

УДК 551.510.42

**ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В РАЙОНЕ АЛМАТЫ**

Доктор геогр. наук А.В. Чередниченко
Канд. геогр. наук Алексей В. Чередниченко
Доктор геогр. наук В.С. Чередниченко

Рассмотрен годовой и суточный ход приземных концентраций озона. Показано, что в течение большей части года его концентрации существенно превышают предельно допустимые. Местоположение города и горно-долинная циркуляция оказывают заметное влияние на суточный ход, способствуя образованию двух максимумов концентраций, между которыми к концу дня формируется глубокий минимум, обусловленный разрушающим воздействием на приземный озон оксидов азота, содержащихся в выбросах автотранспорта.

Озон является довольно агрессивным химическим веществом и по воздействию на человеческий организм, в первую очередь на дыхательные пути, его относят к первой категории опасности. Особую опасность представляет приземный озон (ПО), т.е. озон, который находится на уровне обитания человека и легко попадает в его дыхательные пути. Как оказалось, приземные концентрации озона в Алматы высокие и это делает проблему его изучения особенно актуальной [4].

Основным местом, где образуется озон, являются средние и высокие слои стратосферы. Из этих слоев часть озона поступает в тропосферу и достигает приземного слоя. Вблизи поверхности земли озон активно разрушается. Получается, что стратосфера – источник образующегося озона, а подстилающая поверхность – сток озона, являются звеньями одной цепи в системе общей циркуляции озона [1, 2, 6, 10, 11, 12, 13, 15]. Очевидно также, что количество озона в пограничном слое зависит от двух факторов:

1. наличия озона в стратосфере и условий его переноса через тропосферу;
2. условий в пограничном, особенно в приземном слое воздуха, способствующих разрушению (или накоплению) озона.

Естественно, что для понимания суточного хода приземного озона, его приземного цикла, необходимы сведения о его вертикальном распределении в тропосфере. Рассмотрим некоторые общие особенности такого распределения, в основном те, которые нами будут потом использованы [1, 2, 8, 9, 13, 15, 17, 18].

По данным электрохимических радиозондов видно, что в нижней тропосфере, а также в пограничном ее слое содержание озона увеличивается с высотой, особенно это заметно в зимнее время [4, 13, 15]. Далее это возрастание сменяется убыванием, которое наблюдается вплоть до уровня 400 мб. В летние месяцы возрастание концентрации озона не обнаруживается. Возможно, этот уровень расположен ниже 900 мб, но поскольку станции, где осуществлялось зондирование, расположены выше уровня 900 мб, то он не был зафиксирован.

Очень важно, что над всеми четырьмя обсерваториями, которые расположены в умеренных широтах, в слое от 900 до 300 мб и выше, во все сезоны года отношение смеси, т.е. отношение концентраций озона по

отношению к воздуху r_3 , возрастает с высотой, т.е. $\frac{\partial r_3}{\partial z} > 0$. Это значит,

что при вертикальном перемешивании воздуха средний поток F озона направлен вниз:

$$F = K_3 \rho \frac{\partial r_3}{\partial z} \cong K_3 \frac{\partial \rho_3}{\partial z},$$

где K_3 – коэффициент турбулентности для озона; ρ_3 – плотность озона; ρ – плотность воздуха.

Если предположить, что в слое 800...400 мб нет своих источников и стоков озона и направление потока F не меняется с высотой, то естественно ожидать, что тогда коэффициент турбулентности K должен меняться обратно пропорционально к $\frac{\partial r_3}{\partial z}$.

Очень активное разрушение озона происходит именно вблизи поверхности земли. Процесс такого разрушения находится в зависимости от теплооборота, процессов испарения, явлений погоды у поверхности земли и др. Все это необходимо учитывать при объяснении колебаний концентраций приземного озона. Так же важно учитывать еще и высоту над поверхностью земли, на которой велись наблюдения, поскольку различия в уровне измерений всего в несколько метров, могут заметно повлиять на величину концентрации озона [13]. Не исключено образование озона и в

самом приземном слое, например, при грозах и некоторых видах загрязнения атмосферы выбросами, в первую очередь, продуктов сгорания автомобильного топлива. По крайней мере, в умеренных широтах в пограничном слое парциальное давление озона P_3 убывает с приближением к поверхности земли. Летом это убывание происходит быстрее, чем зимой. Между высотами 25 и 5 м, убывание происходит почти линейно. На малых высотах градиент $\frac{\partial r_3}{\partial z}$ сильно убывает ночью, когда устойчивость атмосферы увеличивается. На возвышенностях величины P_3 и ρ_3 заметно больше, чем в низинах. Над морем концентрация озона больше, чем над сушей [13, 15, 18].

В годовом ходе приземные концентрации озона имеют максимум в июне и минимум в декабре. При этом, в период с мая по август более 50 % измерений и около 70 % в холодную часть года дают величины 0...20 мкг/м³. Очень небольшое число измерений дают величины, в 8...10 раз превышающие средние. Эти выбросы – вероятнее всего – результат кратковременного усиления вертикального обмена.

Максимум приземного озона по времени на три месяца наступает позже, чем максимум стратосферного озона, что обусловлено запаздыванием его опускания в самой верхней тропосфере у тропопаузы, после чего волна озона уже быстро распространяется до земли.

Основным стоком атмосферного озона, как известно, являются приземный слой и поверхность земли, куда он просачивается. Поэтому количество приземного озона определяется с одной стороны условиями его просачивания из верхних слоев атмосферы (из стратосферы), а с другой – скоростью его разрушения в приземном слое и у земли. Лучшими условиями для поступления озона в приземный слой являются такие, когда развиты конвекция, турбулентность, а также упорядоченные перемещения воздуха по вертикали. Такие условия создаются в весенне-летний период и зоне атмосферных фронтов.

Особый интерес представляет суточный ход озона. Еще в [13, 15] было показано, что особенности суточного хода связаны с распределением озона в приземном слое и процессами переноса и разрушения приземного озона. Автор [13] полагает, следовательно, 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 дымом и прочими загрязняющими веществами, разру-

шающими озоновой слой». Там же было показано, что абсолютная и относительная амплитуда суточного хода приземного озона увеличивается летом примерно до 20 % от среднего и уменьшается зимой. Амплитуда невелика в приморском климате и на возвышенностях зимой. Максимум плотности озона ρ наступает обычно вскоре после полудня, а минимум – утром во время восхода солнца. Летом максимум часто сдвигается на 16...17 ч местного времени. Таким образом, приземный озон имеет обычно простой суточный ход с одним максимумом и одним минимумом.

Исследования, выполненные разными авторами в последующие годы, углубили и расширили наши знания о суточном ходе приземного озона, но основные результаты, изложенные в [13], были подтверждены.

Зимой для большинства регионов Казахстана и для района Алматы 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 весенне-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 озона превышают зимние в 10...15 раз. На рисунке представлен годовой ход приземного озона в Алматы за трехлетний период.

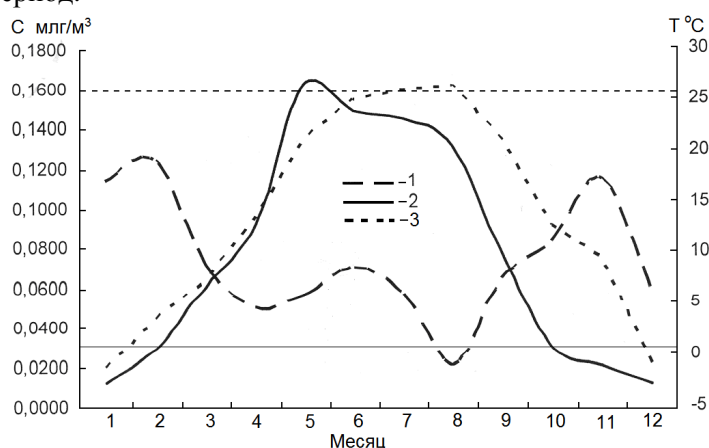


Рис. Годовой ход приземного содержания озона в г. Алматы. 1 – диоксид азота, 2 – озон, 3 – температура воздуха.

Поскольку скорость разрушения приземного озона согласно теории зависит еще от концентраций оксида азота [13, 15], то на рисунке нанесен также ход средних концентраций всех оксидов азота в целом. 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. 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 из Афганистана, бедных, как известно, озоном [16, 17, 18]. В результате, несмотря на вполне интенсивное перемешивание по вертикали, поступление озона в приземный слой уменьшается быстрее, чем происходит снижение температуры воздуха.

За предельно разовые, т.е. наблюдающиеся в течение 20 мин, концентрации озона (ПДК) приняты 160 мкг/м^3 , а за среднесуточные – 30 мкг/м^3 . Можно видеть, что среднесуточные концентрации озона, превышающие 30 мкг/м^3 , в Алматы наблюдаются в течение восьми месяцев, а 160 мкг/м^3 – в течение одного двух месяцев в году (рис.).

Годовой ход концентраций оксидов азота обратный годовому ходу концентрации озона. Минимум концентраций оксидов азота, который обычно пересчитывают в двуокись азота, наблюдается в августе, а максимум - в зимний период, что вполне объяснимо. Основными источниками выбросов оксидов азота являются энергетические предприятия, а также автотранспорт. Выбросы энергетических предприятий максимальны в зимнее время и минимальны летом. В августе несколько снижается и количество автомобилей в городе по сравнению с весной и осенью, однако их количество остается все равно большим.

В [4] исследовалась динамика приземного озона на Кольском полуострове и было показано, что его концентрации хорошо коррелируют с выбросами автотранспорта и практически не зависят от выбросов промышленных предприятий, в первую очередь тепловых электростанций. Авторы это объясняют тем, что автотранспорт выбрасывает в основном оксиды азота, которые, доокисляясь в атмосфере до двуокиси азота под действием солнечных лучей, используют для этого озон, разрушая его. В выбросах тепловых электростанций из оксидов азота преобладает его двуокись, которая не участвует в разрушении озона. Совершенно аналогичная ситуация имеет место в Алматы, что будет показано ниже.

Особый интерес представляют низкие концентрации озона в зимний период. Над юго-востоком Казахстана в это время почти постоянно распо-

лагается гребень сибирского антициклона, способствующий формированию довольно мощных приземных инверсий. Повторяемость таких инверсий в Алматы превышает 70 % [3, 14]. В результате поступление озона из верхних слоев через тропосферу затруднено, а процесс его разрушения в приземном слое имеет место. В результате в зимние месяцы в Алматы отмечаются особенно низкие концентрации приземного озона, не характерные не только для полосы умеренных широт, но и для полярных широт [4].

Несколько слов о влиянии загрязняющих веществ, содержащихся в приземном слое, на концентрацию приземного озона. Как справедливо отмечено в [5, 6, 10, 11, 12, 13], такое влияние легче всего можно заметить зимой, когда естественные приземные концентрации малы. Однако и зимой имеется целый ряд трудностей. В [8, 9] указывается, что горизонтальный перенос приземного озона часто легче выделить, чем влияние загрязняющих веществ. Можно, конечно, предположить, что очень низкие концентрации ПО обусловлены также и особенно интенсивным его разрушением под воздействием высоких концентраций оксидов азота, наблюдающихся в этом сезоне. Однако ограниченное количество данных в это время не позволяют пока сделать такой вывод. В этом направлении требуются дополнительные исследования.

На фоне такой общей особенности, характерной для зимы, в отдельные дни в зависимости от аэросиноптических условий концентрации приземного озона могут сильно увеличиваться. Аэросиноптические условия, при которых это происходит, представляют отдельную важную проблему, которая здесь не рассматривается.

В таблице помещены основные характеристики суточного хода ПО в Алматы в срединные месяцы сезонов года.

Можно видеть, что суточный ход озона в Алматы существенно отличается от результатов, содержащихся в [5, 6, 10, 13, 15] для равнин. Общим является то, что во все сезоны года основной максимум приземного озона имеет место около 13 часов местного времени, а ночью, в 01 ч, обычным является существование вторичного максимума. Средние концентрации озона от января (минимум) к июлю (максимум) увеличиваются в 20 раз, что существенно больше, чем величины годовых амплитуд для Европы и Северной Америки. Причиной этого являются мощные приземные инверсии, обусловленные влиянием юго-западного отрога сибирского антициклона, наблюдающиеся в течение всего холодного периода. Инвер-

сии препятствуют поступлению озона из тропосферы, поэтому зимой минимум ПО особенно глубокий [3, 14].

Таблица

Величины приземного озона над Алматы (мкг/м³)

Месяц	Характеристика	Срок				Год
		01	07	13	19	
Январь	среднее	5	7	15	2	7
	max	74	83	51	25	-
	min	0	0	0	0	-
Апрель	среднее	108	105	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	-

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. Алматы расположен в предгорьях Заилийского Алатау в зоне горно-долинных ветров [3]. В [13] было показано, что местные ветры, например, на антарктическом побережье и других местах, существенно искажают простой суточный ход ПО.

От максимума в 13 часов концентрации ПО быстро понижаются к 19 часам за счет ослабления конвекции, турбулентности, накопления оксидов азота в результате выбросов автотранспорта, а также начала формирования приземной или приподнятой инверсии, которая имеет место и в любое время года, хотя летом природа у нее другая. Далее с заходом солнца, а на самом деле несколько ранее, происходит охлаждение гор и появляется горный ветер. Как известно [13, 15], в приземном пограничном 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 озонем нижние слои. Можно предположить, что прежде чем начнется рост концентрации озона, обусловленный его поступлением из верхнего обогащенного слоя, сначала происходит быстрое снижение дневных концентраций озона из-за разбавления воздуха в городе обедненным озонем горным воздухом. Появляется, таким образом, основной минимум озона

(см. табл.). К середине ночи начинает поступать воздух из слоя, обогащенного озоном. В результате в срок 01 ч появляется как бы вторичный максимум в суточном ходе концентраций озона. Этим и объясняется за некоторыми исключениями слабая выраженность минимума озона в 07 ч в холодные месяцы и его наличие – в теплое. При этом в июне – августе этот минимум особенно глубокий, поскольку горный ветер летом особенно активен [3]. Небольшие понижения концентраций ПО в 07 ч по сравнению со смежными сроками 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.

Как сильно меняются концентрации приземного озона в течение суток? Согласно [13, 15], суточные колебания ПО находятся в пределах 20 % от среднего. В таблице приведены также крайние значения или экстремумы ПО, наблюдавшиеся в течение месяцев определенных сезонов. Как можно видеть, максимальные величины могут превышать среднемесячные концентрации в два раза.

Можно видеть также, что в 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. Скорость изменения приземных концентраций наименьшая в июле и зимой, а в переходные сезоны она выше. В отдельные дни, следовательно, концентрации озона могут превышать предельно разовые ПДК в 4...6 раз, а среднесуточные ПДК – в 20 раз.

Диапазон изменения приземных концентраций наименьший в июле и зимой, а в переходные сезоны он выше. В январе, а также в апреле и октябре нижние значения ПО определяются чувствительностью прибора. В январе в сроки 01, 07, 13 и 19 ч было зарегистрировано по 18, 13, 4 и 18 случаев соответственно, 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, как видно из таблицы, 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 [13], когда летние процессы уже ослаблены, а зимние не набрали силу [14]. Это обуславливает слабый обмен по вертикали (по сравнению с

апрелем) и быстрое в летние месяцы снижение приземного озона. Интересно, что авторы [4] нулевых значений озона в своем регионе, несмотря на его более северное положение, не фиксируют.

Как видно из той же таблицы, экстремумы во все сроки в июле только в 2 раза превышают средние величины. В апреле и в октябре во время дневного максимума приземные концентрации тоже только в 2 раза превышают средние значения. В другие сроки, однако, это превышение может быть в 5 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. 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.

Известно, что в летний период суммарные выбросы оксидов азота предприятиями в несколько раз ниже, чем зимой. Соответственно и приземные их концентрации невелики. В то же время выбросы оксидов азота автотранспортом летом примерно такие же, как и зимой, но несколько ниже, чем в апреле и мае. В то же время минимум концентраций ПО в 19 ч хорошо выражен. Это подтверждает выводы, полученные в [4], согласно которым именно выбросы оксида азота автотранспортом оказывают сильное разрушающее влияние на приземный озон, тогда как выбросы промышленных предприятий оказывают второстепенное влияние.

Срок 19 ч совпадает с часом «пик» в городе. Выбросы углеводородов должны быть значимы, а в июле в это время имеет место солнечная радиация и наблюдается высокая температура воздуха. В результате разрушение озона у земли в послеобеденный период достигает наибольшей интенсивности. С суточным ходом концентраций оксидов азота, концентрации ПО имеют достаточно хорошую обратную корреляцию.

В качестве выводов к работе можно отметить следующее. Влияние загрязняющих веществ, в первую очередь оксидов азота, выбрасываемых автотранспортом, оказывают заметное разрушающее влияние в течение всего года. В суточном ходе это наиболее сильно проявляется в час «пик», приходящийся примерно на срок 19 ч.

Влияние горно-долинной циркуляции (горного ветра) проявляется в том, что под его влиянием к середине ночи происходит вынос воздуха из более высоких слоев атмосферы, обогащенного озоном. Из-за того, что к этому времени выбросы автотранспорта очень существенно снижаются, то в городе формируется вторичный максимум концентраций ПО, приходящийся примерно на срок 01 ч.

Практически постоянное существование приземной или приподнятой инверсии в районе Алматы в зимний период способствует тому, что в это время наблюдаются чрезвычайно низкие концентрации приземного озона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белан И.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений. // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Том 9. – № 9. – С. 1184-1213.
2. Вароцос К.А., Кондратьев К.Я. Загрязнение тропосферы и ультрафиолетовая солнечная радиация. // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – № 2. – С. 1020-1030.
3. Гельмгольц Н.Ф. Горно-долинная циркуляция северных склонов и предгорий Тянь-Шаня. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 330 с.
4. 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.
5. Егорова Т.А., Розанов Е.В., Зубов В.А., Кароль И.Л. Модель для исследования трендов озона (мезон). // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Том 39. – № 3. – С. 310-326.
6. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона в 1999...2002 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Том 40. – № 4. – С. 567-576.
7. Жадин Е.А. Долгопериодные вариации озона и циркуляции атмосферы. // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 2. – С. 68-80.
8. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова Н.Н., Лезина Е.А., Романюк Я.О. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2008 г. // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 3. – С. 102-109.

9. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова Н.Н., Лезина Е.А. Содержание озона над территорией Российской Федерации в 2006 г. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 2. – С. 116-121.
10. Кароль И.Л., Киселев А.А. Фотохимические модели атмосферы и их использование в исследованиях озоносферы и климата (обзор) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Том 42. – № 1. – С. 3-34.
11. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона. // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Том 19. – М.: ВИНТИ, 1989. – 212 с.
12. Кондратьев К.Я., Вароцос К.А. Исследование тропосферного озона в Европе // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 10. – С. 12-23.
13. Перов С.Я., Хргиан Л.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 287 с.
14. Синоптические процессы Средней Азии. / В.А. Бугаев, В.А. Джорджио и др. – Ташкент: Изд. АН Узб. ССР, 1957. – 478 с.
15. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 292 с.
16. Sinnhuber B.M. et al. Large loss of total ozone during the Arctic winter of 1999/2000. – Geophys. Res. Lett., 2006, Vol. 27. – No. 21. – P. 3473-3476.
17. The Northern Hemisphere Stratosphere in the Winter and Spring of 1999/2000. – The Report of European Ozone Research Coordinating Union. – 2000. – P. 4-6.
18. World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report № 47. – 2003, P. 3.1-3.58.

КазНИИЭЖ, г. Алматы

АЛМАТЫ АУДАНЫНДАҒЫ ЖЕРГЕ ЖАҚЫН ОЗОННЫҢ УАҚЫТША ҮЛЕСТІРЛУІНІҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Геогр. ғылымд. докторы А.В. Чередниченко
 Геогр. ғылымд. канд. Алексей В. Чередниченко
 Геогр. ғылымд. докторы В.С. Чередниченко

Жерге жақын озонның шоғырландыруларының жылғы және тәуліктік жүрісі қарастырылған. Оның шоғырланулары жылдың көп бөлігінде мүмкіндік шегінен асатыны көрсетілген. Қаланың тұрған орыны және тау-жазықтағы таралу тәуліктік жүріске айтарлықтай әсер етеді, автокөліктер шығындарын құрайтын азот тотығының жерге жақын озонға қиратушы әсерімен негізделген шоғырланудың екі максимумының пайда болуына ықпал етеді, сол аралықта тәулік соңында терең минимум қалыптасады.