

С.В. Крюкова, Т.Е. Симакина

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНВЕРСИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

S.V. Kryukova, T.E. Simakina

TEMPERATURE INVERSIONS ANALYSIS IN SAINT-PETERSBURG

В статье исследуются характеристики температурных инверсий воздуха г. Санкт-Петербурга на основе аэрологических данных радиозондирования атмосферы за 2010 г. Вычислено распределение повторяемости приземных и приподнятых инверсионных слоев, а также инверсий, формируемых в дневные и ночные часы. Рассмотрены случаи многоинверсионности — одновременного появления приземной и одной и более высотных инверсий. Проведен анализ средних месячных значений мощности, интенсивности и вертикального градиента температуры инверсий и исследована их динамика. Получена корреляционная связь между интенсивностью и мощностью инверсий.

Ключевые слова: инверсия температуры, загрязнение атмосферы, параметры инверсии, корреляционный анализ

The article examined the characteristics of air temperature inversions of St. Petersburg based on upper-air radiosonde data in 2010. Distribution of surface-based and elevated inversion layers frequency, as well the inversions formed in day and night hours was calculated. Multi inversion cases — simultaneous occurrence of surface-based and one or more elevated inversions were considered. The analysis of average monthly values of depth, intensity and a vertical gradient of temperature inversions was carried out and their dynamics were investigated. The correlation coefficients for the relationships between the inversion depth and intensity across the inversion were determined for both the surface-based and elevated inversions.

Key words: temperature inversion, air pollution, inversion parameters, correlation analysis.

Введение

Особенности распределения температуры воздуха с высотой широко используются при оценке условий загрязнения атмосферы. Слой инверсионного распределения температуры препятствует развитию вертикального движения в атмосфере и способствует накоплению вредных примесей в нижнем поверхностном слое, таким образом, информация о наличии температурных инверсий необходима при определении потенциала атмосферы рассеивать загрязняющие вещества и для анализа самого процесса рассеивания. Комплексирование аэрологических наблюдений с данными экологических станций об уровне загрязнения позволяет исследовать и моделировать пространственное распространение вредных примесей. Изучение характеристик инверсий и их изменчивости является актуальным и для оценки динамики парниковых газов и, в целом, изменения климата.

Целью данной работы является исследование месячной изменчивости таких характеристик инверсии, как мощность, интенсивность и вертикальный градиент температуры.

Материалы и методы исследования

Работа основана на статистическом анализе данных зондирования атмосферы, полученных на аэрологической станции Воейково Ленинградской области. Станция Воейково расположена менее чем в 10 км от города Санкт-Петербурга, поэтому значения температурного профиля, полученные на этой станции, можно считать однородными и для города. Исследуемый массив наблюдений охватывает период 12 месяцев 2010 г. Зондирования проводились ежедневно в сроки 00.00 и 12.00 UTC. Данные находятся в свободном доступе в сети Интернет [8]. В ранних работах авторов [5] было обнаружено, что наибольшее влияние на уровень загрязнения воздуха в г. Санкт-Петербурге оказывают приземные и низкие приподнятые инверсии, в связи с чем в исследуемый массив были включены инверсии с высотой нижней границы до 1000 м. По данным вертикального распределения температуры в указанном слое были вычислены средние значения мощности, интенсивности и температурного градиента инверсий за каждый месяц указанного периода отдельно для приземных и приподнятых, для ночных и дневных инверсий.

Повторяемость инверсий

Общее число наблюдений за 2010 г. в Санкт-Петербурге составило 728, из них 463 случая с инверсиями (63,6 %). Распределение повторяемости всех инверсий по месяцам года представлено на рис. 1.

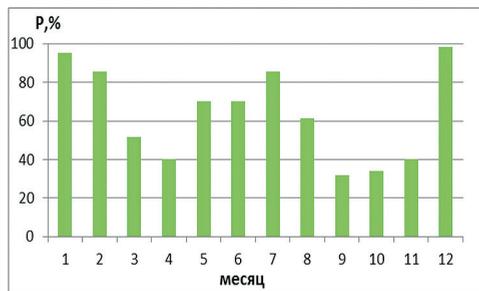


Рис. 1. Повторяемость общего количества инверсий

Как видно из рис. 1, инверсии наблюдаются ежемесячно, максимальная частота всех инверсий зафиксирована в декабре (98 %), минимальная — в сентябре (32 %). Хорошо заметен годовой ход с увеличением повторяемости инверсий в зимний и летний сезоны, уменьшением — в весенний и осенний. Колебания повторяемости инверсий связаны с особенностями циркуляционных процессов, характерных в эти

периоды; обычно высокая повторяемость инверсий наблюдается при преобладании антициклональной погоды, низкая — в период активной циклонической деятельности [1, 2].

Инверсии температуры, являясь задерживающим слоем, способствуют накоплению водяного пара, пыли, дыма и вредных примесей в атмосфере [6]. Приземные инверсии оказывают влияние на накопление выбросов от низких источников, преимущественно автотранспорта. В основном, формирование приземных инверсий связано с выхолаживанием земной поверхности в ночные часы, реже — с адвекцией теплого воздуха над холодной подстилающей поверхностью. Характер влияния приподнятых инверсий на уровень загрязнения зависит от высоты расположения источника загрязнения. При его расположении ниже слоя инверсии, основная часть примеси концентрируется вблизи поверхности земли.

Повторяемости приземных и приподнятых инверсий по месяцам рассчитывалась по следующим формулам [7, с. 1308]

$$P_{\text{пр}} = N_{\text{пр}}/N, \quad P_{\text{в}} = N_{\text{в}}/N, \quad P = N/N_{\text{зонд}},$$

где N — общее количество инверсий в месяц; $N_{\text{пр}}$, $N_{\text{в}}$ — количество приземных и приподнятых (высотных) инверсий в месяц соответственно; $N_{\text{зонд}}$ — общее количество зондирований в месяц; $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{в}}$ — повторяемость приземных и высотных инверсий соответственно; P — повторяемость всех инверсий.

Результаты вычислений повторяемости приземных и приподнятых инверсий в течение 2010 г. представлены в табл. 1, по данным таблицы построены гистограммы на рис. 2.

Таблица 1

Распределение количества инверсий и их повторяемости в 2010 г.

месяц	$N_{\text{пр}}$	$N_{\text{в}}$	N	$P_{\text{пр}}$	$P_{\text{в}}$	P
1	17	42	59	28,8	71,2	95,2
2	12	36	48	25,0	75,0	85,7
3	14	18	32	43,8	56,3	51,6
4	16	8	24	66,7	33,3	40,0
5	21	21	42	50,0	50,0	70,0
6	23	19	42	54,8	45,2	70,0
7	31	22	53	58,5	41,5	85,5
8	25	13	38	65,8	34,2	61,3
9	11	8	19	57,9	42,1	31,7
10	10	11	21	47,6	52,4	33,9
11	4	20	24	16,7	83,3	40,0
12	12	49	61	19,7	80,3	98,4

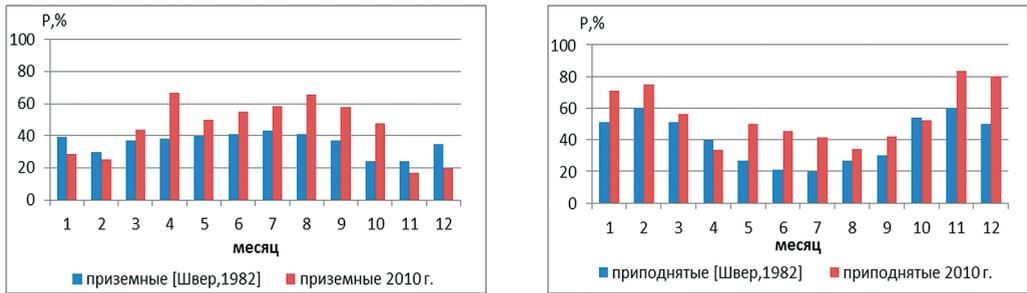


Рис. 2. Повторяемость приземных и приподнятых инверсий по сравнению с климатическими данными

Распределение повторяемости приземных и высотных инверсий по месяцам представленное на рис. 2, позволило обнаружить существенные различия во временном ходе повторяемости двух типов инверсий.

По-прежнему заметен годовой ход в повторяемости как приземных, так и приподнятых инверсий, причем для двух типов инверсий он носит противоположный характер. Приземные инверсии наблюдаются чаще с марта по октябрь, т.е. в теплый период, реже — в холодный период с ноября по февраль с минимальной частотой в ноябре (17 %). Минимальная частота появления приподнятых инверсий напротив, приходится на теплые месяцы (апрель 33 %), максимальная — на холодные (ноябрь 83 %). Другими словами, в холодный период года инверсии в основном приподнятые, в теплый — приземные. Следует отметить сокращение частоты колебаний повторяемости инверсий вдвое по сравнению с повторяемостью всех инверсий без деления их по высоте.

В целом приподнятые инверсии наблюдаются несколько чаще, чем приземные — в среднем 55 и 45 % от общего количества наблюдений.

На рис. 2 результаты за 2010 г. показаны красным цветом, синим — климатические значения [4]. По сравнению с климатическими данными число приземных инверсий в холодное время 2010 г. сократилось, в теплое — увеличилось, что привело к увеличению размаха колебаний частоты приземных инверсий. Число высотных инверсий увеличилось, за исключением апреля и октября, когда количество инверсий было чуть ниже многолетних значений.

Результаты исследования случаев одновременного наблюдения нескольких инверсий до высоты 1 000 м представлены на рис. 3. В основном это тандем радиационной приземной инверсии и приподнятой инверсии оседания.

Многоинверсионность характерна для периода апрель — декабрь с максимум в декабре, когда восемь раз наблюдалось одновременно две инверсии. Один случай одновременного формирования трех инверсий выявлен в июле. В период январь — март не наблюдалось ни одного случая многоинверсионности.

Изучение инверсий в разные сроки наблюдения позволил выявить различия в количестве инверсий, формируемых в ночные и дневные часы. На рис. 4 представлено распределение частоты появления ночных и дневных приземных (слева) и ночных и дневных приподнятых инверсий (справа). Хорошо видно, что приземные инверсии

в течение года наблюдаются в 2–3 раза чаще в ночное время, за исключением зимы, когда количество ночных и дневных приземных инверсий практически совпадает. Колебания частоты ночных приземных инверсий осуществляется с большой амплитудой — от 16 % зимой до 65 % в апреле и в августе. Больших различий в количестве ночных и дневных приподнятых инверсий не обнаружено, повторяемость данных типов инверсий колеблется на протяжении всего года около 20–30 %.

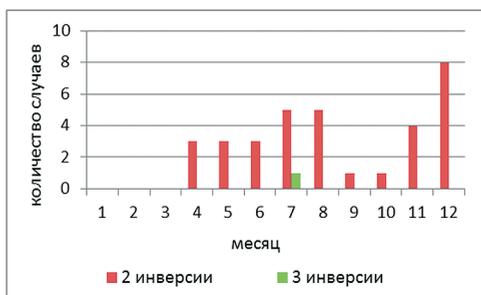


Рис. 3. Случаи одновременного наблюдения нескольких инверсий

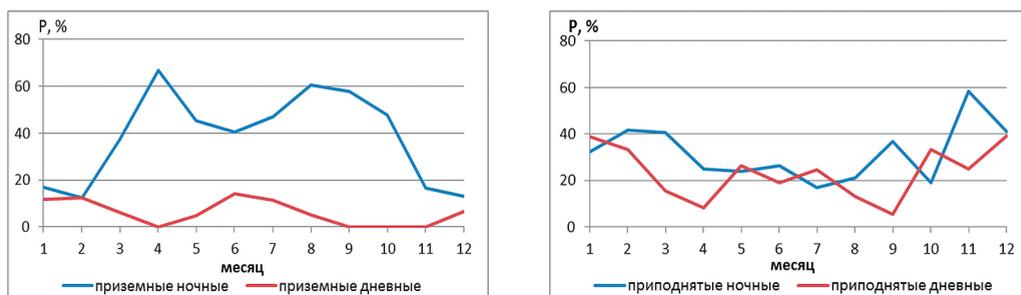


Рис. 4. Повторяемость приземных и приподнятых инверсий в ночные и дневные сроки наблюдения

Высота и мощность инверсионного слоя

Месячная динамика средних высот верхней и нижней границы приземных и приподнятых инверсий показана на рис. 5. Высота нижней границы приземной инверсии определялась высотой станции над уровнем моря, то есть 78 м.

Нижняя граница приподнятых инверсий не опускалась ниже 400 м. Разница высот верхней и нижней границ инверсии определяет ее мощность. Средняя мощность приземных инверсий составляет значение 300 м, увеличиваясь в осеннее и зимнее время при «слиянии» инверсий оседания с радиационными приземными инверсиями [4]. Средняя мощность приподнятых инверсий несколько меньше, чем приземных — около 250 м, возрастая к декабрю — январю.

Следует отметить, что в течение 2010 г. приподнятые инверсии формировались в среднем на 100 м выше верхней границы приземных, за исключением января. Можно

предположить, что в январе приподнятые инверсии являются продолжающимися приземными, когда при утреннем нагреве поверхности температура воздуха у земли повышается, поднимая инверсионный слой так, что в дневной срок наблюдений высота нижней границы инверсии оказывается сдвинутой по вертикали на 350–400 м. Рис. 5 дает возможность заметить годовой ход высоты верхней границы как приземных, так и приподнятых инверсий, с максимумом в холодный период года и минимумом в теплый. Знание высот инверсионных слоев дает возможность локализовать повышенные концентрации вредных примесей, которые, как известно, наблюдаются на уровне верхней границы инверсии [3].

Возможность анализа мощности приземных и приподнятых инверсий в разные сроки наблюдения дает рис. 6.

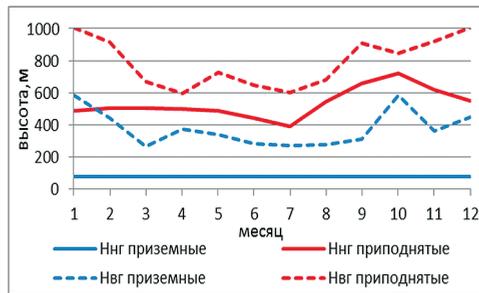


Рис. 5. Высоты границ инверсионных слоев

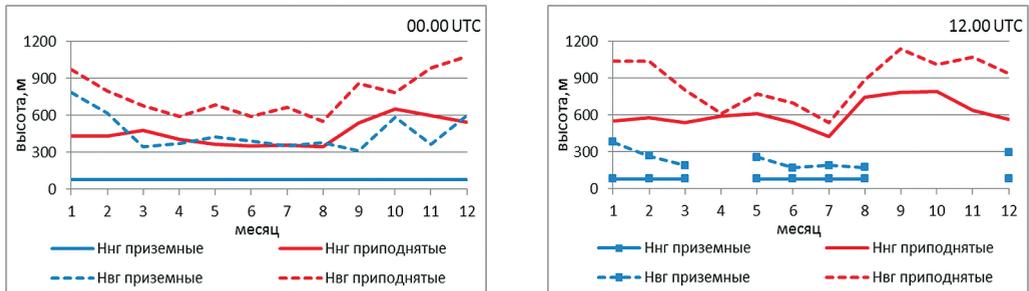


Рис. 6. Высоты границ инверсий в разные сроки наблюдения

В ночное время приземные инверсии заметно более мощные, чем приподнятые. В дневные часы верхняя граница приземных инверсий опускается до 180–300 м. Мощность дневных и ночных приподнятых инверсий схожа. Минимум средней мощности ночных и дневных инверсий приходится на весну – лето, осенью наблюдается подъем с максимумом к январю, когда вследствие ночного излучения подстилающей поверхности вертикальная протяженность достигает 800 м. В рассматриваемом году можно отметить октябрь, в котором наблюдался локальный максимум мощности приземных и локальный минимум мощности приподнятых инверсий в ночное время.

Интенсивность инверсий

Интенсивность инверсионного слоя или термическая стабильность атмосферы определялась как разница температур на верхней и нижней границе инверсии. Среднемесячная интенсивность приземных и приподнятых инверсий представлена на рис. 7.

Значения интенсивности приземных и приподнятых инверсий имеют близкие значения. Заметен сезонный ход интенсивности: наиболее интенсивные инверсии были в декабре, январе, другой локальный максимум приходится на конец весны – лето. Минимум — в начале весны (март, апрель) и осенью. Наименьшая интенсивность приземных инверсий наблюдалась в ноябре (0,4 °С), а наибольшая — в январе (5,8 °С). Приподнятые инверсии имели максимальную интенсивность также в январе (4,4 °С), а минимальную — в апреле (0,5 °С).

Среднемесячная интенсивность приземных и приподнятых инверсий в разные сроки наблюдения представлена на рис. 8.



Рис. 7. Средняя интенсивность приземных и приподнятых инверсий

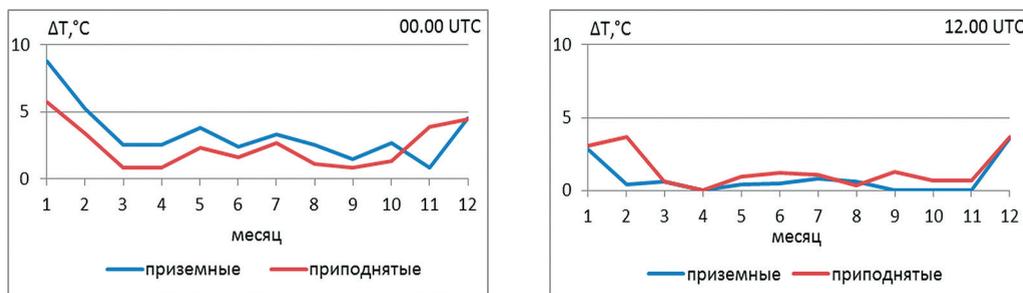


Рис. 8. Средняя интенсивность приземных и приподнятых инверсий в разные сроки наблюдения

Интенсивность ночных инверсий заметно выше дневных. В ночное время более интенсивными оказались приземные инверсии, в дневное время как приземные, так и приподнятые инверсии были слабоинтенсивными, за исключением декабря – января, когда интенсивность достигла значения 0,3 °С. Заметен годовой ход интенсивности инверсий с минимумом весной – летом, подъемом в осенние месяцы и максимумом в декабре, январе.

Температурный градиент инверсии

Температурный градиент вычислялся как отношение интенсивности к мощности, взятое в стометровом слое. Среднемесячное распределение вертикальных градиентов температуры в инверсионном слое представлено на рис. 9. На протяжении года средние значения температурных градиентов приземных и приподнятых инверсий колеблются около значения $0,8-1,0 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$, постепенно убывая, они достигают в ноябре $0,3-0,5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$.



Рис. 9. Температурный градиент в приземном и приподнятом инверсионном слое

Корреляционный анализ мощности и интенсивности инверсии

В процессе исследования была обнаружена сильная связь между мощностью ΔH и интенсивностью инверсии ΔT . На рис. 10 представлены диаграммы рассеивания для пары $\Delta T-\Delta H$ для приземных и приподнятых инверсий в ночные и дневные сроки наблюдения. Коэффициенты корреляции проверялись на значимость при уровне достоверности 0,05.

Для обоих типов инверсий и сроков наблюдения фиксируется положительная корреляционная связь между мощностью и интенсивностью инверсии. При приземных инверсиях корреляционная связь изменялась от заметной ночью ($r = 0,66$) до высокой днем ($r = 0,81$). При приподнятых инверсиях связь оказалась слабее — ночью и днем заметная, с коэффициентами корреляции $r = 0,51$ и $r = 0,63$ соответственно. Таким образом, более сильная связь выявлена между интенсивностью и мощностью при ночных и дневных приземных инверсиях.

Заключение

Результаты статистического анализа температурных инверсий в атмосфере Санкт-Петербурга по ежемесячным данным 2010 г. позволяют сделать следующие выводы.

1. Установлено, что инверсии наблюдались ежемесячно, период годового хода повторяемости инверсий составил три месяца: увеличение частоты в зимний и летний сезон, уменьшение — весной и осенью. Максимальная частота отмечена в декабре — 98 %, минимальная — в сентябре — 32 %.

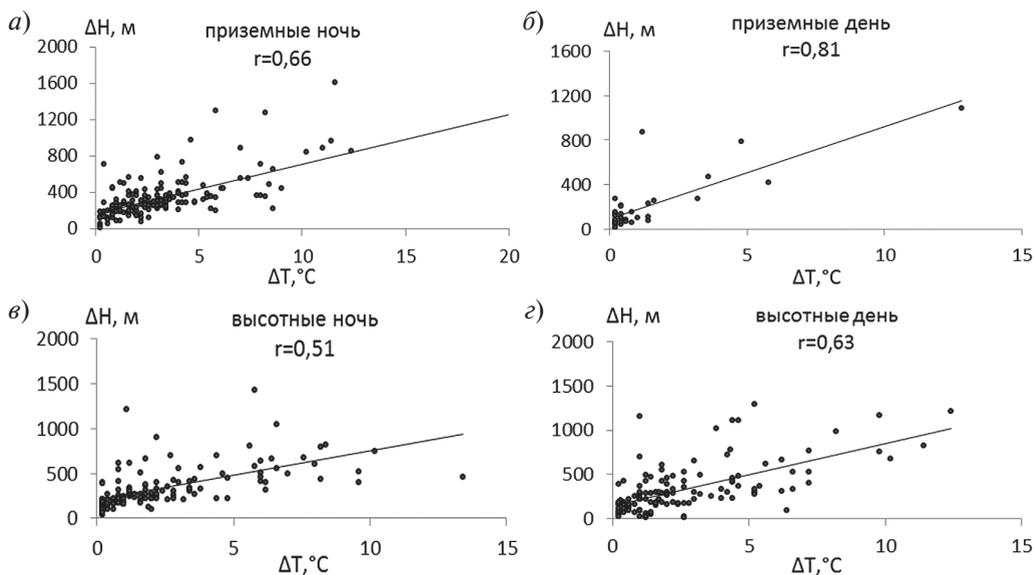


Рис. 10. Связь между интенсивностью и мощностью приземных инверсий в сроки 00.00 (а), 12.00 (б); приподнятых инверсий в сроки 00.00 (в), 12.00 (г)

2. Оказалось, что повторяемость двух типов инверсий носит противоположный характер: приземные наблюдаются чаще в теплый период, реже — в холодный с минимальной частотой в ноябре — 17 %; частота приподнятых инверсий, напротив, минимальна в теплый период (апрель 33 %) и максимальна в холодный (ноябрь 83 %). В целом приподнятые инверсии формировались чаще, чем приземные.
3. По сравнению с климатическими данными число приземных инверсий в 2010 г. в холодное время сократилось, в теплое — увеличилось, число высотных инверсий увеличилось, за исключением апреля и октября, когда количество инверсий было чуть ниже многолетних значений.
4. В период с апреля по декабрь встречались случаи одновременного существования приземных и приподнятых инверсионных слоев.
5. Приземные инверсии в течение всего года отмечены в 2–3 раза чаще в ночное время, чем в дневное. Подобных различий в количестве приподнятых инверсий в зависимости от времени суток не обнаружено.
6. Доказано, что средняя мощность приземных инверсий несколько больше приподнятых, особенно в ночное время.
7. Значения интенсивности приземных и приподнятых инверсий близки. Интенсивность ночных выше дневных, причем более интенсивными оказались приземные инверсии в ночное время.
8. Обнаружено, что на протяжении года среднемесячные значения температурного градиента в приземных и приподнятых инверсиях колеблется в пределах 0,8–1 °C, постепенно убывая осенью до 0,3–0,5 °C.

9. Для обоих типов инверсий получена корреляционная связь между их мощностью и интенсивностью.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке проектов по расширению урбанизации и промышленных зон города, а также для создания программы контроля по охране качества воздуха в городе. Необходимо более тщательно проанализировать влияние метеорологических параметров и характеристик инверсии на качество воздуха в городе. Авторами планируется увеличить срок исследования инверсий до 10 лет.

Литература

1. *Безуглая Э.Ю., Сонькин Л.Р.* Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в городах Советского Союза. // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометиздат, 1971, с. 241–252.
2. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения городов. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 184 с.
3. Ежегодник. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2010 г. Под ред. Э.Ю. Безуглой. — СПб.: ООО «Д'АРТ», 2011. — 224 с.
4. Климат Ленинграда. Под ред. Ц.А. Швер. — Л., 1982. — 252 с.
5. *Крюкова С.В., Симакина Т.Е.* Влияние инверсий на уровень загрязнения воздуха в г. Санкт-Петербурге. // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: Материалы VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных 18–19 марта 2015 г. Секция «Науки о Земле». — СПб., с. 35–39.
6. *Лазарева Е.О., Попова Е.С.* Особенности пространственно-временной динамики антропогенных примесей воздуха г. Санкт-Петербурга за период времени с 1980 по 2012 г. (на примере оксида углерода, диоксида азота, взвешенных веществ). // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 37, с. 204–215.
7. *Kahl J.D., Martinez D.A., Zaitseva N.A.* Long-term variability in the low-level inversion layer over the Arctic Ocean. // International Journal of Climatology, 1996, vol. 16, pp. 1297–1313.
8. University of Wyoming official site, Department of atmospheric science. — Электронный ресурс: [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>] (дата обращения: 16.04.2015).