

К ВОПРОСУ ОБЪЕКТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЕВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕЛЯБИНСКА)

С.М. Абдуллаев, Е.А. Напольских, О.Ю. Ленская

Обоснована необходимость и предложен новый метод оценки степени экстремального загрязнения городской атмосферы. Объединяя традиционные методы «на конце трубы» и новые процедуры «жизненного цикла», метод включает стадии: 1) обработки многолетних данных мониторинга загрязняющих веществ (ЗВ) в различных районах города; 2) выбор критических квантилей распределений ЗВ, используемых затем как индивидуальные пороги; 3) расчет баллов суточного превышения этих порогов в целом по городу. Результатом применения метода является климатически репрезентативная выборка случаев экстремального загрязнения (СЭЗ) атмосферы в теплый и холодный периоды года. На примере трехлетних наблюдений в Челябинске приведен краткий анализ метеорологических условий и эколого-химической структуры СЭЗ. Обсуждаются вопросы трансформации первичных (оксид азота) и стоков вторичных (двуокись азота и формальдегид) примесей.

Ключевые слова: оценка и прогноз загрязнения атмосферы, ПДК, жизненный цикл, обработка данных, химическая активность атмосферы, формальдегид, окислы азота.

1. Введение

1.1. Актуальность и аспекты проблемы. Высокий уровень загрязнения воздушной среды – главная экологическая проблема Южного Урала. Так, по многолетним данным Челябинск и Магнитогорск занимают весьма не почетные места как в общероссийском рейтинге хронически загрязненных крупных городов России, так и по числу случаев экстремального загрязнения [9].

Очевидно, что хроническое загрязнение – это результат комбинации а) значительного уровня валовых выбросов загрязняющих веществ (ЗВ); б) степени непосредственной опасности выбрасываемых ЗВ; в) высокой химической активности смеси ЗВ, способствующей возникновению вторичных газовых примесей, таких как формальдегид, так и мельчайших аэрозольных частиц – PM_{10} и $PM_{2,5}$ [1, 8–9].

1.2. Цели и задачи работы лежат в плоскости второго аспекта проблемы, а именно, в поиске ответов на вопрос: возможно ли снизить уровни экстремального загрязнения Челябинска? В проблеме снижения уровня экстремального загрязнения крупных агломераций можно выделить два класса взаимосвязанных оперативных задач – это задачи анализа и прогноза неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) накопления и трансформации примесей, и задача пространственно-временного регулирования выбросов промышленности и транспорта в крупной по масштабам управления системе. В целом, эти задачи краткосрочного прогноза в мире и ряде городов России нашли положительное научно-практическое решение¹.

В этой работе мы обращаемся к главной нерешенной научной проблеме – прогнозирование редких природно-антропогенных событий экстремальной опасности. В нашем конкретном случае – это случаи экстремального загрязнения (СЭЗ) атмосферы, сочетающие погодные и климатические факторы НМУ, мезомасштабные локальные циркуляции, техногенные и социальные факторы жизненного цикла мегаполиса. На основе многолетнего изучения проблем городской среды нами конкретизирована основная задача на развитие эвристического объектно-ориентированного подхода к прогнозированию СЭЗ.

1.3. Характеристика работы. Объектом работы являются события СЭЗ, а её предметом способы выделения СЭЗ на основе данных многолетнего мониторинга атмосферы города Челябинска. Для этого в разделе 2 описана выборка исходных данных (п. 2.1); дан краткий обзор оценок состояния воздушной среды (2.2) и представлена основная идея подхода к выделению случаев СЭЗ (2.3), а пункте 2.4 описаны 4 процедурных этапа методики, проиллюстрированные двумя частными примерами получения новых знаний о природе явления. В разделе 3 приводится краткий анализ выборки СЭЗ, сопровождаемый характеристикой крупномасштабных и локальных условий погоды эпизодов СЭЗ (3.1) и описанием структуры СЭЗ – слагающих СЭЗ химических компонент СЭЗ (3.2). Кроме этого, в п. 3.2 обсуждаются естественные и антропогенные причины различия структуры СЭЗ теплого и холодного периода года. Направление дальнейших исследований обсуждаются в разделе 4.

¹ Острая проблема качества воздуха в нашем городе до сих пор не решена лишь по субъективным причинам. Приемлемое для региона практическое решение этой экологической, экономической и социальной проблем неоднократно предлагалось первым автором, остается актуальным (см. Абдуллаев, 2005, 2007).

2. Исходные данные, основная идея и этапы методики

2.1. Характеристика данных и предварительная обработка. В работе были использованы данные 2009, 2010 и 2011 годов метеорологического и экологического мониторинга, производимого городской метеостанцией и на восьми стационарных постах наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (ПНЗ), а также метеорологического температурного профилемера МТП-5, установленного на базе Челябинского ЦГМС. Исходные сведения были занесены в таблицы и проанализированы согласно п. 2.3.

2.2. Оценки состояния воздушной среды. На практике мониторинга, прогноза и экологического проектирования используется как минимум пять типов оценок: 1) для оценки экстремального воздействия на человека используется отношение концентрации ЗВ к предельно-допустимой максимальной разовой концентрации (ПДК_{мр}); 2) для оценки хронического загрязнения воздуха за сроки от месяца до года используется индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), суммирующий средние уровни ЗВ, превышавших среднесуточную ПДК с учетом класса опасности ЗВ; 3) при проектировании и для получения разрешения на выбросы важна «фоновая концентрация 5%-й повторяемости» в долях ПДК; 4) в процедуре краткосрочного прогноза вычисляется число Р – суммарное число проб за данный срок с концентрациями ЗВ выше среднесуточных на ПНЗ по отношению к общему числу проб на всех ПНЗ; 5) «оценки жизненного цикла» [8–9] производятся с учетом экологического ущерба от всех поступающих выбросов, в том числе и по мере трансформации их во вторичные примеси (например, в единицах *ELU – Environment Load Units* или других).

2.3. Основная идея. Понимая необходимость соблюдения преемственности процедур в области охраны среды (см.[1]), в разрабатываемом подходе к выделению СЭЗ, максимально использованы элементы методик (1–5), но при этом введены новые компоненты, дополняющие и компенсирующие недостатки (1-5). Так, относительные характеристики (1) и (2), включающие в оценку только ЗВ, достигшие порога ПДК, страдают от довольно часто вносимых изменений в санитарно-гигиенические нормативы ЗВ². На практике это ведет к увеличению допустимой проектируемой, а затем и фактической антропогенной нагрузки (3). С другой стороны, кумулятивные нормы, учитывают все измеряемые (4) или потенциальные величины ЗВ (5), но этот вид оценок страдает недостаточной информацией поступающих от ПНЗ с ограниченным количеством измерений ЗВ (4) либо сведений оценок «жизненного цикла» локальных природно-антропогенных

² Например, с 24 мая 2014 года, ПДК_{м.р} и ПДК_{с.с.} для формальдегида (вещество 1-го класса опасности) установлены соответственно 0,05 мг/м³ и 0,01 мг/м³. О внесении изменения N 10 в ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» // Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 апреля 2014 г. N 27 г. Москва.

процессов (5). Пространственная неравномерность числа измерений и суммирования всех (или почти всех) ЗВ ослабляет реакцию этих норм на случаи экстремального загрязнения, в том числе и от локальных источников примесей (например, фторида водорода, тяжелых металлов и др.).

В методику определения случаев экстремального загрязнения (СЭЗ) положена следующая идея – использовать в качестве пороговой концентрации одну из старших квантилей распределения концентраций ЗВ на каждом из пунктов наблюдения, а интенсивность загрязнения атмосферы города характеризовать числом таких проб за искомый период времени, например, за сутки, неделю.

2.3. Этапы методики

Для выделения случаев экстремального загрязнения за 2009–2011 годы была применена процедура, состоящая из 4 этапов.

i. Предварительно на каждом из 8 ПНЗ разовые концентрации каждого из наблюдаемых ЗВ за год³ были ранжированы по возрастанию и, согласно идее методики, построены кривые накопленных частот концентраций каждого ЗВ за год.

ii. В качестве порогового значения, отделяющего потенциальную принадлежность события к СЭЗ от остальных событий, выбрана концентрация, соответствующая старшей 100–95 % = 5 % квантили распределения ЗВ. Для этого на кривых накопленных частот найдены значения концентраций 95%-й повторяемости (С95) на каждом из ПНЗ.

Иллюстрация этапа. Очевидно, что значения С95 различных ЗВ подвержены значительной пространственной и межгодовой изменчивости. Например, пониженные годовые уровни С95 формальдегида колеблются в интервале 0,010–0,016 мг/м³ и наблюдались на 16, 17 и 18 ПНЗ расположенных вблизи юго-восточной, северной и западной окраины города (см. табл. 1). Напротив, повышенные значения С95, от 0,028 до 0,035 мг/м³, тяготеют к границам промышленных зон, в том числе ОАО «Мечел» и ОАО «ЧМЭК» (ПНЗ 22 и 20).

iii. На следующем этапе были идентифицированы так называемые **критические дни** – дни когда в течение суток зарегистрировано событие с превышением С95, хотя бы одним ЗВ на каком-либо ПНЗ. Всего в 2009, 2010 и 2011 год выделено соответственно 272, 285 и 284 критических дня. Таким образом, не менее, чем в $\frac{3}{4}$ периода наблюдений концентрации ЗВ одной из проб ЗВ равны или превышают критерий С95.

Иллюстрация этапа. На рисунке 1 изображена последовательность критических дней во времени, характеризуемых в баллах «суточного превышения порога» – суммарное по городу количество событий с регистрацией концентраций ЗВ, превышавших локальный критерий С95. Очевидно, что

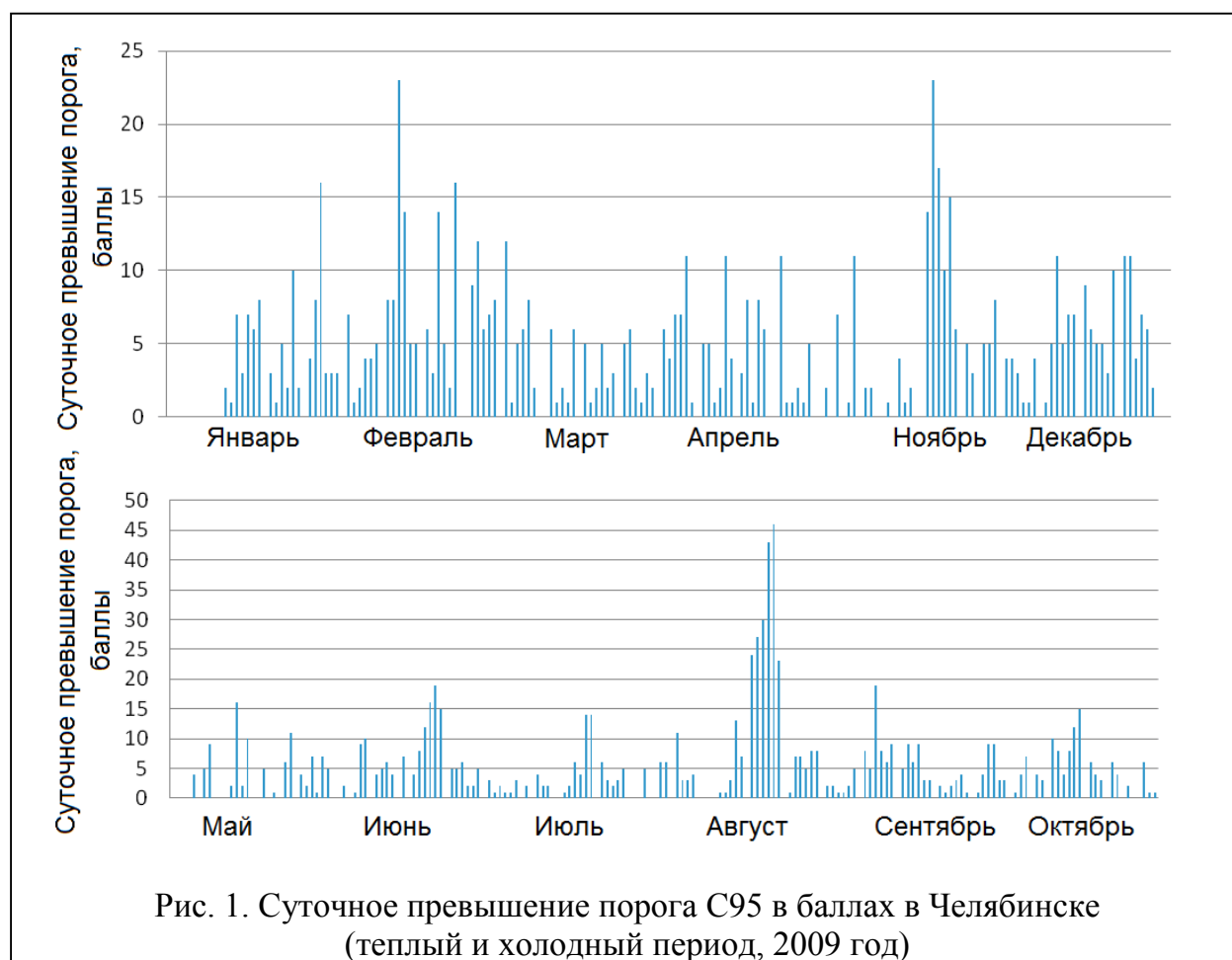
³ Это порядка тысячи измерений одного из веществ, т.е. от 5 до 20 тыс. измерений различных ЗВ на одном ПНЗ за год.

введенная кумулятивная характеристика демонстрирует значительную межсезонную и внутрисезонную изменчивость. Так, в летний период 2009 года её максимальные значения достигали ≈ 50 баллов, что примерно в 2 раза больше зимних максимумов около 25 баллов.

Таблица 1

Границы старшей 5 % квантили (мг/м³) распределения концентраций формальдегида на постах мониторинга атмосферы Челябинска (приведены концентрации 95 % повторяемости – С95 и максимальные Смах)

Пост	2009 год		2010 год		2011 год	
	С95	Смах	С95	Смах	С95	Смах
16	0,016	0,080	0,015	0,023	0,012	0,033
17	0,020	0,067	0,013	0,020	0,010	0,027
18	0,018	0,034	0,012	0,020	0,013	0,030
20	0,031	0,052	0,028	0,057	0,021	0,071
22	0,024	0,200	0,014	0,038	0,035	0,057
23	0,021	0,033	0,017	0,039	0,021	0,042
27	0,028	0,050	0,027	0,045	0,029	0,071
28	0,018	0,025	0,018	0,030	0,031	0,060



Для внутрисезонной изменчивости (рис. 1, вверху и внизу) характерны как единичные «всплески» загрязнения, наблюдаемые почти еженедельно, так и разделенные двумя – четырьмя неделями «пакеты загрязнения» с непрерывном 3–5 дневным эпизодом СЭЗ, доминирующем в сезонном ходе негативного воздействия.

iv. **Случаи экстремального загрязнения (СЭЗ)** выделены из общей выборки критических дней за год по сумме проб с концентрациями, превышавшими С95, или баллов. Затем для климатической и сезонной адекватности выборки в годовом ходе, выделено по 10 дней⁴ теплого (май–октябрь) и холодного периода (ноябрь–апрель) с наибольшей суточной суммой числа проб в городе с концентрацией большей С95.

Иллюстрация результатов этапа. Использование кумулятивной нормы, позволяет с большой уверенностью выделять дни с СЭЗ в сравнении со способом по числу случаев превышения ПДК_{мр}, как в летний, так и зимней период. Это отчетливо заметно при сравнении последовательности дней с СЭЗ с числом событий с концентраций ЗВ выше ПДК м.р. (см. табл. 2 и 3, два последних столбца).

Таблица 2
Интенсивность и структура эпизодов СЭЗ теплого периода 2009 года

№ п/п	Дата СЭЗ	Формальдегид	Угарный газ	Взвешенные вещества	Сернистый газ	Двуокись азота	Аммиак	Монокись азота	Сероводород	Фенол	Фторид водорода	Сумма, баллы	ЗВ ≥ ПДК _{м.р.}
1	13.05	1	2	3	3	5	1				1	16	2
2	18.06	8			1	2	2			3		16	3
3	19.06	9	1	3	4	2	1		1			21	5
4	20.06	10			3		1				1	15	3
5	17.07	8			6							14	3
6	17.08		19	1						1		21	8
7	18.08	5	9	1	12							26	3
8	19.08	7	5	1	17	2				1		33	3
9	20.08	7	21	2	4	1				3	1	43	6
10	21.08	11	19	4		5			1	3		46	12
11	сумма	66	76	15	50	17	5	0	2	11	3	245	48

Действительно, пятикратное превышение суммы баллов СЭЗ (160–250) в сравнении с числом случаев концентраций больших ПДК_{м.р} (30–50) дает не только более точную шкалу для ранжирования СЭЗ по интенсивности, но и возможность для интерпретации эколого-химической структуры, формирующей индивидуальный СЭЗ (см. п. 3.2).

⁴ Выбор 10 дней как СЭЗ в теплый и холодный период объясняется достаточно просто. Это примерно 5 % от общего годового числа суточных наблюдений равно 0,05×365 суток≈19 суток.

Таблица 3

Интенсивность и структура эпизодов СЭЗ холодного периода 2009 года

№ п/п	Дата СЭЗ	Формальдегид	Угарный газ	Взвешенные вещества	Сернистый газ	Двуокись азота	Аммиак	Моноокись азота	Сероводород	Фенол	Фторид в-дорода	Сумма, баллы	$ЗВ \geq$ ПДКм.р.
1	28.01		4	1	1	7		1		1	1	16	1
2	11.02	1	1	2	5	8		4		1	1	23	1
3	12.02				8	3		2				14	1
4	18.02		3	1		7		3				14	3
5	21.02			4	5	3		1	1		2	16	4
6	25.02		5	2	3			1			1	12	2
7	16.11		4	4	1	4		1				14	3
8	17.11		4	4	4	9		1	1			23	7
9	18.11			4	2	7		3		1		17	1
10	20.11	1	1	4		5		4				15	7
11	сумма	2	22	26	29	53	0	21	2	3	5	163	30

3. Результаты

3.1. Повторяемость метеорологических факторов, способствующих развитию СЭЗ выражена в процентах от общего числа СЭЗ. Температурная инверсия в нижнем слое атмосферы наблюдалась в 87 % СЭЗ холодного сезона и в 86 % случаях в теплый период. Штиль и слабый переменный ветер в течение СЭЗ отмечался в 72 % в холодный период и 57 % в теплый. В оставшихся СЭЗ ветер не превышал 5 м/с, причем в холодный период это были ветра ЮВ и ЮЗ четвертей ~25 %, а в теплый период, в равной мере ЮВ, СЗ и СВ ветра (33 %). Явления, наблюдавшиеся в СЭЗ холодного периода, это туманы и дымки (13 %), а в СЭЗ теплого периода наблюдались слабые осадки, ливневые дожди и грозы (18 %).

3.2. Эколого-химическая структура экстремального загрязнения Челябинска определяется комплексом из 10 типичных для городской атмосферы поллютантов, суммарные годовые и сезонные вклады которых представлены в таблице 4. Основной вклад (75 %) в годовую повторяемость СЭЗ (табл. 4, строка 1) вносят традиционные для городской атмосферы газы – монооксид углерода, двуокись азота, сернистый газ и формальдегид.

Таблица 4

Сводная химическая структура экстремального загрязнения воздушной среды Челябинска (сумма в баллах за трехлетку)

№ п.п.	Повторяемость	Формальдегид	Угарный газ, СО	Взвешенные вещества	Сернистый газ	Двуокись азота (NO ₂)	Аммиак	Оксид азота (NO)	Сероводород	Фенол	Фторид в-дорода
1	За три года	197	355	87	186	202	35	59	13	87	35
2	Три теплых сезона	171	272	29	94	30	33	1	2	51	4
3	Три холодных сезона	26	83	58	92	172	2	58	11	36	31
4	Теплые–холодные	145	189	-29	2	-142	31	-57	-9	15	-27

Сезонные компоненты химического состава СЭЗ и его изменения демонстрируются в строках 2, 3 и 4 таблицы 4. В СЭЗ теплых сезонов преобладают процессы, ведущие к доминированию концентраций оксида углерода и формальдегида. В формировании СЭЗ холодного периода, напротив, доминируют процессы с участием окислов азота II и IV. Заметен вклад взвешенных веществ. Примечательно, что ряд веществ является маркером специфических аэрохимических условий. Например, явным «термофилом» является аммиак, а окись азота, фторид водорода и сероводород – типичные «криофилы». Сернистый газ и фенол – «мезофиллы».

3.3. Обсуждение. Сезонность эколого-химической структуры экстремального загрязнения Челябинска частично объяснима тем, что интенсивность и структура выбросов всех элементов городской системы имеют сезонные колебания, причем реакция этих элементов на температурный фон может быть различной. В холодный период, увеличивается нагрузка на теплоэнергетические техногенные элементы и с ней растут валовые выбросы продуктов сгорания – оксидов углерода и азота. Неконтролируемое поступление продуктов (аммиак, метан) биологического разложения от биотехнических элементов, подобных полигонам бытовых отходов (проще «городской свалке») или системам очистки сточных вод, максимально в теплый период. Заметим, что депонирование загрязнений городским ландшафтом имеет собственный сезонный цикл, а в отдельные периоды ландшафты сами могут быть источником примесей.

С другой стороны, химический состав воздушной среды зависит от скорости трансформации первичных примесей во вторичные продукты, т.н. химической активности атмосферы. В практике мониторинга городской атмосферы [3] химическая активность часто оценивается как отношение концентрации двуокиси азота NO_2 к сумме концентраций оксидов азота NO_x присутствующих в воздушной среде, и обычно сводится к коэффициенту трансформации $\text{КТ} = [\text{NO}_2] / ([\text{NO}] + [\text{NO}_2])$. Повышенный КТ обычно означает не только ускорение превращения NO_x в NO_2 , но косвенно интенсификацию последовательных фотохимических реакциях, ведущих к появлению новых ЗВ, в том числе формальдегида.

На химическую активность влияет интенсивность солнечного излучения, температура и влажность воздуха, наличие малых примесей-катализаторов и ингибиторов процессов и др. факторы. Анализ этой проблемы сотрудниками ГГО [2–3] выявил факты, важные для интерпретации физико-химических процессов, ведущих к наблюдаемой структуре СЭЗ. Во-первых, по пока неизвестным причинам химическая активность атмосферы Челябинска резко возросла. Во-вторых, более чем 60-процентное изменение КТ, произошедшее с 1997 по 2010 год в Челябинске, является одним самых значимых среди городов России [3], и в итоге коэффициент трансформации до-

стиг почти предельных значений $\sim 0,7$. С другой стороны, сезонное увеличение либо уменьшение температуры и интенсивности инсоляции ведет к интенсификации процессов по всей цепочке превращений от оксидов азота до формальдегида. Этим можно объяснить высокий вклад формальдегида в формирование летних СЭЗ и отсутствие такового от оксида азота NO. Низкая скорость реакции $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$ зимой, качественно объясняет накопление первичного NO. Очевидно, что накопление NO_2 зимой и его «отсутствие» летом, контрастирующее с накоплением HCHO летом и его «отсутствие» летом связано с какой-то реакцией, ингибируемой в зимних СЭЗ и катализируемой летом.

4. Перспективы исследований

Уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Челябинска формируется под влиянием высоких и средних источников выбросов крупных промышленных предприятий длительного производственного цикла и приземных выбросов автотранспорта. Регулирование обоих источников выбросов осуществляется с использованием результатов традиционного краткосрочного прогноза НМУ, который основан на анализе систем погоды синоптического масштаба и интерполяционных технологий.

Объективный метод выделения СЭЗ и краткая характеристика этих событий позволяет по-новому взглянуть на проблему прогноза, регулирования СЭЗ и экологического проектирования. Корреляция летних и зимних СЭЗ с инверсионным типом погоды почти однозначно свидетельствует, что СЭЗ формируются вблизи центров малоподвижных высоких антициклонов. Очевидно, что в этих условиях, в накоплении примесей играет роль не столько локальная техногенная нагрузка, сколько локальные условия рассеяния примесей, сильно различающиеся в пределах мегаполиса, из-за возникновения характерных циркуляций «острова тепла», бризовых и долинных циркуляций – объектов мезомасштабного прогноза [6]. Очевидно также, что градостроительная политика и индивидуальное проектирование должны учитывать мезоциркуляции СЭЗ до и после строительства.

Несомненно, что наличие крупных инфраструктурных источников загрязнения затрудняет оперативную их реакцию на традиционный прогноз НМУ. В этом аспекте важно климатическое описание частоты и структуры СЭЗ и поиск методов долгосрочного прогноза таких случаев, в частности блокирующих атмосферных ситуаций.

Сосредоточение на СЭЗ, как на особых интенсивных и длительных случаях загрязнения дает новый импульс работам по интерпретации химического состава депонирующих сред [7, 9, 10] исследованиям касающихся ранжирования факторов риска здоровью населению [4–5] и многим другим аспектам охраны среды.

Библиографический список

1. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл природно-антропогенных систем: концепция и методы исследования / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, Ю.А. Сапельцева // Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 96–106.
2. Безуглая, Э.Ю. Возможность оценки высоких концентраций формальдегида при изменении температуры воздуха / Э.Ю. Безуглая, М.С. Загайнова, Т.П. Ивлева // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2012. – № 565. – С. 89–102.
3. Безуглая, Э.Ю. Химическая активность атмосферы на территории России / Э.Ю. Безуглая, И.А. Воробьева, Т.П. Ивлева // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2009. – № 559. – С. 121–133.
4. Захарова, И.А. Анализ влияния антропогенных факторов риска на респираторное здоровье населения молодого возраста г. Челябинска / И.А. Захарова // Врач-аспирант. – 2014. – С. 161–165.
5. Игнатова, Г.Л. Выявление хронических неспецифических заболеваний легких при амбулаторном обследовании лиц молодого возраста в условиях крупного промышленного города / Г.Л. Игнатова, И.А. Захарова // Лечебное дело. – 2014. – № 2. – С. 8–12.
6. Ленская, О.Ю. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев., А.И. Приказчиков, Д.Н. Соболев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 65–82.
7. Нестеров, Е.М. Об информативности показателей общей минерализации и кислотно-щелочных свойств при определении степени загрязненности снегового покрова урбанизированных территорий / Е.М. Нестеров, И.В. Грачева, Л.М. Зарина // Экология урбанизированных территорий. – 2012. – № 3. – С. 81–88.
8. Сапельцева, Ю.А. Жизненный цикл природно-антропогенных систем: оценка уровня экологической опасности / Ю.А. Сапельцева, С.М. Абдуллаев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия География. Геоэкология. – 2014. – № 1. – С. 78–83.
9. Сапельцева, Ю.А. К вопросу о границах и экологической опасности природно-антропогенных систем / Ю.А. Сапельцева, С.М. Абдуллаев // Естественные и технические науки. – 2013. – № 1. – С. 149–152.
10. Янченко, Н.И. Особенности изменения величины рН и электропроводности снежного покрова в Братске / Н.И. Янченко // Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии. – 2014. – Т. 325. – № 3. – С. 23–30.

[К содержанию](#)