

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.524.3

Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды

Е.М. Ладохина^{1,2}, К.Г. Рубинштейн^{1,3*}

¹ Гидрометцентр РФ

123242, г. Москва, пер. Б. Предтеченский, 11–13

² Северо-Западное УГМС

199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 23-я линия, 2а

³ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, 52

Поступила в редакцию 3.09.2020 г.

Восстановлены данные о суточных суммах осадков методом градиентного бустинга, а также о характеристиках приземного ветра в Санкт-Петербурге и на 15 станциях Ленинградской обл. за период 1994–2018 гг. Выявлены следующие результаты воздействия мегаполиса Санкт-Петербург на поля исследуемых метеоэлементов: увеличение количества осадков и ослабление скорости приземного ветра за пределами мегаполиса на подветренных территориях и уменьшение скорости ветра в самом мегаполисе (городе). Разработаны критерии обнаружения указанных воздействий в конкретный день (срок) и рассчитаны количественные оценки средней величины выявленных воздействий.

Ключевые слова: мегаполис, градиентный бустинг, тренды осадков, приземный ветер, городские эффекты; metropolis, gradient boosting method, annual precipitation trends, surface wind, urban effects.

Введение

Многочисленные исследования [1–3] доказывают, что мегаполисы (крупные города с населением более 1 млн. чел.) способны оказывать заметное воздействие на погоду и климат. Наиболее хорошо описан в литературе эффект городского острова тепла (ОТ), динамика проявления которого исследована для большинства регионов планеты [4]. Помимо воздействия на температуру воздуха из-за изменения альbedo поверхности и теплоемкости крупных зданий, мегаполис влияет на гидрологию почвы, например на испарение, за счет большого количества асфальтированных и бетонных сооружений. Выбросы загрязняющих веществ, создаваемые различными предприятиями и автомобильным транспортом, действуют как ядра конденсации, что отражается на распределении количества осадков. Кроме того, большие города могут заметно изменять свойства приземного ветра из-за увеличения шероховатости подстилающей поверхности, которая зависит от густоты и типа городской застройки.

Сложное взаимодействие вышеперечисленных механизмов делает определение воздействия мегаполиса на поля осадков и приземного ветра не столь

однозначным. Согласно [5] количество осадков в городе может увеличиваться на его подветренной стороне на расстоянии вплоть до 20–40 км; в некоторых городах отмечен эффект компенсационной тени (уменьшения количества выпавших осадков за городом) [2, 6]. Высокая шероховатость городской подстилающей поверхности в большинстве случаев ослабляет скорость приземного ветра, однако при определенных характеристиках городских каньонов, образованных домами и проспектами, ветер в городе может усиливаться [5, 7].

Цель настоящей работы, как и опубликованной ранее статьи [8], – определить, каким образом такой крупный город, как Санкт-Петербург, может интегрально изменять структуру полей температуры, приземного ветра и осадков. Полученные оценки будут учитываться в дальнейшем для валидации численной модели краткосрочного прогноза погоды в Санкт-Петербурге.

Использованные данные и методы анализа

Все 15 метеорологических станций Ленинградской обл., данные с которых предоставлены ФБГУ «Северо-Западное УГМС», были поделены на две группы по их удаленности от центра Санкт-Петербурга.

* Екатерина Михайловна Ладохина (ladohina@meteow.ru); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@gmail.com).

бурга: в группу ближних к мегаполису вошли пункты наблюдений, удаленные на расстояние не более 50 км, остальные были отнесены к группе дальних (рис. 1). При оценке воздействия Санкт-Петербурга на режим ветра и осадков необходимо учитывать физико-географические особенности расположения метеорологических станций. Согласно [9] общая карта их расположения не содержит достаточной информации о локальных особенностях местности, которые могут влиять на измеряемые метеовеличины. Для равнинной местности к таким физико-географическим особенностям относятся находящиеся в непосредственной близости крупные и малые водные объекты, а также ландшафты населенных пунктов. Ниже приведено описание ландшафтов нескольких метеорологических станций ближней и дальней групп, схожих по физико-географическим характеристикам.

Описание ландшафтов использованных метеостанций. Метеорологическая станция, которую используют в первую очередь для анализа метеоусловий в мегаполисе, — ОГМС «Санкт-Петербург» — установлена в одном из центральных районов города, плотно застроенном в начале XX в., вблизи восточной оконечности Финского залива, между Малой Невкой (на западе) и р. Карповка (на юге).

На восточной стороне мегаполиса расположены ближние метеорологические ст. Шлиссельбург и Воейково, первая — в сельской местности на берегу Невы, вблизи ее истока из оз. Ладожское, вторая — в центре поселения Воейково. Ближайший крупный водный объект — оз. Ладожское —

находится в 20 км от ст. Воейково. На южном берегу этого озера установлен метеорологический пункт наблюдений Новая Ладога. Влияние мегаполиса на этот пункт слабее ввиду значительного (более 100 км) расстояния между ними. К западу от Санкт-Петербурга расположены ст. Озерки и Ломоносов, первая — на северном побережье Финского залива на расстоянии 60 км от центра мегаполиса, вторая — на южном побережье на расстоянии 30 км. Ст. Озерки находится на границе городской застройки и сельской местности, ст. Ломоносов отделена от городского ландшафта с запада морским каналом. Ст. Белогорка расположена к югу от Санкт-Петербурга, а ст. Сосново — к северу, обе станции — континентальные, на них в большей степени оказывают влияние такие крупные водные объекты, как р. Оредеж (к северу от Белогорки) и оз. Суходольское (к северу от Сосново).

Заполнение пропусков в рядах наблюдений. В рядах срочных метеорологических данных с 1994 по 2018 г., как и во всех рядах метеорологических наблюдений, имелось некоторое количество пропусков. Средний процент пропусков в данных о ветре по всем станциям составлял 1%, при этом на 8 станциях из 16 пропусков не было. В рядах осадков средний по всем станциям процент пропусков равен 38%. Поэтому, прежде чем переходить к анализу данных, мы провели процедуру восстановления срочных значений скорости и направления ветра и суточных сумм осадков на выбранных станциях.

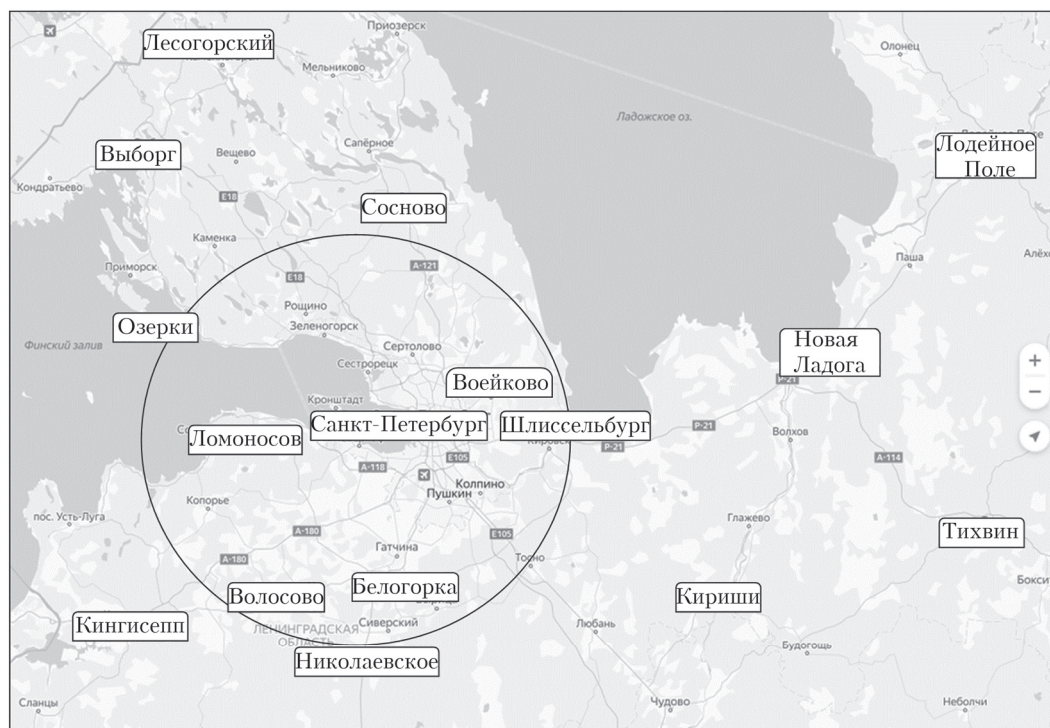


Рис. 1. Расположение метеорологических станций в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл.; окружность показывает «ближнюю» зону

Для восстановления пропусков в данных о суточных суммах осадков использовался метод градиентного бустинга [10]. Это метод машинного обучения, основанный на построении линейных комбинаций простых алгоритмов обучения, генерирующих решения лишь немногим лучше, чем случайное угадывание [11]. Каждая последующая простая модель должна придавать больший вес и отдавать предпочтение ранее некорректно предсказанным значениям [12]. Легкость настройки алгоритма под широкий спектр практических задач, его простота и эффективность сделали этот метод очень популярным. В различных сферах научной деятельности появились многочисленные программные реализации алгоритма. В настоящей работе программные инструменты анализа данных реализованы на языке Python с использованием пакета xgboost для регрессионной модели градиентного бустинга и пакета scikit-learn для пред- и постобработки результирующих выборок.

Было протестировано два типа обучающих выборок. Первая включала пять среднесуточных характеристик, наблюдаемых на той же станции для которой проводилось восстановление: приземная температура воздуха, точка росы, относительная влажность воздуха, приведенное к уровню моря давление на станции и облачность нижнего яруса. Во вторую входили данные об осадках на соседних станциях; начальная конфигурация охватывала данные со всех имеющихся в распоряжении станций-соседей и состояла из 15 характеристик. Пропуски на соседних станциях были заполнены средними значениями за весь период наблюдений (1994–2018 гг.).

Первичная оценка качества восстановления данных (в процентах) была получена по результатам перекрестной проверки: сравнивались восстановленные суточные суммы осадков и фактически наблюдавшиеся на станции за тестовой период, равный одному году. Успешность восстановления данных с использованием первой выборки в среднем для всех станций составляла порядка 50%, а с использованием второй – 70–75%. В обоих случаях использовалась регрессионная модель восстановления с параметрами, установленными по умолчанию, и аппроксимацией результатов гамма-распределением, традиционным для суточных значений сумм осадков [13, 14]. Таким образом, для тонкой настройки модели восстановления сумм осадков методом градиентного бустинга была использована вторая обучающая выборка (данные об осадках на соседних станциях).

На втором этапе были последовательно подобраны оптимальные значения основных параметров модели восстановления. В первую очередь были определены количество итераций и параметр, ограничивающий переобучение модели: $n_estimators = 140$ и $learning_rate = 0,06$ соответственно. Далее были вычислены максимальная глубина обучения слабых алгоритмов ($max_depth = 3$), процент строк и количество колонок для обучения каждого слабого алгоритма ($subsample = 0,9$, $colsample_bytree = 0,5$,

а также минимальное значение, на которое должна уменьшиться функция потерь для перехода к следующей итерации ($gamma = 0$) [15]. Пропуски в рядах наблюдений были восполнены для каждой станции последовательно, за каждый год, с расчетом двух статистик: дисперсии (D) и среднеквадратического отклонения (СКО). В среднем успешность восстановления данных характеризовалась значениями $D = 7$ и $СКО = 2,6$, но в некоторые годы дисперсия значительно превосходила среднюю ($D > 12$). Было выдвинуто предположение, что это связано с наличием выбросов в обучающей выборке, для устранения которых были отфильтрованы значения сумм осадков, в первом случае – выше 95-го перцентиля, во втором – выше 99-го перцентиля. Однако в обоих случаях фильтрация выбросов не повысила качество восстановленных данных.

На третьем этапе была проведена проверка на избыточность набора характеристик обучающей выборки, т.е. не ухудшалось ли качество прогноза из-за наличия данных со станций-соседей, слабо связанных с той, для которой проводилось восстановление данных. Для этого была рассчитана степень связанности данных восстанавливаемой станции с каждой из станций-соседей с помощью функции `sklearn.SelectKBest`. Алгоритм работы функции включал: 1) расчет коэффициента корреляции Пирсона между значениями на той станции, для которой проводилось восстановление, и на соседних; 2) оценку надежности полученных коэффициентов по критериям Фишера и p -значению (уровню доверия нулевой гипотезе); 3) возвращение рядов данных о количестве осадков со станций-соседей в порядке убывания связанности. Обучение проводилось по 7 из 15 наиболее связанным станциям-соседям. Несмотря на то, что исключенные из обучающей выборки станции-соседи демонстрировали достаточно низкую степень связанности, каждая из них вносила свой вклад в повышение качества восстановления, поскольку даже при удалении одной из более слабосвязанных станций качество восстановления осадков ухудшалось, согласно статистикам D и СКО. Таким образом, все 15 станций-соседей являются необходимыми аргументами в регрессионной модели восполнения пропусков в рядах осадков. Основная причина высокой дисперсии в восстановленных рядах данных – занижение локальных максимумов выпавших осадков или их временное смещение.

Примером успешной работы алгоритма градиентного бустинга может служить восстановленный ряд суточных сумм осадков для ст. Воейково за 2007 г. (рис. 2, а), а типичный случай, когда восстановление данных было не очень удачным, демонстрирует восстановленный ряд данных для ст. Лодейное Поле (рис. 2, б). Визуальное сравнение графиков показывает, что для Воейково даже экстремальные значения количества выпавших осадков предсказаны корректно и не имеют временного смещения, а для Лодейного Поля наблюдается как занижение локальных максимумов, так и их смещение. Эти выводы подтверждает расчет

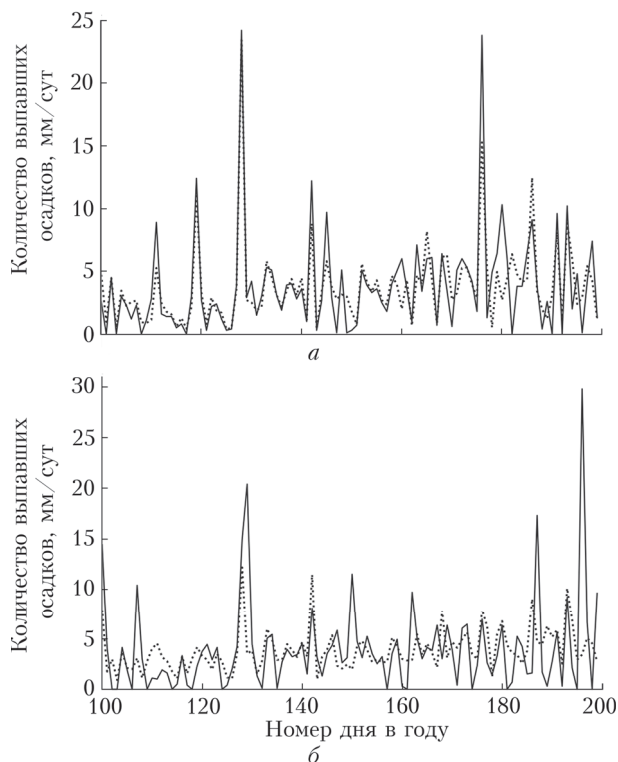


Рис. 2. Временной ход фактических (сплошная кривая) и восстановленных (пунктирная кривая) суточных сумм осадков за 2007 г. для ст. Воейково (а) и Лодейное Поле (б)

годовой дисперсии (для ст. Воейково – 2,74, а для Лодейного Поля – 11,48). Таким образом, применение метода градиентного бустинга можно считать оправданным для восстановления рядов данных с большим процентом пропусков.

На 8 из 16 станций данные измерений скорости и направления ветра не содержали пропусков, а на остальных были немногочисленны (< 1%) и восполнены по упрощенному алгоритму. Сначала все пропуски в данных наблюдений были заменены на осредненные по всем станциям значения метеопараметров за указанный срок. Затем рассчитывалась степень связанности ряда (функция *sklearn.SelectKBest*), для которого производилось восстановление, с рядами данных каждой пригородной станции. В конце осредненное по всем станциям значение было заменено на значение метеопараметра из ряда с наиболее высоким коэффициентом

связанности, а в случае отсутствия данных со станции с наибольшей корреляцией за искомый срок использовалось значение со следующей по степени связанности станции.

Результаты

Анализ влияния Санкт-Петербурга на осадки. Гипотетический эффект воздействия мегаполиса на осадки – увеличение их количества за его пределами с подветренной стороны. Это происходит за счет развития над мегаполисом конвективных движений, поднимающих водяной пар и ядра конденсации на высоту, достаточную для достижения каплями размеров, при которых происходит их выпадение на землю, и последующего смещения масс образовавшихся осадков под воздействием основного адвективного переноса.

Согласно [16, 17] в Санкт-Петербурге преобладают ветры западного, юго-западного и южных направлений. Таким образом, подветренную территорию мегаполиса должны представлять станции, расположенные на востоке и северо-востоке от мегаполиса. Однако, поскольку характер городской застройки к настоящему времени значительно изменился, необходимо проверить, соответствует ли повторяемость направлений по имеющимся данным измерений оценке повторяемости в предшествующих работах. Для этого мы сравнили повторяемость направлений ветра за весь исследуемый период для Санкт-Петербурга и станций «ближней» зоны (табл. 1). Согласно табл. 1 в Санкт-Петербурге и окружающей его «ближней» зоне действительно наблюдаются преимущественно указанные в [16, 17] направления ветра. Стоит отметить, что на ст. Шлиссельбург, расположенной строго восточнее Санкт-Петербурга, западная составляющая скорости ветра мала по сравнению со ст. Воейково, находящейся на северо-востоке от мегаполиса, что может быть вызвано, помимо локальных особенностей расположения станции, влиянием городской застройки. Это предположение требует дополнительной проверки.

Таким образом, на подветренной стороне от города в «ближней» зоне расположены ст. Шлиссельбург и ст. Воейково, в «дальней» – Новая Ладога (см. рис. 1); на наветренной стороне – ст. Ломоносов, в «дальней» зоне – Кингисепп.

Таблица 1

Повторяемость (количество случаев) направлений ветра в Санкт-Петербурге и на станциях ближней группы

Станция	Направление ветра							
	В	С	СВ	СЗ	З	Ю	ЮВ	ЮЗ
Белогорка	4960	7647	6660	4595	12022	14647	4411	12651
Ломоносов	7833	5002	5019	7008	13697	10200	7281	10534
Озерки	11614	2331	11364	3875	12392	7183	3470	13775
Санкт-Петербург	6638	6648	6509	5452	12888	8777	5451	13919
Шлиссельбург	3424	6618	7153	3039	7045	17605	4899	11615
Воейково	6586	6072	7295	4976	14557	11703	3831	12865

Были построены графики временного хода разностей годовых сумм осадков между мегаполисом и вышеуказанными пригородными станциями $PCO_{(СПб-пр)}$. Произведено парное сравнение трендов этих разностей для станций на наветренных и подветренных территориях относительно мегаполиса. Согласно графикам, на станциях в ближнем районе (рис. 3, *a–г*) на подветренной от Санкт-Петербурга стороне наблюдается увеличение количества осадков: в среднем за год на ст. Воейково и Шлиссельбург выпадает на 80–100 мм осадков больше, чем в Санкт-Петербурге, расчетный критерий Стьюдента для равенства средних значений ($t_{рас}$) значительно больше критического ($t_{кр}$) на 5%-м уровне значимости. На подветренных, но более отдаленных от мегаполиса станциях их количество снижается и становится меньше или сравнимо с количеством осадков на (станциях с наветренной стороны (рис. 3, *д, е*). Так, при сравнении

рядов осадков на ст. Ломоносов и Новая Ладога критерий Стьюдента не превосходит критическое значение. Это означает, что на них в среднем выпадает одинаковое количество осадков, которое меньше, чем в Санкт-Петербурге, на 25–50 мм.

Таким образом, парное сравнение данных показывает большее количество выпавших осадков на подветренных станциях ближней группы, расположенных по направлению основного переноса воздушных масс (к востоку от Санкт-Петербурга), по сравнению с городом. Этот эффект перестает проследиваться для территорий, удаленных на восток от центра мегаполиса на расстояние более 100 км.

Режим осадков хорошо изучен в Московском регионе, поэтому для определения особенностей режима осадков в Санкт-Петербурге и на прилегающих к нему территориях было произведено сравнение пространственного распределения осадков с Москвой. При сопоставлении результатов чис-

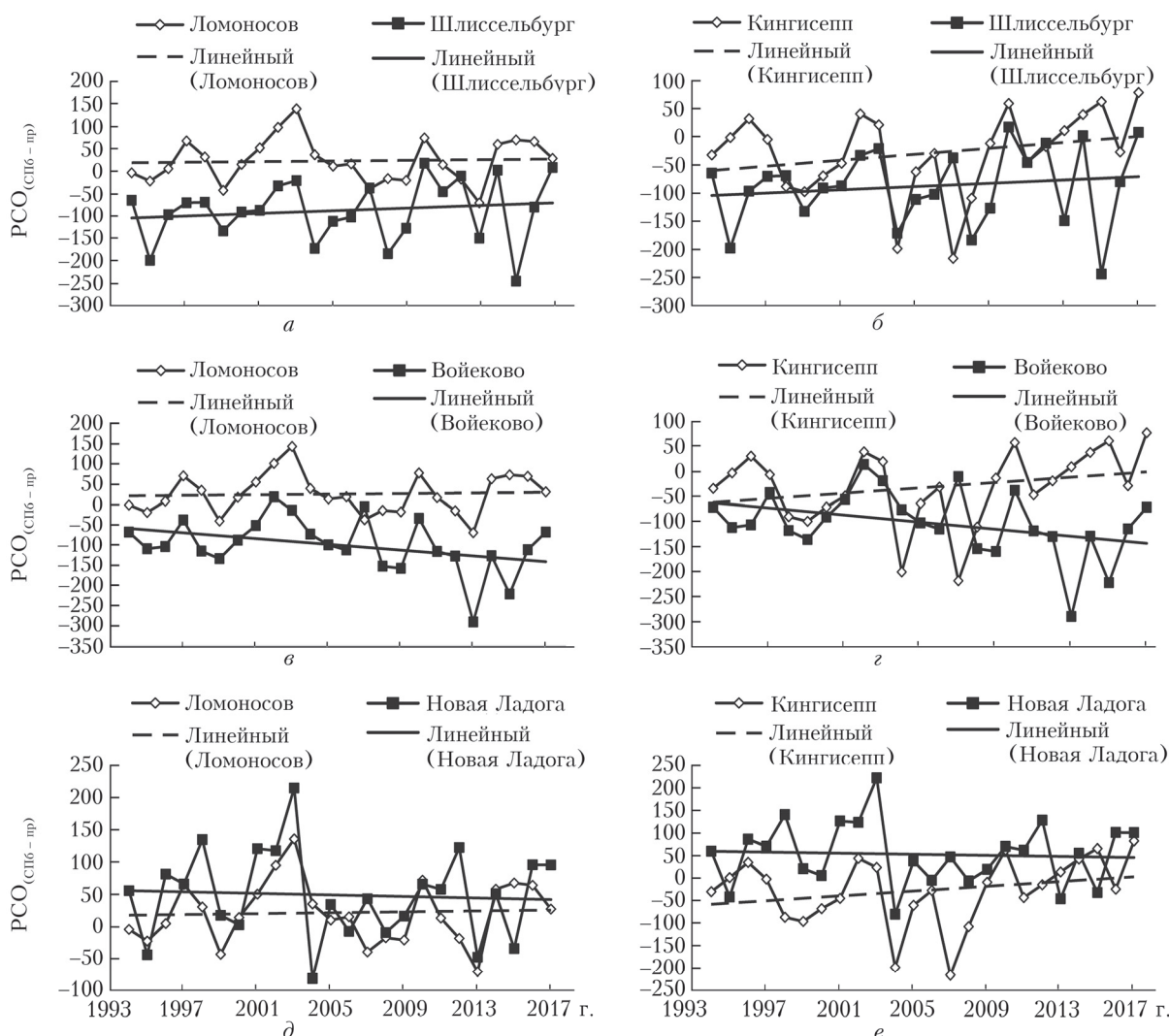


Рис. 3. Временной ход разностей годовых сумм осадков между Санкт-Петербургом и станциями Ленинградской обл. и их линейные тренды

ленного моделирования климата Московского региона с включением параметризации городской подстилающей поверхности и без нее получено, что, по сравнению с прилегающими территориями, в центре города средние суммы летних осадков увеличиваются в среднем на 20–30%, а в 20-километровой зоне к востоку от него — на 12% с локальными максимумами до 30% [18]. По данным анализа рядов наблюдений со станций Москвы и прилегающих к ней территорий, отмечается наличие «пояса уменьшения» осадков вокруг столицы [2, 6]. Предполагается, что одна из причин его образования — проявление механизма компенсационных потоков на прилегающих к Москве территориях за счет большей неустойчивости городской атмосферы. В [6] минимальное количество осадков обнаружено на станциях, расположенных в радиусе 7–20 км от МКАД, как по сравнению с городскими, так и с более удаленными пригородными станциями. Приведенные в [18] карты аномалий летних сумм осадков по результатам климатического моделирования демонстрируют не «пояс уменьшения», а пятнистую картину, образованную аномалиями разных знаков. Уменьшение количества выпавших осадков на станциях ближнего пригорода Москвы может быть объяснено попаданием этих станций в области отрицательных аномалий сумм осадков. Таким образом, общей закономерностью пространственного распределения осадков для двух городов является большее их количество в центре и на подветренной стороне от мегаполиса, при этом в Санкт-Петербурге широтная протяженность зоны увеличения осадков больше, чем в Москве.

Анализ влияния Санкт-Петербурга на приземный ветер. При одинаковых перепадах давления характер приземного ветра зависит как от термодинамических характеристик воздушных масс, так и от локальных особенностей подстилающей поверхности [16]. В Санкт-Петербурге к таким особенностям относятся близость Финского залива и Невы, различный характер застройки районов города. В этом случае эффект мегаполиса на ветровой режим проявляется в ослаблении средней скорости ветра на его территории относительно окружающих сельских населенных пунктов вследствие шероховатости городского ландшафта, оказывающей тормозящее действие на приземные воздушные потоки и усиливающей турбулентность. Для выявления этого эффекта было произведено сравнение количества случаев, когда отношение средней скорости ветра в Санкт-Петербурге к скорости ветра на пригородных станциях было:

- 1) больше 1;
- 2) меньше 1, но больше 0,7;
- 3) меньше 0,7.

Такие градации были выбраны на основании работы Н.Е. Landsberg [19] по исследованию ослабления средней скорости приземного ветра в г. Мэриленд (Колумбия, США), в котором продемонстрировано, что верхний передел в третьем пункте (0,7) лучше отражает временную тенденцию к ослаблению средней скорости ветра в городе, чем верхний передел во втором, равный 1.

Доля случаев, когда отношение скорости ветра было меньше 0,7, от количества случаев, когда отношение скорости ветра было меньше 1, составляет для различных станций от 80 до 95%, поэтому графический анализ был проведен для первого и третьего условий (рис. 4). Согласно графикам количество случаев в году, при которых скорость ветра в мегаполисе была больше ($V_{СП6} > V_{пр}$) или меньше ($V_{СП6} < V_{пр}$) скорости ветра на пригородных станциях примерно одинаково. Следовательно, нельзя категорически утверждать, что в Санкт-Петербурге наблюдается ослабление средней скорости приземного ветра. Однако полезным оказывается вывод, что для большинства исследуемых пригородных пунктов наблюдений тренды средней скорости ветра, аппроксимированные со средней ошибкой 0,5%, в целом близки к нулю, из чего следует, что ветровой режим на исследуемых станциях является установившимся и не подвержен временным изменениям.

На ст. Шлиссельбург необходимо отметить значительное изменение в характере распределения средней скорости ветра со временем. В начале исследуемого периода (1994–1997) распределение количества случаев $V_{СП6} > V_{пр(Шлис)}$ и $V_{СП6} < V_{пр(Шлис)}$ было близко к таковому на других пригородных станциях, однако затем оно меняется. Количество случаев, когда скорость ветра в Санкт-Петербурге больше скорости ветра в Шлиссельбурге, демонстрирует значимую тенденцию к увеличению, а обратное соотношение ($V_{СП6} < V_{пр(Шлис)}$) — к уменьшению. Поскольку Шлиссельбург расположен строго восточнее Санкт-Петербурга, можно предположить, что на ветровом режиме этой станции сильнее всего отражается влияние городской застройки (рис. 4, б), но большой угловой коэффициент линии тренда (–24,1), вероятно, обусловлен «зарастанием» расположенной в сельской местности станции. Тем не менее на ст. Воейково, которая входит в ближнюю группу подветренных станций, но находится в центре поселения, также наблюдается ослабление средней скорости приземного ветра. За год в среднем в Воейково на 300–350 случаев меньше более сильных скоростей приземного ветра, чем в Санкт-Петербурге, по сравнению с наветренными пригородными станциями. Для Шлиссельбурга это число варьируется от 600 случаев в начале исследуемого периода до 1000 в конце. Рассчитанные критерии Стьюдента подтверждают значимость этих отличий.

Во многих исследованиях отмечается, что в городе наблюдается больше безветренных дней, чем в сельской местности (например, [1]). Для проверки этого утверждения были найдены разности количества случаев, когда средняя скорость ветра была меньше или равна 1 м/с, между Санкт-Петербургом и пригородными станциями ($N_{(СП6 \leq 1)} - N_{(пр \leq 1)}$). Результаты отображены в виде графиков временного хода на рис. 5, а. По сравнению с большинством рассматриваемых пригородных станций в Санкт-Петербурге отмечено больше дней со штилем, однако в Шлиссельбурге, как при сравнении средних

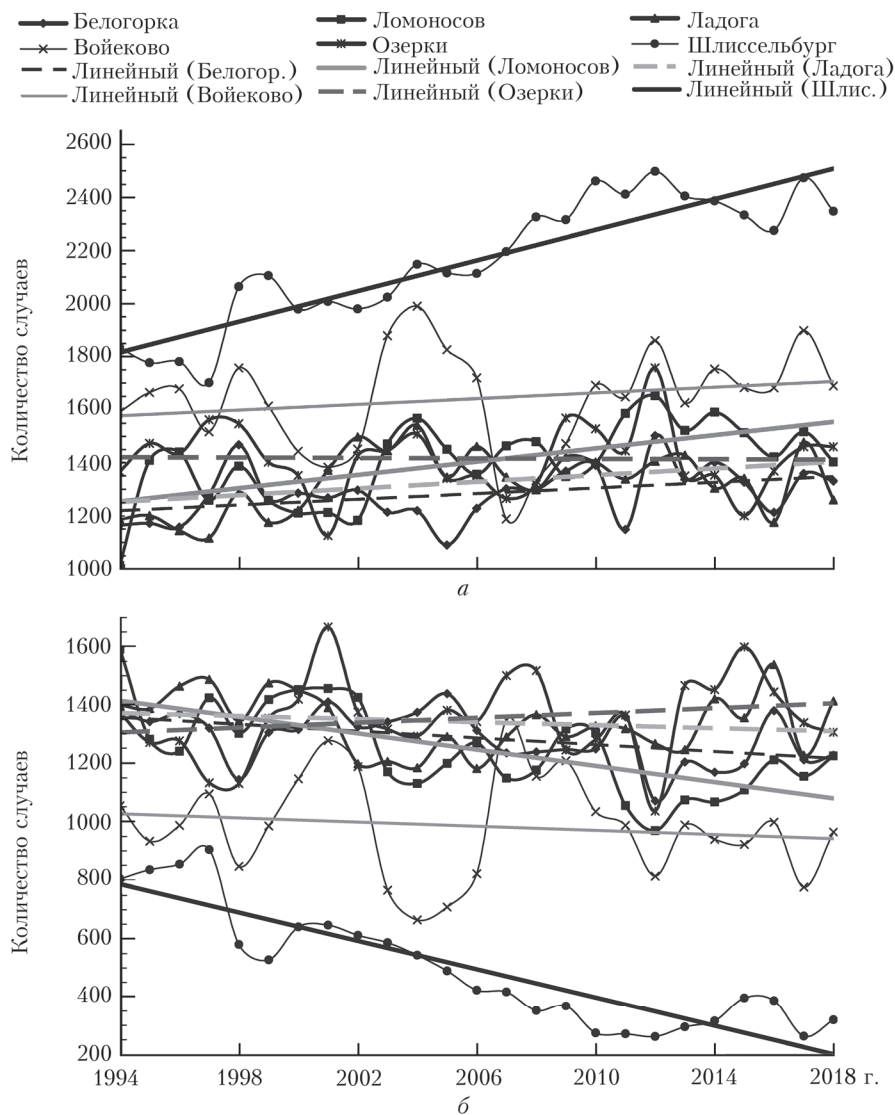


Рис. 4. Количество случаев, когда отношение средней скорости ветра в Санкт-Петербурге к средней скорости ветра на пригородных станциях было больше 1 (а); меньше 0,7 (б)

скоростей ветра, количество безветренных ситуаций со второй половины 1990-х гг. устойчиво превосходит это количество для Санкт-Петербурга. Подобный эффект также виден для ст. Воейково, но в меньшей степени. Для обеих подветренных станций $t_{\text{рас}} > t_{\text{кр}}$. По нашему мнению, для доказательства влияния мегаполиса Санкт-Петербург на ветровой режим подветренных территорий данных, получаемых с двух пригородных станций, недостаточно. Возможность комплексного рассмотрения поля ветра на всей прилегающей к мегаполису территории могут дать результаты численного моделирования. Таким образом, значимого воздействия застройки Санкт-Петербурга на слабые и средние скорости ветра не обнаружено. Более того, наветренная ст. Озерки, отличающаяся более сильными скоростями ветра, характеризуется примерно одинаковым с Санкт-Петербургом количеством безветренных дней, что было подтверждено значением $t_{\text{рас}}$ меньше критического. В связи

с этим разумно предположить, что наиболее заметная трансформация ветрового режима в городской агломерации будет видна при умеренных и сильных ветрах. Действительно, временной график распределения разностей случаев умеренного и сильного ветров более 5 м/с между Санкт-Петербургом и пригородными станциями ($N_{(\text{СП6} > 5)} - N_{(\text{пр} > 5)}$) гораздо лучше отражает ожидаемые закономерности воздействия мегаполиса на ветровой режим (рис. 5, б).

Во все рассматриваемые годы умеренные и сильные ветра чаще наблюдались на пригородных станциях, чем в Санкт-Петербурге. При этом наибольшее их количество зафиксировано на станциях, расположенных с наветренной стороны мегаполиса, а наименьшее – с подветренной стороны. Максимальное количество ветренных дней наблюдается на ст. Озерки (500 случ./год), меньшее – на ст. Ломоносов и Белогорка (около 200 случ./год), а минимальное – на ст. Шлиссельбург (57 случ./год), $t_{\text{рас}} > t_{\text{кр}}$

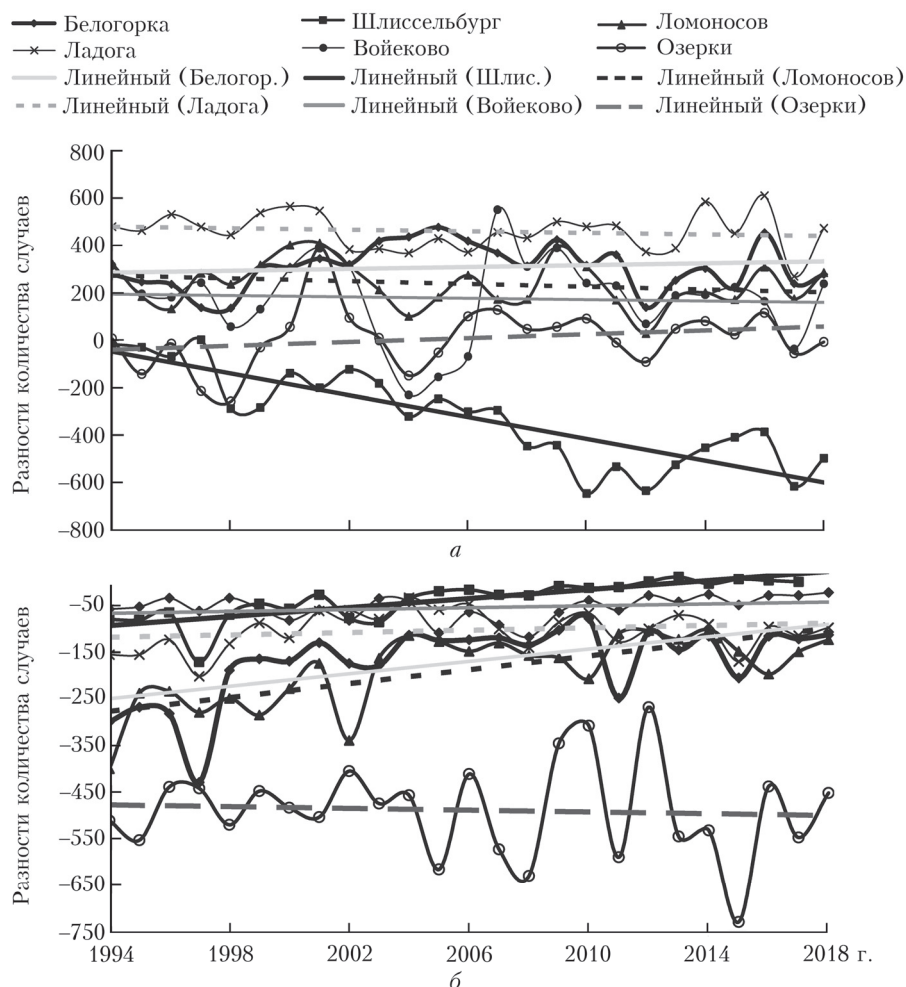


Рис. 5. Распределение разностей случаев: а – штиля и слабого ветра между Санкт-Петербургом и пригородными станциями; б – умеренного и сильного ветров (> 5 м/с) между Санкт-Петербургом и пригородными станциями

во всех случаях. При этом тенденция к уменьшению числа ветренных дней (> 5 м/с) в Шлиссельбурге и Воейково более слабая, чем тенденция к увеличению числа дней со штилем.

Периоды комплексного проявления городских эффектов. Для простоты изложения результаты воздействия городской застройки на распределение метеохарактеристик на территории Санкт-Петербурга и в прилегающих районах будем называть городскими эффектами. Исследования были выполнены с целью определения периодов и метеорологических ситуаций, при которых городские эффекты наиболее заметны. Согласно результатам этой работы и [8] к обнаруженным нами городским эффектам Санкт-Петербурга относятся: городской ОТ, увеличение количества осадков, ослабление скорости приземного ветра на подветренных территориях за пределами мегаполиса и уменьшение скорости ветра в самом мегаполисе. Для обнаружения случаев проявления каждого из них использовались нижеперечисленные критерии.

Случаи интенсивных температурных возмущений антропогенного происхождения были най-

дены по комбинированному критерию поиска ОТ: с помощью полуэмпирической модели интерполяции рассчитывалась фоновая температура воздуха на территории Санкт-Петербурга, как если бы города не существовало; ОТ фиксировался при условии, что разность между температурой на ст. Санкт-Петербург и фоновой температурой больше 2°, но меньше, чем разность температур на ст. Санкт-Петербург и Белогорка [8]. Эффект увеличения осадков за мегаполисом фиксировался при условии, что суточные разности сумм осадков между Санкт-Петербургом и ст. Озерки, а также Санкт-Петербургом и ст. Ломоносов меньше, чем разности между мегаполисом и ст. Шлиссельбург и Воейково. Ослабление скорости ветра на подветренных территориях за пределами Санкт-Петербурга определялось, если разности скоростей ветра между Санкт-Петербургом и ст. Озерки, а также Санкт-Петербургом и ст. Ломоносов были больше, чем разности между мегаполисом и ст. Шлиссельбург и Воейково. Для обнаружения ослабления ветра в самом городе были найдены случаи наблюдения на ст. Озерки и ст. Ломоносов больших скоростей ветра, чем на ст. Санкт-Петербург.

В итоге было посчитано количество проявлений каждого городского эффекта за каждый год 1994–2018 гг., включая аномальные случаи, лежащие за пределами 95-й квантили, а затем найдены суммы всех городских эффектов за эти периоды. В среднем за год наблюдается порядка 450 случаев проявления хотя бы одного из перечисленных эффектов. Наибольшее количество случаев воздействия городской застройки на поля метеохарактеристик на территории Санкт-Петербурга и в прилегающих районах было зафиксировано в 2006 и 2015 гг. (499 и 510 случаев соответственно).

Были найдены количественные оценки, характерные для обнаруженных городских эффектов за исследуемый период при выполнении соответствующего критерия. Количество осадков на подветренной стороне мегаполиса больше, чем в самом городе и на наветренных станциях, в среднем на 1 мм, а величина экстремальных значений варьируется от 3,5 до 24 мм. Средняя величина ослабления скорости ветра за Санкт-Петербургом – 1 м/с, экстремальные значения могут достигать 4 м/с, при этом в самом мегаполисе скорости ветра в среднем на 2 м/с меньше, чем на наветренных станциях, диапазон экстремальных значений более широк по сравнению с эффектом ослабления скорости ветра за Санкт-Петербургом – от 6 до 16 м/с. Средняя величина высокоинтенсивных (более 2 °С) температурных возмущений составляет 2,8 °С, спектр аномальных значений – от 5 до 11 °С.

Для определения сезона с наибольшим количеством городских эффектов их суммы за весь период наблюдений были сведены в таблицу сопряженности (табл. 2).

Таблица 2

Распределение городских эффектов по сезонам

Сезон	ОТ	Осадки	Ветер за городом	Ветер в городе	Всего
Зима	375	98	75	958	1506
Весна	890	293	147	1604	2934
Лето	1273	283	324	1846	3726
Осень	656	246	191	1627	2720
Год	3194	920	737	6035	10886

Из анализа таблицы следует, что наибольшее количество городских эффектов наблюдалось летом (34%), а наименьшее – зимой (13%). Такое сезонное распределение, по-видимому, связано с частым нахождением Северо-Западного района европейской территории России в зоне интенсивных градиентных течений между Азорским максимумом и Исландским минимумом зимой и поздней осенью [20]. При протекающих в таких условиях фронтальных процессах городские эффекты наименее заметны [21]. Частыми явлениями в Санкт-Петербурге являются ОТ и ослабление скорости ветра в центре города, редкими – ослабление скорости ветра на подветренных территориях за его пределами.

Городские эффекты лета 2006 и 2015 гг. были сопоставлены с помощью диаграмм размаха (рис. 6).

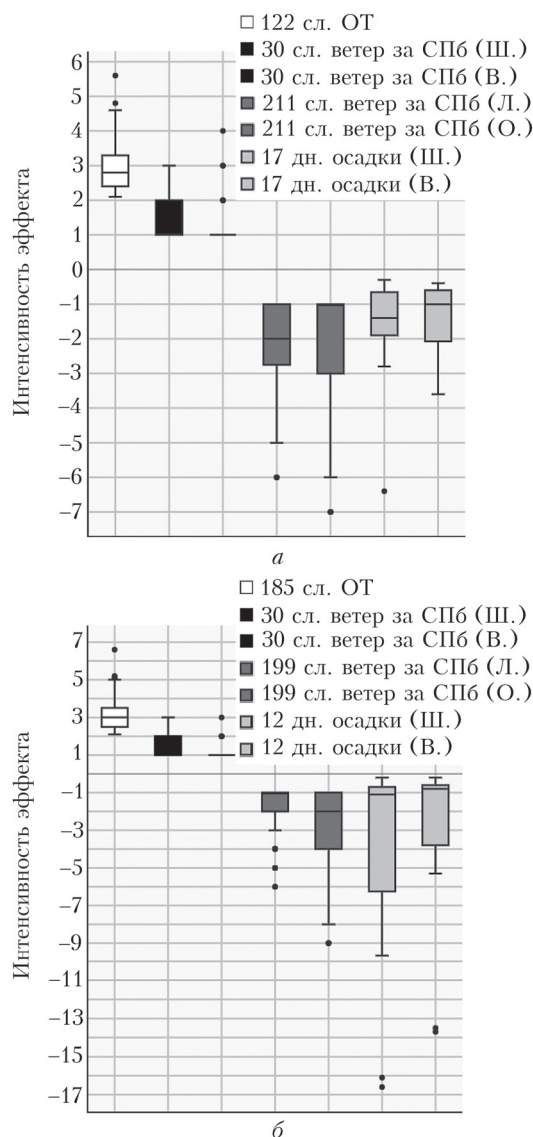


Рис. 6. Распределение летних значений городских эффектов: 2006 (а), 2015 г. (б)

Этот тип диаграмм предоставляет в компактном виде большой набор характеристик распределения вероятностей, однако не дает информации о количестве наблюдений в выборке, поэтому она отображена в легенде. Поскольку при исследовании распределения осадков использовались суточные данные, число случаев их увеличения за пределами города приведено в днях.

Из графиков видно, что летом 2015 г. наблюдалось меньше городских эффектов, связанных с полями ветра и осадков, чем летом 2006 г., но аномалии выпадения осадков за пределами мегаполиса и ослабления скорости ветра в городе были более интенсивными. Таким образом, наиболее обоснованным периодом для проведения численных экспериментов для краткосрочного прогноза городских эффектов является лето 2015 г.

Заключение

Для определения городских эффектов в Санкт-Петербурге были использованы ряды срочных данных наблюдений с городской метеостанции и станций Ленинградской обл. за период 1994–2018 гг. Поскольку имеющиеся ряды данных о суммах осадков содержали большое количество пропусков, было проведено их восстановление с помощью метода градиентного бустинга. Метод показал неплохие результаты восстановления данных на станциях ближней группы, но локальные максимумы выпавших осадков оказались несколько занижены. Эти особенности учитывались при получении количественных оценок.

В ходе анализа восстановленных данных выявлены особенности воздействия Санкт-Петербурга на поля метеоэлементов. Некоторые из них являются типичными для крупного города, другие отличаются от выявленных в исследованиях, проведенных для больших городах, например Москвы. К обнаруженным городским эффектам Санкт-Петербурга, теоретически присущим любому большому городу, относятся городской ОТ, увеличение количества осадков за мегаполисом в среднем на 1 мм/сут, ослабление умеренного и сильного ветров в городе на 2 м/с и большее по сравнению с пригородными станциями, количество ветреных дней. Отличительными особенностями городских эффектов Санкт-Петербурга являются более высокая интенсивность ОТ зимой, чем летом [8], и слабовыраженное воздействие городской застройки на средние скорости приземного ветра.

Перечисленные городские эффекты чаще наблюдаются летом. За весь исследуемый период их наибольшее количество и интенсивность зафиксированы летом 2015 г. Количественные оценки городских эффектов для этого сезона, характеризующие ожидаемое воздействие города на поля метеоэлементов, будут использованы в дальнейшем для валидации модели краткосрочного прогноза погоды в Санкт-Петербурге.

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 248 с.
2. Рубинштейн К.Г., Гинзбург А.С. Оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка) // Метеорол. и гидрол. 2003. № 2. С. 29–38.
3. Головина Е.Г. Особенности антропогенного влияния на метеорологический режим атмосферы в низких широтах. Л.: ЛГМИ, 1990. 83 с.

4. 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, N 1. P. 1–26.
5. Оке Т.Р. Климат пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 358 с.
6. Бруслова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2019. № 1. С. 127–142.
7. Louka P., Belcher S.E., Harrison R.G. Modified street canyon flow // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1998. V. 74. P. 485–493.
8. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Целев В.Ю. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2020. № 1. С. 190–206.
9. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // Int. J. Climatol. 2011. V. 31. N 2. P. 200–217.
10. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Ann. statist. 2001. V. 29, N 5. P. 1189–1232.
11. Freund Y., Schapire R.E. Experiments with a new boosting algorithm // 13th Internat. Conf. Machine Learn. 1996. V. 96. P. 1–9.
12. Кошечкин А.А., Андриященко В.С., Замятин А.В. Новый метод восстановления пропущенных значений в наборе данных на примере иммуносигнатур // Совер. технол. в медицине. 2019. Т. 11, № 2. С. 19–24.
13. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фунд. и прикл. климатол. 2016. № 1. С. 84–103.
14. Горшенин А.К., Мартынов О.П. Гибридные модели экстремального градиентного бустинга для восстановления пропущенных значений в данных об осадках // Информ. и ее применения. 2019. Т. 13, № 3. С. 34–40.
15. Xgboostdevelopers. xgboostRelease 1.1.1 [Электронный ресурс]. URL: https://xgboost.readthedocs.io/_/downloads/en/release_1.1.0/pdf/ (дата обращения: 16.06.2020).
16. Климат Ленинграда / Ц.А. Швер (ред.). Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 252 с.
17. Мелешко В.П., Мещерская А.В., Хлебникова Е.И. Климат Санкт-Петербурга и его изменения. СПб.: ГГО им. А. И. Воейкова», 2010. 256 с.
18. Климат Москвы в условиях глобального потепления / А.В. Кислов (ред.). М.: Изд-во МГУ, 2017. 288 с.
19. Landsberg H.E. Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience) // J. Urban Ecol. 1979. V. 4, N 1. P. 53–81.
20. Алисов Б.П. Климатические области и районы СССР. М.: ОГИЗ. 1947. 212 с.
21. Nicholas F.W. A synoptic climatology of Metro Washington: A mesoscale analysis of the urban heat island under selected weather conditions. M.S. Thesis, Dept. of Geog., University of Maryland, 1971. 120 p.

E.M. Ladokhina, K.G. Rubinshtein. Study of the impact of the megalopolis of St. Petersburg on wind and precipitation for validation of numerical weather forecast.

Daily total precipitation amount and surface wind characteristics were retrieved for St. Petersburg and 15 stations of the Leningrad region for the period 1994–2018. Gradient boosting method was used to retrieve the precipitation data. The analysis of the data series retrieved has allowed us to ascertain the following effects of St. Petersburg megalopolis on the fields of the meteorological parameters: an increase in precipitation on the leeward side of the megalopolis and a decrease in the wind speed on the leeward side of the megalopolis and immediately at the city center. The criteria for their detection on a specific day (time) are developed; the average values of the effects are assessed.