземного воздуха. Вопрос о влиянии мегаполиса на режим влажности воздуха является важным для изучения проблемы закономерностей формирования климата крупных городов. Из наиболее существенных отечественных публикаций по этому вопросу в применении к Санкт-Петербургу следует упомянуть публикации сотрудников научно-исследовательских институтов Санкт-Петербурга [8, 2]. Нами использовались данные из архивов среднемесячных, среднесуточных и, частично, срочных значений упругости водяного пара и температуры, накопленных во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации. Материал наблюдений по упругости водяного пара подвергался предварительной обработке с целью приведения значений упругости водяного пара к одному высотному уровню.

Графики на рис. 4 иллюстрируют вековую динамику среднегодовых значений упругости водяного пара в Санкт-Петербурге, рассчитанную по данным наблюдений, а также результаты реконструкции динамики ненарушенных мегаполисом значений упругости водяного пара на виртуальной станции. Видно, что уже с начала прошедшего столетия среднегодовые значения абсолютной влажности воздуха в Санкт-Петербурге хотя и не на большую величину (около 0,15 миллибара), но устойчиво превосходили невозмущенные мегаполисом величины упругости на виртуальной станции. К середине 20-го столетия такая разница достигла 25 %. К настоящему времени степень «нарушения» мегаполисом режима влажности приземного воздуха по величине прироста оценивается величиной, равной одной трети миллибара.

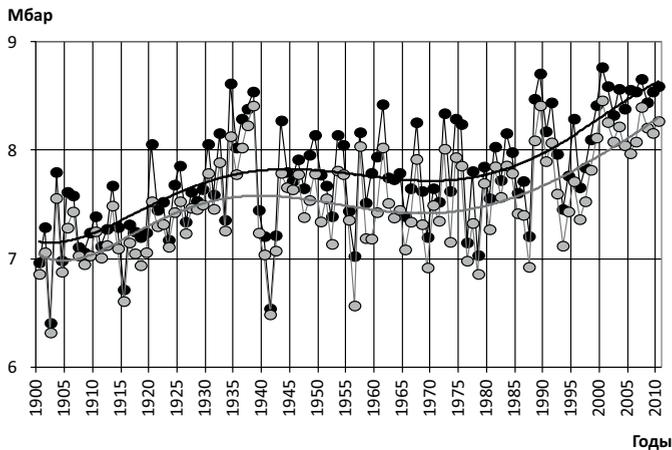


Рис. 4. Динамика среднегодовых значений упругости водяного пара в приземном воздухе и их полиномиальные тренды, рассчитанные по данным измерений на городской станции (черные точки и линии) и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом метеорологического режима (на виртуальной станции) (серые точки и линии)

Расчеты показали, что реконструированные значения абсолютной влажности воздуха в городе во все сезоны года ниже измеренных значений. На четырех графиках рис. 5 в применении к центральным месяцам каждого сезона показана вековая динамика увеличения парциального давления водяного пара в приземном воздухе в процентах от его значений, характерных для невозмущенного мегаполисом режима влажности на виртуальной станции. Согласно оценкам уже в начальные годы прошедшего столетия, в приземном воздухе города упругость водяного пара была повышена на 1–2 %. К началу второй декады текущего столетия в апреле такое повышение по линейному тренду превысило в апреле 10 %, в январе — 7,5 %, в июле и октябре — 4,5 %.

Экстраполяция назад (в последнюю треть XIX столетия) показывает, что начало развития «острова повышенной влажности» на территории мегаполиса Санкт-Петербург приходится на 1880–1890 гг. Характерно, что форма сглаженных трендов динамики прироста нормированной величины упругости водяного пара в приземном воздухе Санкт-Петербурга пока не дает оснований полагать, что они проявляют тенденцию к уменьшению своего роста.

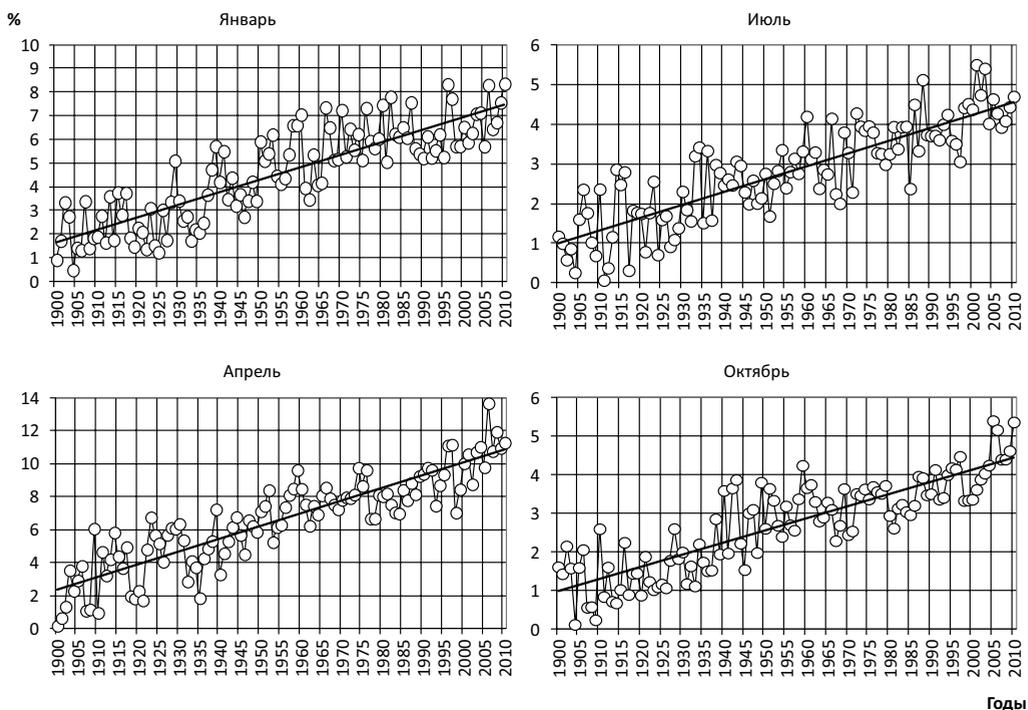


Рис. 5. Динамика и линейные тренды нормированной разности среднемесячных значений упругости водяного пара в приземном воздухе в центральные месяцы четырех сезонов года, рассчитанные по данным измерений на городской станции и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом метеорологического режима (на виртуальной станции)

Помимо абсолютной влажности авторами исследовались среднемесячные значения относительной влажности в Санкт-Петербурге и станциях его метеорологического куста. На четырех графиках рис. 6 представлены результаты вычислений временной динамики нормированных разностей значений относительной влажности приземного воздуха, измеренных на станции Санкт-Петербург, и ее виртуального аналога. Разности между возмущенными и невозмущенными значениями относительной влажности нормированы на данные реальных измерений.

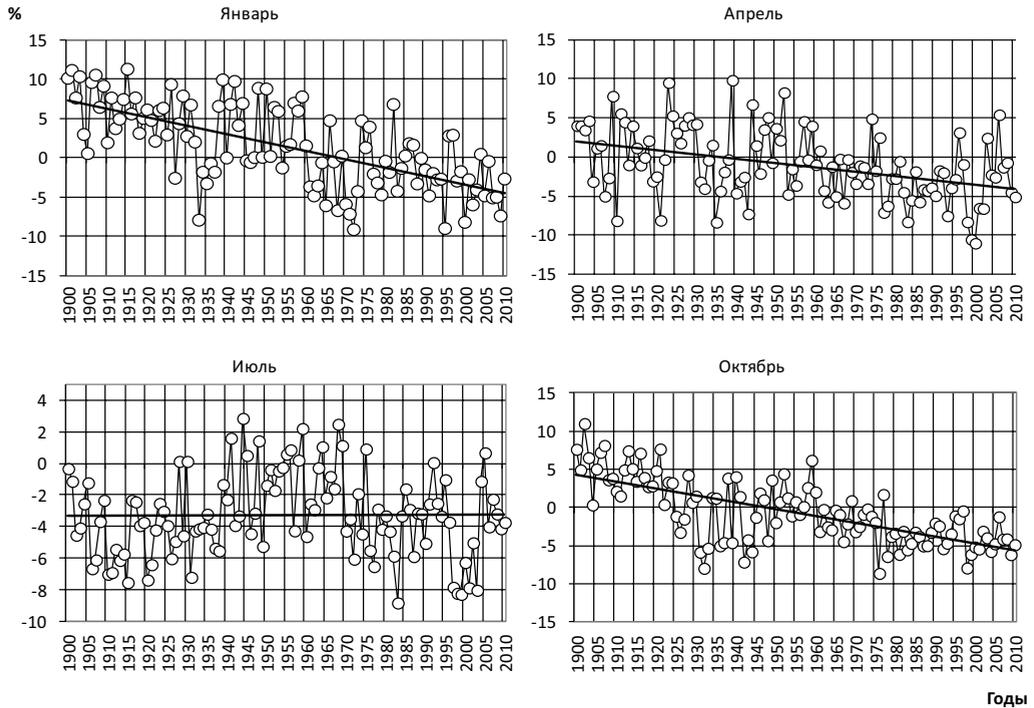


Рис. 6. Динамика и линейные тренды нормированной разности среднемесячной относительной влажности приземного воздуха в центральные месяцы четырех сезонов года, рассчитанные по данным измерений на городской станции и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом метеорологического режима (на виртуальной станции)

Отрицательные значения величин, отложенных на графиках рис. 6, демонстрируют, что относительная влажность воздуха в реальных условиях мегаполиса оказывается меньше, чем на виртуальной станции. Случай, когда трендовая линия нормированных величин относительной влажности спадает и пересекает нулевой уровень, означает, что прирост температуры в своей динамике превалирует над приростом содержания водяного пара в воздухе. Или, говоря по-другому, приземный воздух, становясь более теплым в силу эффекта острова тепла, мог бы «вместить» большее количество водяного пара, оставаясь насыщенным на ту же долю, что и более холодный воздух на виртуальной станции. По

линейному тренду для Санкт-Петербурга в последние сто лет такой спад составил: для января и октября — около 10 %, для апреля — 5 %. Сказанное позволяет сделать вывод, что динамика изменений относительной влажности приземного воздуха в Санкт-Петербурге, в первую очередь, определяется возрастанием температуры и в меньшей степени приростом содержания водяного пара. Оценивая в целом величину различия в значениях относительной влажности воздуха в Санкт-Петербурге и на окружающей территории, можно сказать, что воздух мегаполиса в определенной степени стал на 6–8 % суше.

Атмосферное давление

Атмосферное давление и его изменения во времени являются важнейшими показателями состояния и изменений климата изучаемого региона. Давление, как и температура, является интенсивным термодинамическим параметром, что в применении к нашему исследованию, в особенности при анализе среднемесячных его значений, в значительной степени делают задачу его интерполяции решаемой надежнее, чем в случае других метеорологических элементов. Это проявилось в том, что, как и в случае интерполяции температуры в пределах территории, занимаемой станциями санкт-петербургского куста, нам не пришлось сталкиваться с трудностями «комбинированного» использования построенных методик приведения. Другими словами, в расчетах с использованием данных по приведенному давлению, выполненных по методике эмпирической интерполяции, практически не возникало проблем с корректировкой результатов для отдельных «годо-месяцев», потребовавших привлечения альтернативных приемов интерполяции. Это еще раз говорит о том, что методика эмпирической интерполяции в применении к данным по атмосферному давлению, как интенсивному термодинамическому параметру, является вполне надежной.

На рис. 7 представлена временная динамика среднегодовых значений атмосферного давления, рассчитанных по данным измерений на станции Санкт-Петербург и на виртуальной станции, а также кривые их сглаженной динамики. Обращает на себя внимание, что хорошо выявляется синхронность колебаний метеоэлемента на реальной станции и на ее виртуальном аналоге. Отметим существенный скачок атмосферного давления вверх (примерно на шесть миллибар) на виртуальной станции в пятилетие 1955–1960 гг. Такой довольно неожиданный результат, естественно, вызвал подозрение на ошибку или в исходных данных, или в алгоритме вычислений. С целью более детального анализа этого эффекта были проведены расчеты динамики нарушения мегаполисом поля давления применительно ко всем месяцам года.

На графиках рис. 8 представлены результаты таких расчетов для центральных месяцев всех сезонов года. Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам. В зимние месяцы значительных проявлений указанного скачка виртуального давления расчеты не выявили. Также можно отметить, что на временной траектории давления, интерполированного на виртуальную станцию с метеостанций санкт-петербургского куста, не отмечается сколь-нибудь существенного скачка в период 1955–1960 гг. Применительно к графику для апреля можно обратить внимание лишь на период некоторого подъема давления, начавшегося в 1940–1945 гг., что, согласно линии тенденции, отражается в поведении кривой виртуального давления.

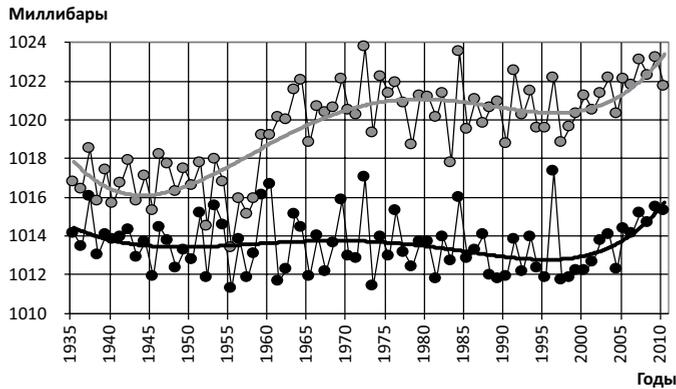


Рис. 7. Динамика и полиномиальный тренд среднегодовых значений атмосферного давления, рассчитанные по данным измерений на городской станции (черные точки и линии) и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом метеорологического режима (на виртуальной станции) (серые точки и линии)

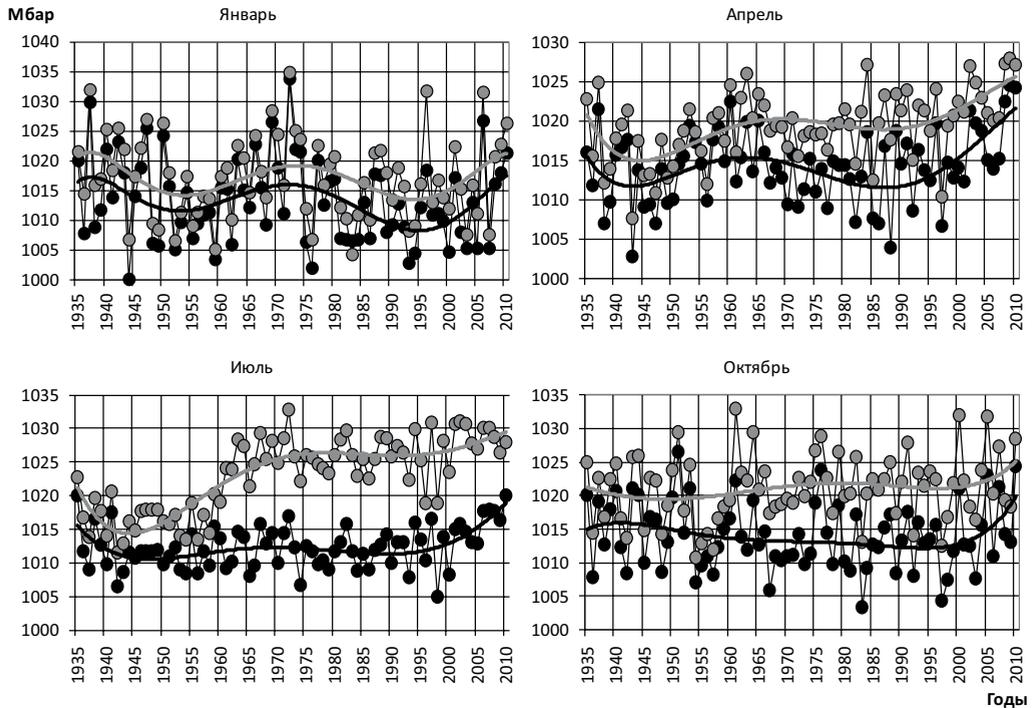


Рис. 8. Динамика нормированной разности месячных сумм продолжительности солнечного сияния в центральные месяцы четырех сезонов года, рассчитанной по данным измерений на городской станции (черные точки и линии) и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом метеорологического режима (на виртуальной станции) (серые точки и линии)

Результаты расчетов для мая, июня, июля и августа, показывают, что первые признаки скачка давления в указанное ранее пятилетие проявляются на кривой его временной динамики в мае. В июне и, в особенности, в июле этот эффект проявляется особенно заметно. Анализируя графики для июля, можно сделать вывод, что разность величин давления и его виртуального аналога, составлявшая в Санкт-Петербурге около 3–5 миллибар в период 1935–1950 гг., после 1965 г. увеличилось почти до 10 миллибар. В августе, а затем и в сентябре эффект существенного превышения значений атмосферного давления на виртуальной станции по сравнению с показаниями барометра на реальной станции уменьшается. На октябрьской кривой траектории скачок виртуального давления в период 1955–1960 гг. уже пропадает. Другими словами, в последние десятилетия «установленный» на виртуальной станции барометр показывал бы в октябре давление на 10 миллибар выше, чем на реальной станции мегаполиса Санкт-Петербург.

Атмосферные осадки, согласно утвердившейся в метеорологии и климатологии концепции, являются как одним их самых сложных для изучения, так и одним из самых важных в прикладном отношении метеорологическим элементом. Сложность изучения этого метеоэлемента объясняется исключительной многофакторностью формирования режима атмосферных осадков. Дополнительно к этому следует принимать во внимание, что изучение этой проблемы в применении к крупным городам обростает дополнительными трудностями. Обращаясь, например, к материалу уже упоминавшейся монографии авторов из Главной геофизической обсерватории [2], скажем, что и в принципиальном смысле говорить о структуре поля атмосферных осадков на территории мегаполиса Санкт-Петербурга затруднительно. Согласно современным оценкам, различия в количестве осадков, выпадающих в разных районах города, даже по значениям их многолетних норм часто превышают 10–15 и даже 20 %.

Понимая отмеченные трудности, авторы предварительно провели методические компьютерные эксперименты с применением всех приемов методики реконструкции естественного режима осадков в мегаполисе Санкт-Петербург. Во-первых, проводились расчеты с привлечением в качестве спутниковых двух станций метеорологического куста Санкт-Петербурга — Белогорки и Выборга. Отличительная черта расширенной версии методики реконструкции состояла в использовании в качестве рядов исходных данных сглаженных по 3, 5, 7, 9 и 11 годам значений среднемесячных сумм осадков. В конечном счете, рассчитывался ансамбль оценок характеристик реконструкции режима осадков на виртуальной станции, при сравнительном анализе которых выявлялись непротиворечивые результаты, использованные для оценки достоверности выполненных расчетов.

Переходя к обсуждению материала восстановления невозмущенного мегаполисом режима атмосферных осадков, прокомментируем в общих чертах работоспособность построенных отдельных интерполяционных схем, составляющих нашу методику в целом. Сразу укажем, что наиболее «прямолинейные» из этих схем, и в первую очередь, схема эмпирической интерполяции, оперирующая данными за отдельные «годо-месяцы», оказались недостаточными для получения устойчивых результатов. Большое количество «выбывающихся» годо-месяцев делает неубедительными результаты расчетов даже при их достаточно кардинальном осреднении.

Расчеты, проведенные в применении к каждому году в отдельности с использованием модели, базирующейся на гипотезе локальной линейной зависимости месячных сумм осадков от координат, показали лучшие по сравнению с методикой эмпирической интерполяции результаты. Это улучшение, в первую очередь, касалось такого свойства рядов интерполированных значений, как оценки их коррелированности с величинами, измеряемых на метеостанции мегаполиса. Однако анализ показал, что и они не являются достаточными для надежного обоснования достоверности оценок разности между измеренными и интерполированными значениями сумм осадков в каждый «годо-месяц». Только результаты расчетов, базирующихся на использовании в качестве исходных данных для интерполяционных методик месячных сумм осадков, последовательно сглаживаемых по семи, девяти и одиннадцати годам, показали ту степень устойчивости, которая дала возможность сформулировать выводы.

Графики на рис. 11 демонстрируют результаты расчетов динамики нормированной разности (в процентах) сглаженных по девятилетиям реально измеренных и реконструированных сумм осадков по четырем сезонам года. Нормировка проводилась на величину, измеренную на реальной станции мегаполиса. Определенный таким образом показатель характеризует процент изменения сумм атмосферных осадков на территории мегаполиса по сравнению с тем его значением, которое было бы получено на виртуальной станции при отсутствии мегаполиса. По нашему мнению, самым показательным результатом проведенных расчетов стало подтверждение уже известного вывода о том, что в динамике зимних и весенних сумм осадков в Санкт-Петербурге в последние 35 лет отчетливо проявляется тенденция к росту. Сумма осадков как в три зимних, так и в три весенних месяца года на реальной станции Санкт-Петербург увеличена приблизительно на 10 % по сравнению с оценками для виртуальной станции. Расчеты выявили также некоторую тенденцию к увеличению зимних и весенних осадков в последнюю четверть прошедшего столетия, однако, окончательный вывод мы не станем отстаивать, так как оценки статистической значимости этого феномена пока еще недостаточно высоки.

Заключение

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что разработанная для оценки нарушений естественного климатического режима Санкт-Петербурга комплексная методика позволяет получить достаточно надежные выводы о происходивших в последнее столетие с лишним лет изменениях климатического режима крупнейшего мегаполиса Северной Европы. Характеризуя методику, использованную для получения приведенных выше оценок, скажем, что в отличие от применяемых до настоящего времени приемов анализа отдельных характеристик мезоклимата крупных городов, она базируется на существенно большем объеме фактического материала. В нашем случае в применении к Санкт-Петербургу метеорологический куст мегаполиса в зависимости от анализируемого метеозлемента включал до четырех десятков окружающих станций, тогда как при обычном качественном подходе, развитом в исследованиях последних лет, выводы делаются по показаниям одной—двух пригородных станций. Разработанная методика анализа особенностей формирования мезоклимата крупных городов предоставляет

возможность проводить такой анализ с привлечением ансамбля независимых приемов интерполяции метеорологических параметров. Важной чертой этой методики является ее универсальность, позволяющая проводить анализ в применении к разным мегаполисам. Экстраполяция показателей антропогенных нарушений мезоклимата мегаполисов на будущее вместе с данными об изменениях региональных климатов, вызываемыми глобальным потеплением, в совокупности позволят накопить материал для достоверного прогнозирования изменений экологических условий, инфраструктуры и качества жизни в крупных городах.

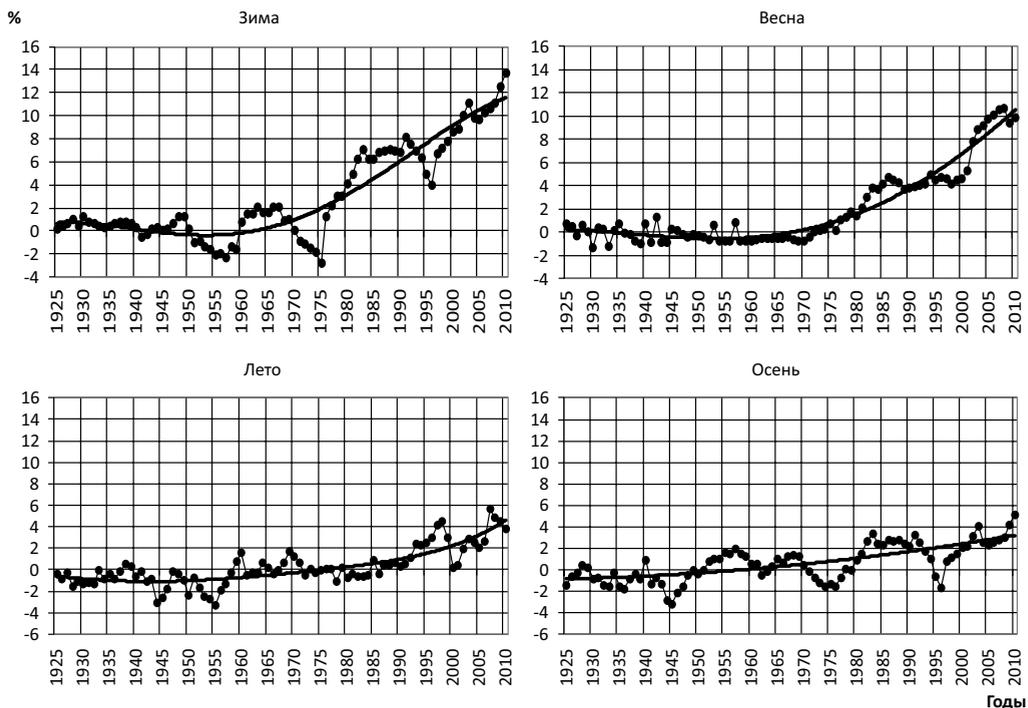


Рис. 9. Динамика и полиномиальные тренды нормированной разности сезонных сумм атмосферных осадков, рассчитанные по данным измерений на городской станции и по методике реконструкции ненарушенного мегаполисом режима осадков (на виртуальной станции)

Литература

1. Карлин Л.Н., Ефимова Ю.В., Никифоров А.В. Некоторые климатические характеристики Санкт-Петербурга в эпоху глобального потепления // Учёные записки РГГМУ, 2005, № 1, с. 22–29.
2. Климат Санкт-Петербурга и его изменения. Под ред. В.П. Мелешко. — СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2010. — 254 с.
3. Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе // ДАН, 1998, т. 367, с. 253–256.

4. *Малинин В.Н., Гурьянов Д.А.* К оценке продолжительности сезонов года в Санкт-Петербурге // Общество. Среда. Развитие, 2013, вып. 3, с. 252–256.
5. *Малинин В.Н., Гурьянов Д.А.* Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге // Изв. РГО, 2015, т. 141, вып. 5, с. 17–27.
6. *Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л.* Формирование и особенности острова тепла в большом городе // ДАН, 2000, т. 370, № 2, с. 249–252.
7. *Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л.* Влияние антропогенных факторов на климат городов // Учёные записки РГГМУ, 2011, № 17, с. 41–50.
8. *Матвеев Л.Т.* Особенности формирования температурно-влажностного режима в большом городе // Оптика атмосферы и океана, 1997, т. 10, с. 1181–1187.
9. *Менжулин Г.В., Павловский А.А.* Современные изменения климата и мегаполисы. В сб.: «География в системе наук о Земле» // Материалы международной конференции, посвященной 165-летию создания Русского географического общества и 85-летию организации географического факультета в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете. — СПб.: изд. ВВМ СПбГУ, 2011, с. 218–224.
10. *Мохов И.И.* Связь интенсивности «острова тепла» города с его размерами и количеством населения // ДАН, 2009, т. 427, № 4, с. 530–533.
11. *Павловский А.А., Менжулин Г.В.* К вопросу об изменении климатических норм и их влиянии на функционирование современных мегаполисов // Материалы научной конференции «Нерешенные проблемы климатологии и экологии мегаполисов». Санкт-Петербург, 20 марта 2013 г. — СПб.: Зеленый город, 2013, с. 58–65.