

**Б.Д. Белан, Г.О. Заде, А.И. Кусков, Т.М. Рассказчикова**

## **СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ В ОСНОВНЫХ СИНОПТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

Проанализирована связь изменений спектральной прозрачности атмосферы в зависимости от синоптических условий. Выявлены закономерности ее распределения в циклонах и антициклонах и показано, что взаимосвязь оптических и синоптических условий имеет устойчивый климатический характер. Рассмотрены особенности проявления этой взаимосвязи для различных районов бывшего СССР, которые показывают необходимость учета местных факторов при разработке методов прогноза спектральной прозрачности.

В настоящее время в науке и технике все шире используются различные оптические системы, работающие в атмосфере и использующие воздух в качестве рабочей среды. Исключительная изменчивость физических свойств воздуха вызывает нежелательную трансформацию распространяющегося через атмосферу излучения. Поэтому для успешной работы этих систем необходимы сведения о пространственно-временном распределении оптических характеристик воздуха и об их изменении в будущем. В связи с этим в последнее время получили интенсивное развитие исследования по распространению оптического излучения в атмосфере [1, 2], результаты которых указывают на целесообразность развития методов прогноза оптической погоды.

Не останавливаясь подробно на характеристиках оптической погоды, которые рассмотрены в [2], укажем только, что одним из основных элементов является ослабление электромагнитного излучения, которое характеризуется спектральным коэффициентом пропускания или спектральной прозрачностью. Там же [2] делается вывод, что одним из возможных методов прогноза спектральной прозрачности может быть оптико-синоптический метод, опирающийся на зависимость изменения спектральной прозрачности от синоптических условий.

Следует отметить, что подобный вывод не является новым, он имеется уже в работе С.П. Хромова [3], однако для его реализации до сих пор нет конкретных результатов о взаимосвязи оптических и синоптических объектов. Поэтому целью данной статьи является установление взаимосвязи оптических и синоптических условий на примере спектральной прозрачности всей толщи атмосферы. Это стало возможным благодаря созданию в системе Госкомгидромета сети озонметрических станций, на которых одновременно измеряется и спектральная прозрачность атмосферы [4].

Одним из методов достижения поставленной цели является метод наложения синоптических и оптических объектов в один и тот же момент времени. Пример такого наложения для двух спектральных интервалов  $\lambda = 369$  и  $572$  нм представлен на рис. 1 и 2, где показаны приземные синоптические карты от 20 июня 1976 г., построенные в обычных синоптических символах. На эту же карту, с учетом масштаба и географического положения, спроектировано поле спектральной прозрачности в виде штриховых линий. Оптические объекты с повышенной и пониженной спектральной прозрачностью в центре обозначены соответственно  $P_v$  и  $P_n$ .

На рис. 1 приводятся поля спектральной прозрачности для  $\lambda = 572$  нм. Эта длина волны выбрана потому, что именно на ней, по нашим данным [5], отмечается наибольшее отклонение спектрального хода прозрачности атмосферы от средних многолетних условий и на этой же длине волны наблюдается и наибольшая изменчивость спектральной прозрачности атмосферы в течение года.

Как видно из рис. 1, на рассматриваемой территории можно выделить несколько оптических объектов с различным распределением спектральной прозрачности в них. Анализ их взаимной связи с синоптическими объектами приводит к выводу, что на длине волны  $\lambda = 572$  нм оптические объекты с низкими значениями спектральной прозрачности в центре соответствуют синоптическим объектам с повышенным давлением в центре (антициклонам). Таковыми являются:

объект, расположенный над акваторией Черного моря, Кавказом и югом Украины, а также оптический объект, находящийся над северными районами Казахстана и югом Западной Сибири.

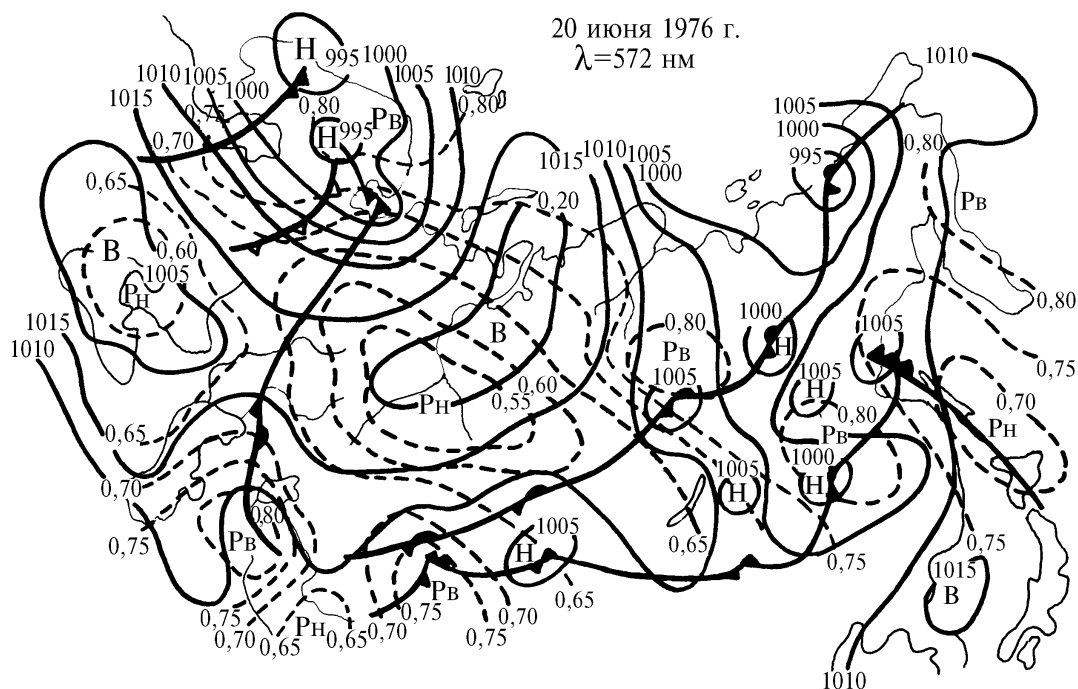


Рис. 1. Приземная карта погоды за 20 июня 1976 г. и спектральная прозрачность всей толщи атмосферы для  $\lambda = 572 \text{ нм}$

Еще один объект с пониженной прозрачностью в центре обнаруживается над Сахалином, где также отмечается повышенный фон давления, хотя антициклона, очерченного замкнутыми изобарами, нет. И наконец, объект с пониженной прозрачностью в центре наблюдается над горными массивами Средней Азии. Вблизи этого объекта не обнаруживаются синоптических образований. Наиболее вероятно, что появление этого оптического объекта обусловлено местными процессами, связанными с застоем воздуха в горных долинах, где может скапливаться большое количество аэрозоля.

Оптические объекты с повышенной прозрачностью атмосферы связаны с циклонами и атмосферными фронтами. На рис. 1 хорошо прослеживаются два фронтальных раздела, пересекающие почти всю территорию бывшего СССР с запада на восток. За фронтальными разделами располагаются, как правило, оптические объекты с повышенной прозрачностью в центре. Такими являются объекты, расположенные над севером Скандинавского полуострова, над Туркменией, юго-восточными районами Казахстана, Восточно-Сибирского плоскогорья, Забайкальем.

Такая взаимная связь синоптических и оптических объектов, по-видимому, обусловлена большой ролью атмосферного аэрозоля в ослаблении электромагнитного излучения в оптическом диапазоне и влиянием влагосодержания воздушных масс.

Как известно [3], антициклоны характеризуются ясной погодой с хорошо выраженным суточным ходом метеовеличин. В них, как правило, образуются две инверсии: приземная радиационного выхолаживания и приподнятая оседания. Поэтому в антициклоне из-за резкого уменьшения интенсивности турбулентного обмена происходит накопление аэрозоля под двумя задерживающими слоями.

В циклонах, наоборот, наблюдается облачная, дождливая погода. Вследствие этого происходит интенсивное вымывание аэрозоля, что способствует уменьшению ослабления электромагнитного излучения. Наиболее сильно вымывание аэрозоля происходит в зонах фронтальных разделов: перед теплым фронтом и особенно за холодным, так как после очищающей полосы дождя приходит более холодная воздушная масса с меньшим содержанием аэрозоля. Все это было показано еще в 1948 г. С.П. Хромовым на примере фактора мутности [3].

Как известно [1, 2], ослабление излучения в атмосфере создается рядом факторов: в первую очередь молекулярным и аэрозольным рассеянием и поглощением, причем вклад каждого из них изменяется при переходе на другую длину волны.

Для проверки отмеченных выше связей проведем аналогичный анализ, но для другого спектрального интервала. Как видно из рис. 2, и на этой длине волны сохраняется отмеченная выше тенденция связи синоптических и оптических объектов, хотя имеются и определенные отличия. Так, гребень высокого давления в районе Байкала на  $\lambda = 369$  нм привел к появлению здесь оптического объекта с пониженной прозрачностью в центре. Объект с пониженной прозрачностью появился и над восточными районами Казахстана, где наблюдается область низкого давления, что несколько противоречит сделанному выше выводу.

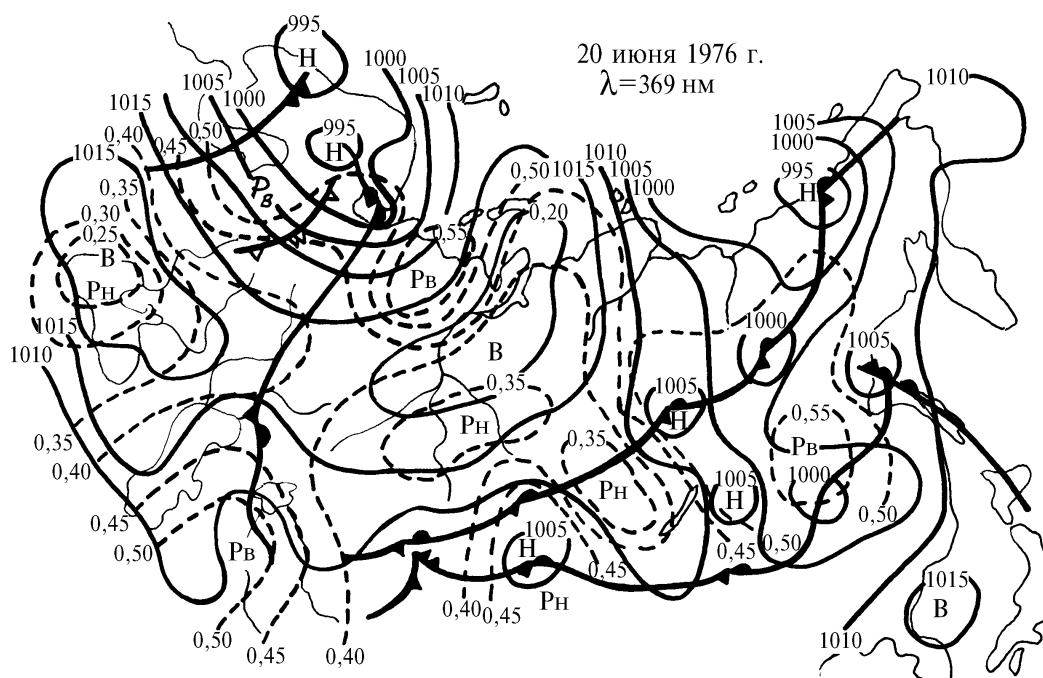


Рис. 2. Приземная карта погоды за 20 июня 1976 г. и спектральная прозрачность всей толщи атмосферы для  $\lambda = 369$  нм

По нашему мнению, такие изменения в связях синоптических и оптических объектов при переходе от одной длины волны к другой возможны вследствие нарушения монотонного распределения аэрозоля по размерам. В результате этого на разных длинах волн будут различны и соответствующие коэффициенты аэрозольного рассеяния.

Анализ нескольких десятков подобных карт показывает, что выявленная связь оптических и синоптических объектов отмечается во все сезоны года над всей рассматриваемой территорией, носит устойчивый характер и, следовательно, должна проявляться в климатическом аспекте.

Однако анализ распределения спектральной прозрачности внутри синоптического объекта, выполненный в [6], показывает, что зависимость спектральной прозрачности от синоптических условий более многогранна. Это подтверждает анализ рис. 1 и 2 и, в первую очередь, неполное пространственное совпадение синоптических и оптических объектов.

Поэтому целесообразно выявить зависимость изменения спектральной прозрачности атмосферы от того, в какой части синоптического объекта располагается пункт измерений. В связи с тем что сеть озонметрических станций довольно редка [4], нами была разработана методика такого анализа [7].

Суть ее заключается в том, что в различные моменты времени определяется часть синоптического объекта, в которой находится выбранная станция. Результаты измерения спектральной прозрачности на станции относятся к той части синоптического объекта, в которой они были получены.

Степень разделения синоптического положения на отдельные объекты и их части может быть различной. Наиболее крупная из типизаций основывается на учении об однородных воздушных массах. Еще в 1948 г. С.П. Хромов отмечал, что прозрачность атмосферы изменяется при переходе из одной воздушной массы в другую [3]. Подобный результат был получен также для общего содержания озона А.М. Шаламянским [8].

В [9, 10] делается попытка более детальной классификации синоптических ситуаций. В этих работах синоптическое положение подразделяется по характеру циркуляции на циклонический и антициклонический подтипы. Оказалось, что и эта типизация для целей установления связей между синоптическими и оптическими объектами не является достаточно полной, так как в [11–13] было показано, что прозрачность воздуха, а также концентрации оптически активных компонентов воздуха изменяются в зависимости от направления ветра внутри одной и той же воздушной массы. Такой же результат, но для спектральной прозрачности, был получен в [14].

Следовательно, необходимо было разработать еще более детальную классификацию синоптических ситуаций, основанную на разделении отдельных элементов барического поля.

В [6] была проделана такая попытка. Кроме деления ситуации по типам воздушных масс и по характеру циркуляции, синоптический объект разделялся еще на зоны в зависимости от направления ветра. Данные, полученные в [6, 14], показали, что основные синоптические объекты (циклоны и антициклоны), в свою очередь, являются оптически неоднородными. Это и послужило основой для разработки классификации, описываемой ниже.

Классификация синоптических ситуаций состоит из нескольких ступеней и уровней.

*Первый уровень.* Все ситуации делятся по генетическому признаку – по происхождению воздушной массы, определяющей оптическую погоду в данном физико-географическом районе. Для территории России и прилегающих к ней государств обычно выделяют 4 типа воздушных масс [3]: арктическую, умеренную, субтропическую и тропическую. Эти типы, в свою очередь, в зависимости от района формирования и дальнейшей трансформации подразделяются еще на два подтипа: морскую и континентальную.

Следовательно, на первом уровне классификации выделяются 4 типа или 8 подтипов, которые представляют наиболее общие различия в оптических характеристиках синоптических объектов.

*Второй уровень.* На этой стадии типизации синоптических ситуаций производится разделение по характеру циркуляции. К основным элементам деления относятся циклоны и антициклоны. Как показано в [7], сюда в качестве элементов необходимо отнести малоградиентные поля и контрастные зоны, возникающие в поле давления, и фронтальные разделы.

*Третий уровень.* Все объекты синоптического анализа имеют трехмерный характер, поэтому в их отдельных частях будут наблюдаться отклонения от общих характеристик. Так, например, фронтальные разделы характеризуются слоем инверсии или более устойчивой стратификации по сравнению с окружающим воздухом и являются задерживающими слоями для примесей воздуха. В зависимости от удаления по отношению к приземной линии фронта инверсия будет наблюдаться на разной высоте. В соответствии с этим будет изменяться распределение оптических величин в зоне фронта. С фронтами связаны также зоны осадков, которые приводят к вымыванию аэрозолей и очищению атмосферы, поэтому оптическая погода в зоне атмосферных фронтов должна отличаться большой изменчивостью. Чтобы учесть эту изменчивость, нужно такой элемент, как фронт, разделить как минимум на три зоны:

предфронтальную – пространство перед приземным фронтом, над которым, собственно, отмечено появление инверсии;

фронтальную, которая определяется приземной линией фронта и прилегающей к нему зоной осадков;

тыловую, в которой наблюдается уменьшение концентрации аэрозоля, вызванное вымыванием.

Исходя из приведенных выше положений, было проведено разделение циклонов и антициклонов на 9 частей: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ периферии и центральную часть.

В результате классификации синоптических ситуаций получается 133 элементарных подтипа: 16 малоградиентных полей и контрастных зон; 45 подтипов ситуаций для фронтальных разделов; по 36 подтипов для циклонов и антициклонов. На первый взгляд, это очень много. Однако опыт применения такой типизации для конкретных районов показывает, что число

подтипов всегда сокращается. Так, например, в районе Диксона не наблюдается вторжений тропического воздуха, и это сразу же сокращает число подтипов до 68. Кроме того, особенности циркуляции над конкретным районом могут сократить число подтипов. Следует подчеркнуть, что данная типизация разработана для процессов, которые обычно охватывают не всю тропосферу, а только нижние слои. В тех случаях, когда необходимо учитывать вклад вышележащих слоев, данную методику надо дополнять методикой фиксированных параметров, разработанной в [15] для высотных фронтальных зон.

Приведем анализ изменчивости спектральной прозрачности атмосферы в основных синоптических объектах, выполненный по данным озонметрической сети Гидромета за период 1972–1979 гг. для различных регионов СССР по описанной методике. Следует заметить, что учет местных признаков при такого рода анализе необходим, так как географическое положение рассматриваемого района играет очень важную роль в формировании оптической погоды. В первую очередь, она зависит от наличия источников и стоков аэрозоля в данном районе, водяного пара, антропогенного загрязнения атмосферы и т.п., от преимущественного перемещения основных синоптических объектов, их возможности стационарирования, зарождения и распада. Далее перейдем к анализу полученных данных.

Особенности метеорологического режима циклонов (наличие фронтальной облачности на больших площадях) существенно сокращают число измерений спектральной прозрачности атмосферы в циклонических условиях. Статистическая необеспеченность данных о режиме спектральной прозрачности в отдельных пунктах сократила количество районов, для которых производился анализ. Было рассмотрено распределение спектральной прозрачности в циклонах всего в 15 районах. Однако даже ограниченное количество данных позволяет сделать определенные выводы. Так, все типы распределения спектральной прозрачности атмосферы в каждом из 15 районов можно разделить на 3 вида, показанных на рис. 3.

Для 10 районов, к которым относятся Воронеж, Красноярск, Мурманск, Омск, Петропавловск-Камчатский, Печора, Свердловск, Сковородино, Якутск и бух. Нагаева (Магаданской обл.), в циклонах характерен горизонтальный градиент значений спектральной прозрачности, направленной от одной периферии к другой (на рис. 3 это Мурманск). Как правило, в этих районах пониженная прозрачность наблюдается в восточной, северо-восточной, северной или северо-западной перифериях циклонов, т.е. в холодной его части, что, по-видимому, обусловлено конденсационными процессами. Три района – Якутск, Магадан, бухта Нагаева – не подпадают под это правило. Здесь градиент спектральной прозрачности имеет обратное направление.

Над двумя районами, которые примыкают к береговой линии (Ленинград и Владивосток), изолинии спектральной прозрачности в циклонах почти симметричны изобарам (рис. 3), но отличаются направлением градиента. Для района Ленинграда характерно повышенное значение прозрачности в центре циклона, а для Владивостока – пониженное.

Для трех районов, расположенных на юге бывшего СССР: Феодосия, Чарджоу, с. Большая Елань, несмотря на то, что распределение прозрачности было получено с использованием нескольких сотен измерений для каждого пункта, не удалось получить существенных изменений прозрачности атмосферы внутри циклонов. Очевидно, что такая картина создается невыраженностью для большей части года фронтальных процессов и, соответственно, малым эффектом очищения воздуха от аэрозоля при осадках. В результате этого циклоны над данными районами оказываются более оптически однородными, чем над остальными.

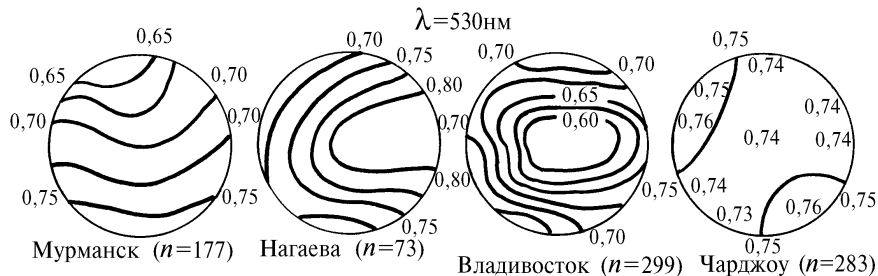
Отмеченные особенности проявляются во всем рассматриваемом спектральном интервале, о чем можно судить по данным для района Петропавловска-Камчатского.

Ясная погода в антициклонах благоприятствовала тому, что статистический материал для этого типа синоптических объектов значительно обширнее. Поэтому были проанализированы уже 29 районов.

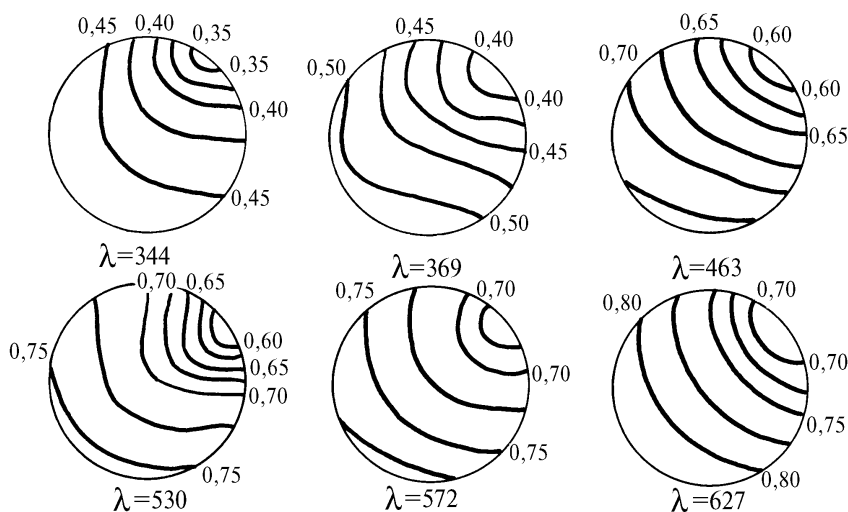
Для случаев образования антициклонов, так же как и для циклонических условий, в распределении спектральной прозрачности можно выделить районы, в которых:

- 1) прозрачность имеет четкий горизонтальный градиент от одной периферии к другой (8 пунктов);
- 2) изолинии прозрачности параллельны изобарам (2 пункта);
- 3) спектральная прозрачность несущественно изменяется внутри антициклона (8 пунктов);
- 4) прозрачность имеет многозональное распределение (11 пунктов).

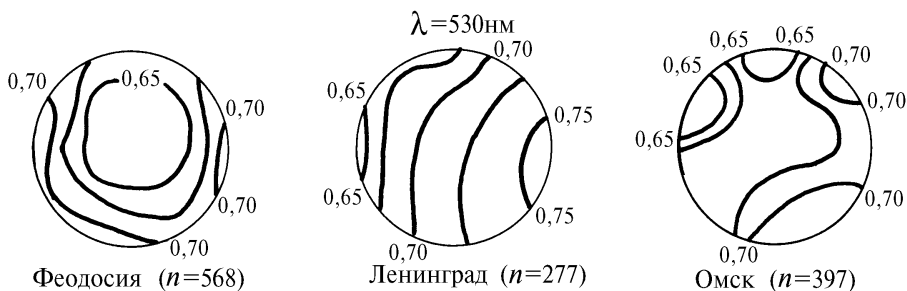
Причем зоны повышенной и пониженной прозрачности находятся, как правило, на периферии антициклона (Омск на рис. 3). Малоградиентное распределение прозрачности в антициклонах и циклонах наблюдается в основном над южными районами, где вследствие прогрева воздуха нивелируются различия между физическими свойствами воздуха в разных частях антициклона.



*Распределение прозрачности в циклонах*



*Распределение прозрачности в циклонах в районе Петропавловска-Камчатского*



*Распределение прозрачности в антициклонах*

Рис. 3. Распределение спектральной прозрачности в циклонах и антициклонах

Наличие градиента прозрачности в антициклонах обнаруживается там, где они не стационарируют, а быстро смещаются над рассматриваемым районом. При этом воздух, входящий в систему антициклонов, не успевает трансформироваться, что и сказывается на изменении прозрачности. Многозональное распределение прозрачности, наоборот, характерно для тех районов, в которых антициклоны часто стационарируют, особенно в зимнее время. При этом происходит интенсивная трансформация воздуха, и, как следствие, все более или менее существенные изменения спектральной прозрачности отмечаются лишь на периферии антицикло-

нов. Районы с параллельным распределением изолиний прозрачности и изобар в антициклонах так же, как и в циклонах, расположены на берегах морей. По-видимому, это характерная особенность распределения спектральной прозрачности атмосферы в синоптических объектах для океанических районов. Хотя этот вывод нуждается в дополнительной проверке.

Исследовано распределение спектральной прозрачности в малоградиентном поле, контрастной зоне и при прохождении фронтов. Данные о спектральной прозрачности при прохождении холодного и теплого арктических фронтов представлены в таблице.

**Изменение спектральной прозрачности атмосферы при прохождении атмосферных фронтов**

Тип фронта	Местоположение станции по отношению к фронту	Длина волны (нм)	
		344	572
Арктический холодный фронт	впереди фронта	0,31	0,58
	в зоне фронта	0,41	0,70
	за фронтом	0,47	0,77
Арктический теплый фронт	впереди фронта	0,45	0,72
	в зоне фронта	0,48	0,75
	за фронтом	0,36	0,68

Прохождение фронта через пункт наблюдений сопровождается резким изменением спектральной прозрачности, причем независимо от длины волны. Однако характер изменения прозрачности зависит от направления перемещения фронта, в общем случае от того, происходит ли замена холодной воздушной массы более теплой или нет (в холодной воздушной массе, как правило, спектральная прозрачность выше). Можно отметить одну характерную особенность при прохождении теплого фронта. В зоне приземного фронта происходит небольшое увеличение прозрачности по сравнению с предфронтальными районами, что обусловлено вымывающей ролью осадков. Затем, по мере углубления в теплую воздушную массу, происходит резкое уменьшение спектральной прозрачности.

Так, малоградиентное поле в распределении спектральной прозрачности соответствует своему названию, т.е. градиенты прозрачности в нем невелики.

Что касается режима спектральной прозрачности в контрастной зоне барического поля, то важно знать, какое распределение ее было в синоптических объектах, взаимодействие которых привело к образованию этой зоны, а именно направление горизонтальных градиентов спектральной прозрачности в циклоне и антициклоне. Если градиенты имеют одинаковый знак, то в контрастной зоне наблюдается градиент спектральной прозрачности того же направления, но с большей абсолютной величиной. Если же в циклоне и антициклоне градиенты имеют противоположный знак, то распределение спектральной прозрачности в контрастной зоне имеет малоградиентный характер.

Подводя итог выполненному исследованию, можно отметить, что поле спектральной прозрачности всей толщи атмосферы над территорией России и прилегающих к ней государств оказывается существенно зависимым от образования и режима перемещения синоптических объектов, что может послужить основой для разработки методик прогноза крупномасштабных изменений спектральной прозрачности. Наличие градиентов прозрачности внутри самих синоптических объектов делает возможным в дальнейшем разработку методик прогноза ее мезомасштабных изменений, но с обязательным учетом местных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код темы 93-05-14103).

1. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
2. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О. Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1991. 192 с.
3. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 700 с.
4. Гущин Г.П. Озонометрическая сеть СССР // Метеорология и гидрология. 1979. N 3. С. 111–116.
5. Белан Б.Д., Задде Г.О. Спектральная прозрачность и аэрозольное ослабление над территорией СССР. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. 180 с.
6. Белан Б.Д., Задде Г.О. / Тезисы докладов VI Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск. 1981. Часть I. С. 144–147.
7. Белан Б.Д., Задде Г.О., Рассказчикова Т.М. // Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР. 1982. С. 21–25.

8. Шаламянский А. М. // Труды ГГО. 1980. Вып. 419. С. 126–139.
9. Цветкова В. Н., Никитинская Н. И. // Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Л.: Гидрометеоздат, 1979. С. 244–247.
10. Цветкова В. Н., Никитинская Н. И. // Труды ГГО. 1979. Вып. 406. С. 115–124.
11. Моисеев С. Г. // Аэрозольная оптика. Рязань. 1978. Вып. 1. С. 17–21.
12. Peterson J. T., Kirby J. H., Bodhaine B. A. et al. // J. Geophys. Res. 1980. V. 7. N 5. P. 349–352.
13. Абакумова Г. М., Евневич Т. В. // Метеорология и гидрология. 1979. N 3. С. 62–65.
14. Белан Б. Д., Пхалагов Ю. А., Рассказчикова Т. М. и др. // Тезисы докладов II Совещания по атмосферной оптике. Томск. 1980. Часть 1. С. 171–175.
15. Белан Б. Д. // Влияние струйных течений на распределение оптически активных компонентов воздуха в их зоне. Препринт / ИОА СО АН СССР, N 33. 1981. 56 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томский государственный университет г. Томск

Поступила в редакцию  
24 декабря 1994 г.

**B. D. Belan, G. O. Zadde, A. I. Kuskov, T. M. Rasskazchikova. Spectral Transmission of the Atmosphere of Basic Synoptic Objects.**

This paper presents an analysis of relations existing between the variations of spectral transmission of the atmosphere and synoptic conditions. This analysis enabled us to reveal certain regularities of its distribution in cyclones and anticyclones. As a result we show that interrelation between the optical and synoptic conditions has a stable climatic character. The analysis carried out allowed us also to reveal specific features of this interrelation in different regions of the FSU that demonstrate the necessity of taking into account local factors when constructing techniques for forecasting the atmospheric spectral transmission.