

УДК 551.510.42

Доктор геогр. наук

А.В. Чередниченко¹

Доктор геогр. наук

В.С. Чередниченко²

Канд. геогр. наук

А.Н. Мунайтпасова²**СВЯЗЬ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА С ЗАГРЯЗНЯЮЩИМИ
ВЕЩЕСТВАМИ ВОЗДУХА ПО ДАННЫМ ГОРОДА АЛМАТЫ**

Ключевые слова: приземный озон, коэффициенты корреляции, загрязняющие вещества, сезоны года, температура, теснота связей

В работе рассматриваются теснота вероятных статистических связей между приземным озоном, сезонами года, и основными загрязняющими веществами, города Алматы. Рассчитаны коэффициенты корреляции, индекс детерминации, показано, что сезонный и температурный фактор оказывает более сильное действие на образование приземного озона, чем присутствующие загрязняющие вещества.

Введение. С момента обнаружения факта сокращения озонового слоя прошло более 50 лет. Огромное количество предположений, гипотез были изложены учеными. Научно-исследовательские работы, проводимые в рамках изучения озонового слоя, дали человечеству большое количество информации о природе многих явлений и процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы, были изучены более детально внутренние связи между компонентами среды. Многие вновь открытые факты заставили исследователей пересмотреть сложившиеся теории или внести в них существенные корректировки. Однако остается много открытых вопросов: нет окончательного мнения о механизме образования озона, стоит вопрос о различных связях между стратосферным озоном и его приземными концентрациями, влиянием синоптических процессов на вертикальный перенос стратосферного озона и прочее [11, 13, 10].

¹Университет "Туран", г. Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

В настоящей работе авторы ставили себе цель найти связи между изменениями приземных концентраций озона и концентрациями загрязняющих веществ в воздушном бассейне города.

Материалы и методы исследования. Для выполнения работы были привлечены первичные данные загрязняющих веществ атмосферного воздуха и приземного озона по данным городской метеорологической станции Алматы РГП "Казгидромет", за период с 2000 по 2012 гг., данные экспедиционных исследований города Алматы и пригородов, проведенных в рамках программы TACIS, за период с 2007...2009 гг. Измерения производились стандартными приборами, рекомендованными для измерительной сети мониторинга окружающей среды, которые прошли сертификацию в измерительной палате.

Для проведения сравнительного анализа применялся стандартный набор статистических методов, используемых в программе Excel. Также привлекались синоптические карты, для анализа полученных выводов. В качестве среднесуточной концентрации принималась средняя арифметическая из числа разовых, выявленных в течение суток, а в качестве среднесуточной концентрации – средняя арифметическая из числа среднесуточных, выявленных в течение месяца. Также определялись взвешенные индексы сезонности, позволяющие оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха отдельными примесями по сезонам года.

Результаты исследования. Известно, что основным стоком атмосферного озона являются приземный слой и поверхность земли. Поэтому количество приземного озона определяется с одной стороны интенсивностью его поступления из верхних слоев атмосферы (из стратосферы), а с другой – скоростью его разрушения в приземном слое и у земли [7, 16]. Лучшими условиями для поступления озона в приземный слой являются такие, когда развиты конвекция, турбулентность, а также упорядоченные перемещения воздуха по вертикали [7, 17].

Как показали исследования, такие условия создаются в весенне-летний период [6, 7, 15, 17]. Зимой, для большинства регионов Казахстана, кроме отсутствия условий для интенсивной конвекции и турбулентности характерно наличие приземных инверсий или изотермий, препятствующих поступлению озона в приземный слой. Это обуславливает в годовом ходе приземного озона максимум в летний период и минимум – в зимний период, май и декабрь-январь, соответственно. При этом амплитуда его

годового хода велика: от 0,01 мкг/м³ зимой до 0,16 мкг/м³ летом, т.е. летние средние концентрации превышают зимние в 10...15 раз. На рис. 1 представлен годовой ход приземного озона в г. Алматы за трехлетний период.

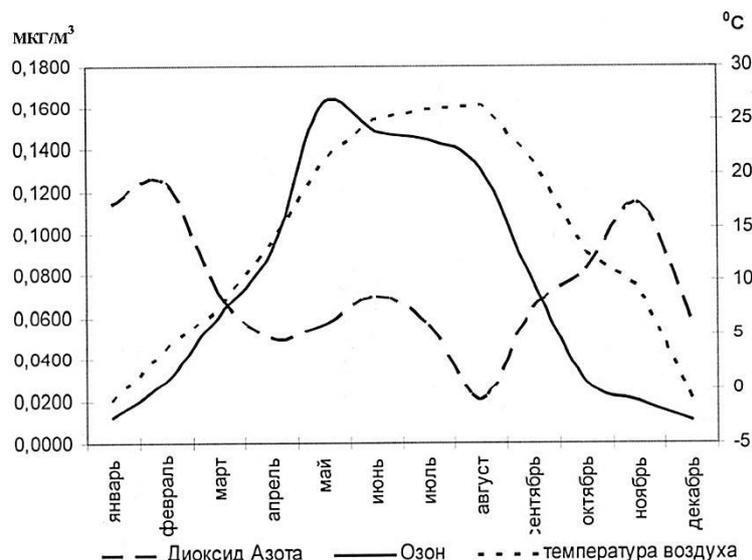


Рис. 1. Годовой ход приземного содержания озона в Алматы.

(Авторские исследования выполнены в рамках НИР «Оценка современного развития секторов потребителей озоноразрушающих веществ и их воздействие на озоновый слой и изменения климата. Возможности адаптации секторов к мерам, принимаемым для выполнения обязательств по Монреальскому протоколу по веществам, разрушающих озоновый слой. Заказчик Министерство экологии, геологии и природных ресурсов РК).

Считается, что скорость разрушения приземного озона зависит еще от концентраций диоксида азота. Поэтому на графике рис.1 нанесен также ход средних концентраций этого вещества. Кроме того, на графике нанесены, еще и среднемесячные температуры воздуха, характеризующие условия термической конвекции и турбулентности.

Можно видеть, что от зимы к лету кривая изменения концентраций приземного озона в общих чертах повторяет ход температуры воздуха. Однако, начиная с августа, концентрации озона снижаются заметно быстрее, чем снижается температура воздуха. Это обусловлено тем, что в конце лета и осенью для региона характерен вынос теплых воздушных масс с Аравийского полуострова и с Афганистана, как известно, бедных озоном [6, 8, 15, 17]. В результате, несмотря на вполне интенсивное перемешивание по вертикали, поступление озона в приземный слой уменьшается быстрее, чем происходит снижение температуры воздуха.

Годовой ход концентраций двуокиси азота обратный годовому ходу концентрации озона. Минимум двуокиси азота наблюдается в августе, а максимум – в зимний период, что вполне объяснимо. Основными источниками выбросов диоксида азота являются энергетические предприятия, а также автотранспорт. Выбросы энергетических предприятий максимальны в зимнее время и минимальны летом. В августе заметно снижается и количество автомобилей в городе по сравнению с весной и осенью. Следовательно, усмотреть эффект разрушения озона выбросами двуокиси азота не представляется возможным, по крайней мере на уровне среднемесячных величин.

Особый интерес представляют низкие концентрации озона в зимний период. Над юго-востоком Казахстана в это время почти постоянно располагается гребень сибирского антициклона, способствующий формированию довольно мощных приземных инверсий. Повторяемость таких инверсий в г. Алматы превышает 70 % [5]. В результате, поступление озона из средних слоев стратосферы затруднено, а процесс его разрушения в приземном слое имеет место. На фоне такой общей особенности, характерной для зимы, в отдельные дни, в зависимости от аэросиноптических условий, концентрации приземного озона могут сильно увеличиваться.

Суточный ход приземного озона. Поскольку приземный озон оказывает непосредственное влияние на человека, то его исследованию всегда уделялось большое внимание. Особый интерес представил его суточный ход. Еще в [8] было показано, что особенности суточного хода связаны с распределением озона в приземном слое, процессами переноса и разрушения приземного озона. Авторы [6] полагают, что суточные изменения приземного озона, являются следствием вертикального обмена массами воздуха. И только зимой при сильно ослабленном обмене вступает в силу второй фактор – «загрязнение воздуха взвешенными веществами, разрушающими озоновый слой». Там же было показано, что абсолютная и относительная амплитуда суточного хода приземного озона увеличивается летом примерно до 20 % от среднего за год, и уменьшается зимой. Амплитуда невелика в приморском климате и на возвышенностях зимой. Максимум концентраций озона наступает обычно вскоре после полудня, а минимум – утром во время восхода солнца. Летом максимум часто сдвигается на 16...17 ч. местного времени.

Исследования, выполненные разными авторами в последующие годы, углубили и расширили наши знания о суточном ходе приземного озона, и основные результаты, представленные в [8], и в ходе выполнения работы были подтверждены нами.

Суточный ход приземного озона в г. Алматы. В таблице 1 помещены основные характеристики суточного хода ПО в г. Алматы в срединные месяцы сезонов года.

Таблица 1

Величины приземного озона над г. Алматы (мкг/м³)*

Месяцы	Характеристики	Сроки				Среднегодовые значения ПО
		01	07	13	19	
Январь	Среднее	5	7	15	2	7
	max	74	83	51	25	–
	min	0	0	0	0	–
Апрель	среднее	108	10,5	227	85	132
	max	274	301	488	240	–
	min	3	3	50	0	–
Июль	среднее	201	168	359	221	238
	max	433	341	677	450	–
	min	20	31	55	37	–
Октябрь	среднее	38	37	172	19	94
	max	226	173	342	123	–
	min	0	0	0	0	–

*Авторские исследования, выполненные в рамках НИР «Оценка современного развития секторов потребителей озоноразрушающих веществ и их воздействие на озоновый слой и изменения климата. Возможности адаптации секторов к мерам, принимаемым для выполнения обязательств по Монреальскому протоколу по веществам, разрушающих озоновый слой, заказчик Министерство экологии, геологии и охраны окружающей среды РК.

Можно видеть, что суточный ход озона в г. Алматы существенно отличается от результатов, содержащихся в [5] и др. для равнин. Общим является то, что во все сезоны года максимум приземного озона имеет место в 13 часов местного времени. При этом средние концентрации от января (минимум) к июлю (максимум) увеличиваются в 20 раз, это существенно больше, чем величины годовых амплитуд для Европы и Северной Америки [8]. Причиной этого являются мощные приземные инверсии, обусловленные влиянием юго-западного отрога сибирского антициклона, наблюдающиеся в течение всего холодного периода, Инверсии препятствуют поступлению озона из тропосферы, поэтому зимой минимум ПО особенно глубокий.

Минимум озона в январе-апреле и октябре в суточном ходе имеет место не в утренние часы, а вечером в 19 часов. Только в июле его минимум наблюдается в 7 часов утра.

От максимума в 13 часов концентрации ПО быстро понижаются к 19 часам за счет ослабления конвекции, турбулентности, а также в связи с началом формирования приземной или приподнятой инверсии, которая имеет место в любое время года.

Даже с заходом солнца и охлаждением гор появляется горный ветер. Как известно из [6, 8], в приземном слое в холодный период на высоте примерно 500...1000 м имеет место максимум озона в его вертикальном распределении. Горный ветер, способствует опусканию воздушных масс вдоль горных долин и склонов, и обогащает озоном нижние слои. Этим и объясняется отсутствие минимума озона в 07 ч в холодные месяцы и его наличие – в теплые. При этом в июне-августе этот минимум особенно глубокий. Небольшие понижения концентраций ПО в 07 ч наблюдаются в апреле и октябре. В конце апреля и начале октября условия ближе к летним, чем к зимним. Поэтому мы можем наблюдать этот слабый вторичный минимум.

В таблице 1 приведены также крайние значения или экстремумы ПО, наблюдавшиеся в течение месяцев определенных сезонов. В январе, апреле и октябре нижние значения ПО определяются чувствительностью прибора. В январе в сроки 01, 07, 13 и 19 ч было зарегистрировано 18, 13, 4 и 18 случаев, когда прибор показывал нулевые концентрации ПО. В апреле и июле таких случаев не было, а в октябре они составили 9, 7, 0 и 11 соответственно по срокам. Апрель и октябрь, следовательно, несмотря на примерную одинаковость соляных условий имеют очень различающиеся средние величины ПО (132 и 94 мкг/м³, соответственно) и максимумы ПО, в октябре заметно ниже, чем в апреле. Самым заметным различием, однако, является повторяемость нулевых величин. В октябре имели место 27 таких случаев из 94, а в апреле – ни одного. Октябрь является переходным месяцем от лета к зиме [5, 9, 12, 14], когда летние процессы уже ослаблены, а зимние не набрали силу. Это обуславливает слабый обмен по вертикали (по сравнению с апрелем) и быстрое в летние месяцы снижение концентраций приземного озона.

Как видно из той же таблицы 1, экстремумы во все сроки в июле только в 2 раза превышают средние величины. В апреле и в октябре во время дневного максимума они тоже только в 2 раза превышают среднее

значение в 110 мкг/м^3 . В другие сроки, однако, это превышение может быть в 4 и более раз выше, чем средние за этот срок. Для января, ввиду большого числа нулевых значений, выводы менее надежны, экстремумы в период дневного максимума более чем в три раза превышают среднее, а в другие сроки они различаются в 10...15 раз. Отмечаемые особенности в величинах средних и экстремумов позволяют предположить следующее: существуют какие-то предельные величины концентраций озона в атмосфере, откуда он поступает в приземный слой [2, 4]. Летом, когда механизм вертикального обмена наиболее активен, приземные концентрации озона велики и они заметно приближаются к максимально возможным с учетом возможностей механизма передачи. Поэтому средние и максимальные величины ПО различаются минимально в годовом ходе. В другие сезоны в приземный слой поступает в среднем только часть озона от возможного. Только при активных синоптических процессах условия вертикального обмена временно улучшаются (ухудшаются) и появляется максимум (или минимум), существенно отличающийся от среднего.

Стоит отметить, что синоптические условия, при которых имеют место экстремальные условия концентрации озона, требуют самостоятельного рассмотрения и в рамках представленной работы не затрагиваются [2, 4, 9, 14].

Представляет также интерес рассчитать коэффициенты корреляции и установить связь между приземным озоном и основными загрязняющими веществами, характерными для городской среды. В нашем случае это были: взвешенные вещества; оксид углерода; диоксид азота; формальдегид. Привлечение этих данных, по мнению некоторых источников, могло помочь в последующем анализе фотохимических реакций.

По данным всемирной организации здравоохранения для приземного озона установлены предельно допустимые концентрации, равные 30 мкг/м^3 , повышение концентраций которых приводит к различным заболеваниям и даже к смертности населения [3, 4]. Взаимосвязь концентрации приземного озона и загрязняющих веществ воздушного бассейна города Алматы представлены в таблице 2.

В результате расчетов множественной регрессии, было получено, что параметры модели статистически значимы. Возможна экономическая интерпретация параметров модели: увеличение взвешенных веществ на

1 мкг/м³ приводит к уменьшению приземного озона в среднем на 0,0384 мкг/м³; увеличение оксидов углерода на 1 мкг/м³ приводит к уменьшению приземного озона в среднем на 0,0398 мкг/м³; увеличение диоксидов азота на 1 мкг/м³ приводит к уменьшению приземного озона в среднем на 1,316 мкг/м³; увеличение формальдегидов на 1 мкг/м³ приводит к уменьшению приземного озона в среднем на 3,036 мкг/м³.

Таблица 2

Взаимосвязь концентраций приземного озона с концентрациями: взвешенных веществ, оксида углерода, диоксида азота, формальдегида в атмосфере г. Алматы

№	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Индекс детерминации
1	$Y=303,7126-0,03839X_1-0,03981X_2-1,3156X_3-3,036X_4$	-0,224	-0,216
2	$Y=-0,15X_1+199,374$	-0,166	0,028
3	$Y=-6,047X_2+3026,139$	-0,382	0,146
4	$Y=0,1295X_3+87,5483$	-0,407	0,165
5	$Y=0,00289X_4+17,6783$	-0,048	-0,002

Примечание: Y – среднемесячные концентрации приземного озона; статистически значимые при $P < 0,05$ %; X_1 – взвешенные вещества; X_2 – оксид углерода; X_3 – диоксид азота; X_4 – формальдегид.

По максимальному коэффициенту эластичности $E_1 = 1,103$ делаем вывод, что наибольшее влияние на результат приземного озона оказывают взвешенные вещества. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера (таблица 3) [1].

Таблица 3

Коэффициенты изменчивости (%) и индексы сезонности концентраций приземного озона и других примесей в атмосферном воздухе г. Алматы

Загрязняющие вещества	Индексы сезонности				Коэффициент изменчивости
	Зима	Весна	Лето	Осень	
Приземный озон	0,782	3,154	5,381	2,683	76,51
Взвешенные вещества	3,417	2,368	2,206	4,009	33,62
Оксид углерода	4,175	2,380	2,017	3,427	44,23
Диоксид азота	2,967	3,099	2,901	3,033	29,08
Формальдегид	2,900	2,957	2,871	3,273	24,12

Максимальный уровень концентрации приземного озона достигается в весенне-летний период, когда приток солнечной радиации максимален, а также условия для вертикального перемешивания благоприятны. Индексы сезонности рассчитаны по средним концентрациям озона для каждого сезона года, и составили зимой – 78,16 %, весной – 315,42 %, летом – 538,14 % и осенью – 268,26 %. Превышенные индексы сезонности свидетельствуют о влиянии сезонного фактора в сторону увеличения уровня озона. Коэффициент сезонной изменчивости по средним концентрациям приземного озона составляет 76,51 % (> 20 %), что говорит о высокой степени сезонной изменчивости. Максимальные уровни остальных загрязняющих веществ были установлены в осенне-зимний период, индекс сезонности варьирует от 289,96 % до 417,48 %.

Таким образом, взаимосвязь между приземным озоном и основными загрязняющими веществами имеет отрицательные связи, что может быть использовано для выявления более глубоких зависимостей.

По индексам сезонности можно судить о том, что за все сезоны года загрязняющие вещества были высоки, так как индексы во все сезоны превышают 100 %. Наиболее характерно увеличение загрязнителей в осенне-зимний период объясняется дополнительной нагрузкой на отопительную систему.

Обсуждение. Полученные результаты суточного хода хорошо согласуются с работами [13, 7, 5, 6, 8, 12, 14]. При этом, суточные колебания ПО находятся в пределах $+ 20$ % от среднего. Можно видеть, что в г. Алматы в январе суточный ход средних величин ПО составляет 100 % от среднего в сторону максимума и 300 % в сторону минимума, в июне – 50 и 30 %, в апреле – 80 и 40 %, в октябре – 90 и 450 %, соответственно. Следовательно, скорость изменения приземных концентраций наименьшая в июле, зимой, а в переходные сезоны она выше.

Город Алматы расположен в предгорьях Заилийского Алатау в зоне горно-долинных ветров [14]. В [7] было показано, что на антарктическом побережье местные ветры существенно искажают суточный ход ПО. Влияние таких ветров и формирует суточный ход.

Выявленные отрицательные связи между приземным озоном и загрязняющими веществами, могут довольно сильно зависеть от местных условий, как это показано в ряде работ [5, 12, 14]. В работе [4] показано,

что влияние загрязняющих веществ на озон очень значительно и, более того, его концентрации могут иметь местное происхождение, что отчасти может подтверждаться полученными нами результатами.

Закключение. В ходе работы выявлена отличная закономерность между концентрациями приземного озона и сезоном года, выявлена тесная связь с температурой и выдвинуты предположения о причинах такой связи.

В тоже время, взаимосвязь между приземным озоном и основными загрязняющими веществами не получила твердо установленных закономерностей. Однако, это говорит скорее о необходимости продолжить исследования и расширить круг и методы исследований.

По индексам сезонности, можно судить о том, что за все сезоны года загрязняющие вещества были высокими, так как индексы во все сезоны превышают 100 %. Наиболее характерно увеличение загрязнителей в осенне-зимний период объясняется дополнительной нагрузкой на отопительную систему.

Стоит добавить, что приземный озон относится к первому классу опасности, и по этой причине изучение его колебаний, образования и взаимодействия с другими компонентами среды весьма важно для понимания условий жизни в городских условиях, где в настоящее время проживает больше половины всех людей Земли, и которые могут быть к ним очень уязвимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1000 с.
2. Белан И.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Том 9. – № 9. – С. 118-1213.
3. Глобальное потепление: позиция Международного института холода // Холодильная техника. – 2005. – № 4. – С. 98-120.
4. Голиков Р.А., Суржиков Д.В., Олещенко А.М., Кислицына В.В., Корсакова Т.Г., Мотуз И.Ю. Взаимосвязь между концентрациями озона и концентрациями компонентов промышленных выбросов в атмосферном воздухе / Труды конференции «Гигиена, организация здравоохранения и профпатология, семинар «актуальные вопросы современной профпатологии». – Новокузнецк, 08-09 июня, 2016. – С. 26-31.

5. Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф. Некоторые результаты мониторинга приземного озона на Кольском полуострове (1999-2003 гг.). // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 10. – С. 10-20.
6. Жадин Е.А. Долгопериодные вариации озона и циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 2. – С. 68-80.
7. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона. // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Том 19. – М.: ВИНТИ, 1989. – 212 с.
8. Кондратьев К.Я., Вароцос К.А. Исследование тропосферного озона в Европе // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 10. – С. 12-23.
9. Мунайтпасова А.Н. Суточный ход приземного озона в г. Алматы // Вестник КазНУ, Серия географическая. – №2 (39). – 2014. – С. 42- 48.
10. Охрана озонового слоя и глобальной климатической системы / Вопросы, связанные с гидрофторуглеродами и перфторуглеродами/. Доклад МГЭИК и ТЕАП. ВМО, 2005. – 88 с.
11. Перов С.Я., Хргиан Л.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 287 с.
12. Степанова Е.Ю. Оценка состояния приземного озона в городе на примере г. Алматы // Материалы международной научной конференции ”Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон” в Российском государственном гидрометеорологическом университете. – Санкт-Петербург: “Крисмас+”, 2006. – С. 58-65.
13. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 292 с.
14. Чередниченко А.В. Динамика и внутренняя структура месячных величин общего содержания озона над Казахстаном // Гидрометеорология и экология. – №4 (47). – 2007. – С. 23-36.
15. Forster C, Stohl A., Wind P. and Benedictow A. Intercontinental air pollution transport // Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe / MSC-W status Report №1, Oslo, Norway, 2005. – 49 p.
16. Stordal F., Gsaksen I.S.A., Horntvert K. Adiabatic circulation two-dimensional model with photochemistry simulations of ozone and long lived tracers with surface sources // Journ. Geophys. – Res. №90, 1985. – Pp.757-776.

17. Wild O., Zhu X. and Prather M.G. Fast-J: accurate simulation of in-and below cloud photolysis in tropospheric chemical models / Journ. Of Atmos. Chem. №37, 2000. – Pp. 245-282.

Поступила 06.05.2020

Географ. ғылымдар. докт. А.В. Чередниченко
Географ. ғылымдар. докт. В.С. Чередниченко
Географ. ғылымдар. канд. А.Н. Мунайтпасова

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ МӘЛІМЕТТЕРІ БОЙЫНША ЖЕР ОЗОНЫНЫҢ ЛАСТАУШЫ ЗАТТАРМЕН БАЙЛАНЫСЫ

Түйін сөздер: жер озоны, корреляция коэффициенттері, ластаушы заттар, жыл мезгілдері, температура, байланыс тығыздығы

Мақалада жердегі озонмен, жыл мезгілдерімен және де Алматы қаласындағы негізгі ластаушы заттар арасындағы статистикалық байланыстардың тығыздығының ықтималдығы қарастырылған. Корреляция коэффициенттері, детерминация индексі есептелді, бұл маусымдық және температуралық факторла жердегі озонның түзілуіне, яғни қатысты ластаушы заттарға қарағанда күшті әсер ететіндігі көрсетілді.

A.V. Cherednichenko, V.S. Cherednichenko, A.N. Munaitpasova

RELATIONSHIP OF LOCAL OZONE WITH AIR POLLUTANTS ACCORDING TO ALMATY CITY DATA

Key words: ground-level ozone, correlation coefficients, pollutants, seasons, temperature, tightness of relations

The article examines the closeness of the probable statistical relationships between ground-level ozone, seasons, and the main pollutants in the city of Almaty. The correlation coefficients and the determination index were calculated; it was shown that the seasonal and temperature factors have a stronger effect on the formation of ground-level ozone than the pollutants present.