

В.И. Демин¹, М.И. Белоглазов¹, Е.Г. Мокров²

Феновые эффекты над Хибинами в изменениях концентрации приземного озона

¹ Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Мурманская обл., г. Апатиты

² Центр лавинной безопасности ОАО «Апатит», Мурманская обл., г. Кировск

Поступила в редакцию 11.03.2005 г.

Приведены результаты измерений приземной концентрации озона (ПКО) на г. Ловчорр (1089 м, Хибин) в периоды фенів из свободной атмосферы. Показано, что появление фена в пункте наблюдений сопровождается синхронными вариациями ПКО, относительной влажности и, в меньшей степени, температуры воздуха. Повышение ПКО в феновых ситуациях может составлять 10–20 млрд⁻¹ и является следствием поступления в приземный слой обогащенного озоном воздуха из вышележащих слоев при нисходящих движениях в антициклоне.

Введение

С марта 2004 г. Полярный геофизический институт (ПГИ) Кольского научного центра РАН приступил к мониторингу приземной концентрации озона (ПКО) на г. Ловчорр ($\varphi = 67^{\circ}36'$, $\lambda = 33^{\circ}51'$, 1089 м) — одной из вершин Хибинского горного массива. Измерения проводятся с помощью УФ-озонметра «ML9810B» (пр-во Великобритании) на базе горнолавиной станции «Центральная» ОАО «Апатит», осуществляющей и полный комплекс метеорологических наблюдений.

Одной из задач данного мониторинга является изучение влияния на вариации ПКО мезомасштабных процессов горной циркуляции, к числу которых принадлежат и феновые явления.

По своему определению фен является кататическим (нисходящим) ветром в горном районе, сопровождаемым повышением температуры и снижением относительной влажности. Классический механизм, используемый для объяснения фенового эффекта, предполагает вынужденный подъем влажного воздуха по горному хребту на наветренной стороне с образованием облачности и осадков и опускание на подветренном склоне с сухоадиабатическим градиентом, благодаря чему воздух нагревается, а облачность рассеивается. Однако в реальности картина оказывается более сложной, и в зависимости от механизма, которым осуществляется нисходящее движение, выделяют несколько типов фена (см., например, [1–3]).

Как следует из результатов вертикального озонзондирования (см., например, http://www.fmi.fi/research_atmosphere/atmosphere_4.html), концентрация озона с высотой возрастает. Следовательно, нисходящие движения в атмосфере, приводящие к фену, должны проявиться не только в метеорологических характеристиках, но и в динамике ПКО на горных и предгорных станциях. В этом смысле хо-

рошо известные в метеорологии феновые эффекты могут служить индикатором катафронтального механизма изменений ПКО.

Диагностика феновых явлений

Известно, что феновые эффекты даже от высоких гор практически не проявляются в долинах уже на расстояниях свыше 20–30 км. Хибини имеют абсолютные отметки 1000–1100 м (при максимальной высоте 1200 м) и возвышаются над окружающими равнинами всего на 800–900 м. Поперечные размеры Хибинского массива также невелики — приблизительно 30×50 км. В этих условиях не приходится ожидать проявления феновых эффектов от переваливания воздушных масс на станциях мониторинга приземного озона ПГИ в г. Апатиты, удаленном примерно на 10 км к юго-западу от Хибин (т.е. преимущественно с наветренной стороны), и в геофизической обсерватории «Ловозеро», расположенной также примерно в 10 км, но к северо-востоку от Ловозерского горного массива, который имеет аналогичные Хибинам высотные и горизонтальные характеристики. И действительно, за весь период наблюдений (1999–2005 гг.) ни в г. Апатиты, ни в Ловозеро появления фена не было обнаружено. В то же время феновые эффекты четко проявляются в записях термо- и гигрограмм на горнолавиной станции «Восточная» (расположенной на удалении менее 3 км от юго-восточного склона Хибин) — это отражается в импульсных повышениях температуры воздуха до 6–10 °С и синхронном снижении относительной влажности на 20–40%.

Для станции на г. Ловчорр феновые эффекты от переваливания воздуха невозможны, поскольку она находится всего в 10 м от вершины, но становится возможным так называемый фен из свободной атмосферы, связанный с инверсией оседания в антициклоне. Эти фены очень редко достигают земной

поверхности, однако склоны и вершины, находящиеся на высоте 1000–3000 м, могут пересекаться инверсиями довольно часто, что приводит к соответствующим изменениям температуры воздуха и относительной влажности. Данный тип фена характерен для всех горных систем, включая и Хибины [3], но часто ускользает из поля внимания из-за отсутствия наблюдений на вершинных станциях.

Известно, что приход фена проявляется в росте температуры и падении относительной влажности. Механизм этого явления следующий: опускающийся воздух нагревается и переносит с собой ту удельную влажность, которой он обладал в месте, откуда началось опускание. Однако метеорологические характеристики фенopodobных ситуаций в горных районах существенно отличаются от метеорологических характеристик фенoв долин. Фены из свободной атмосферы наблюдаются часто при почти полном отсутствии ветра и характеризуются своеобразным режимом температуры и влажности. Так, например, температурный эффект фена (т.е. рост температуры на станции) может проявиться только в том случае, если опустившийся и нагретый при этом воздух окажется теплее вытесненного им, т.е. зависит как от вертикального распределения температуры, так и от температуры вытесняемого воздуха. При определенных ситуациях фен может наблюдаться либо без повышения температуры, либо рост температуры мал [2].

Ослабление, а иногда и отсутствие температурных эффектов является характерной чертой фенoв из свободной атмосферы. Это заставляет изменять и критерии при их диагностике: в отличие от фенoв предгорных районов здесь не учитываются ни скорость, ни направление ветра, ни даже эффект повышения температуры — главным признаком фенoподобной ситуации становится понижение относительной влажности [2]. При этом исходят из того, что знак изменения относительной влажности при устойчивой стратификации всегда совпадает со знаком вертикальной скорости, т.е. падение относительной влажности может наблюдаться только при нисходящих движениях воздуха [2].

В литературе предлагаются различные критерии фена из свободной атмосферы по динамике относительной влажности. Бернхард [2], например, определяет фены по относительной влажности не более 40%. Однако при учете суточного хода, когда исключаются случаи низкой влажности воздуха, обусловленные дневным повышением температуры на горной станции, в качестве признака фена из свободной атмосферы может быть и снижение относительной влажности до 60% и менее [2]. Так, фенoвые критерии Флона, найденные им при изучении антициклональных фенoв в Альпах, — значения относительной влажности в дневные часы 40% и менее, а для всех остальных сроков — не более 60–65% [4]. Аналогичные критерии использовались в качестве важнейшего признака и для выявления фенoподобных ситуаций на Кавказе [5].

В данной работе для диагноза фенoвого процесса использовались: положение над регионом антициклона с нисходящими движениями (знак опре-

делялся по методикам, изложенным в [6, 7]), появление характерной инверсии оседания по данным аэрологического зондирования в ближайших пунктах (г. Кандалакша и г. Мурманск) с нижней границей инверсионного слоя ниже уровня станции на г. Ловчорр, а также нехарактерные для региона снижения относительной влажности до 40–60%. Дополнительными признаками служили отсутствие заметного ветра и нижней облачности, возрастание горизонтальной дальности видимости и, при наличии, синхронные изменения температуры воздуха.

Результаты наблюдений и обсуждение

Фен из свободной атмосферы на ст. Ловчорр обнаруживается в записях термо- и гигрограмм 3–4 сентября 2004 г. В этот период над Кольским п-вом и акваторией Белого моря располагался достаточно мощный антициклон. Присутствие нисходящих движений в нижней тропосфере (в слое до 850 гПа) было установлено по динамике приземного давления в соответствии с рекомендациями, приведенными в [6, 7]. Наглядными доказательствами служили, в частности, быстрая деформация вертикального профиля температуры и влажности и появление характерной инверсии оседания в слое 900–1160 м, обнаруживаемой по данным вертикального аэрологического зондирования в 00 UT 4 сентября в г. Кандалакша, расположенном в 70 км к юго-западу от г. Ловчорр. Пересечение нижней границей этой инверсии уровня станции (1089 м), очевидно, создавало необходимые условия для появления фена из свободной атмосферы.

И действительно, как показывают параллельные записи гигрографа и термографа (рис. 1), в 22 ч 20 мин (здесь и далее время московское зимнее) на фоне практически ясного неба (2 балла перистой облачности) и слабого ветра (менее 2 м/с) начались быстрое снижение относительной влажности с 90 до 26% и одновременное повышение температуры воздуха на 1,5 °С (рис. 1).

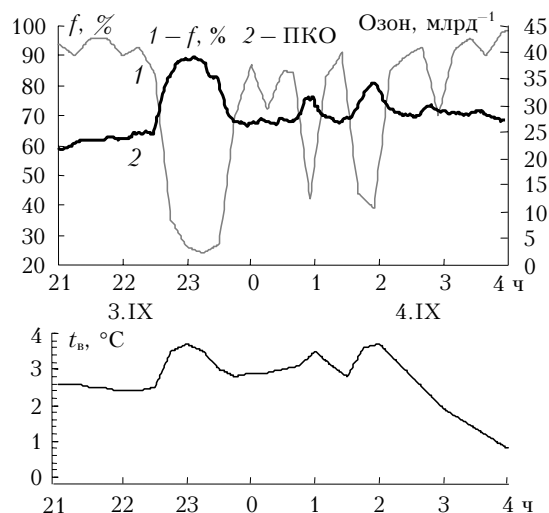


Рис. 1. Ход относительной влажности (f , %), концентрации озона (млрд⁻¹) и температуры воздуха ($t_{в}$) на г. Ловчорр 3–4 сентября 2004 г.

Таблица 1

Значения основных метеорологических параметров в Ловозере 3–4 сентября 2004 г.

Срок	3.IX		4.IX		
	18 ч	21 ч	00 ч	03 ч	06 ч
Направление ветра, румб	вюв	вюв	ююв		ссз
Скорость ветра/порыв, м/с	1–2	2–3	2–3	тихо	1–2
Погода в срок	ясно	ясно	ясно	ясно	дымка
Облачность, балл:					
общая/нижняя	4/0	5/0	0/0	3/3	4/0
высота нижней границы	–	–	–	600 м	–
Тип облачности	Ci. fib	Ci. fib		Sc. diur, vesp	Ci. fib
Температура воздуха, °С	11,6	5,9	5,8	–0,1	–0,3
Относительная влажность, %	57	86	96	96	100
Атмосферное давление, гПа	1032	1032	1032	1033	1033

Сохранение синоптической ситуации по картам приземного анализа (<http://www.met.fu-berlin.de>) и отсутствие резких изменений в обычном суточном ходе метеорологических величин в соответствующие сроки на ближайших гмс. «Апатиты», «Мончегорск», «Ловозеро» (табл. 1) исключают адвективный механизм произошедших вариаций на г. Ловчорр и позволяют считать их следствием фенового процесса над Хибинами, вызванного опусканием воздуха в антициклоне.

Так как концентрация озона в тропосфере растет с высотой, появление нисходящих движений привело не только к фену на г. Ловчорр, но и к значительному росту концентрации озона: с 20–22 до 33–34 млрд⁻¹. При этом изменения концентрации озона и относительной влажности происходили синхронно, но в противофазе. Относительные изменения температуры были незначительны, что соответствует упомянутым выше свойствам фенотических свободной атмосферы.

Вторая и третья, менее слабые, вспышки фена наблюдались около 1 и 2 ч ночи 4 сентября. Они также сопровождались характерными одновременными вариациями температуры, относительной влажности и концентрации озона и свидетельствовали о нестационарности вертикальной скорости в зоне фена [2, 8]. Эта нестационарность может создаваться, в частности, сменой знака вертикальных движений в пограничном слое при волновых процессах, вызванных термическим расслоением атмосферы [2].

Нестационарность имела место и в период фена 7–8 февраля 2005 г., когда над территорией Восточной Европы располагался мощный антициклон с гребнем на Скандинавию и Кольский п-в. Изменения относительной влажности, температуры воздуха и концентрации озона на г. Ловчорр в соответствующий период представлены на рис. 2.

Появление нисходящих движений привело к снижению относительной влажности с 80 до 40% в период с 21 до 5 ч, одновременному росту температуры воздуха на 3 °С и повышению концентрации озона с 35 до 40 млрд⁻¹. Вторая вспышка фена наблюдалась после 7 ч и вновь сопровождалась синхронными снижением относительной влажности до 35%, ростом температуры воздуха на 1 °С и повышением ПКО с 32 до 42 млрд⁻¹.

Все изменения происходили на фоне практически ясного неба (не более 3 баллов облаков верхне-

го яруса). Поскольку, как уже было сказано выше, данный тип фена не достигает земной поверхности, то, как и в предыдущем случае, ни в Апатитах, ни в Ловозере никаких аномальных вариаций метеопараметров и ПКО в данный период не наблюдалось.

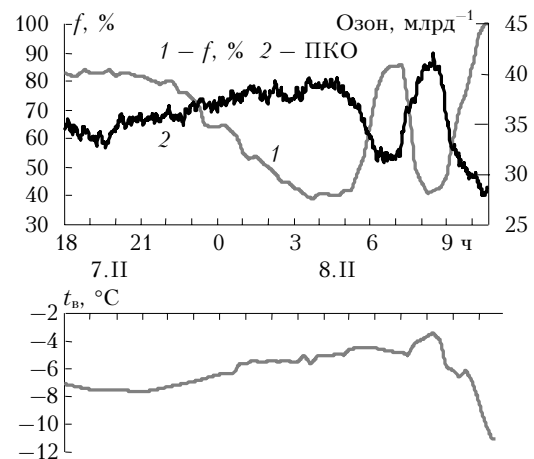


Рис. 2. Ход относительной влажности (f , %), концентрации озона (млрд⁻¹) и температуры воздуха ($t_{в}$, °С) на г. Ловчорр 7–8 февраля 2005 г.

Также феновый характер имели вариации метеовеличин и ПКО на г. Ловчорр 3–4 октября 2004 г. Метеорологические наблюдения в соответствующие сроки на горнолавиной станции «Центральная» представлены в табл. 2. В этот период над Кольским п-вом располагалась область повышенного давления. Нисходящие движения вызвали формирование инверсии оседания в слое 812–1345 м (по данным аэрологического зондирования в 12 UT 3 октября в г. Кандалакша), что свидетельствует о наличии необходимых условий для возникновения на вершине г. Ловчорр фена из свободной атмосферы. До 20 ч 2 октября на станции регистрировался сильный туман. В последующие 4 ч при слабом ветре (1–2 м/с) произошло практически полное размывание облачности, включая и верхний ярус.

Появление фена на станции отмечено сильным падением влажности, которая, по данным срочных наблюдений, держалась на уровне 40–50% вплоть до 5 ч 4 октября, а согласно записям гигрографа опускалась в отдельные моменты и до 30%. При этом средние многолетние значения относительной влажности

Таблица 2

Значения основных метеорологических параметров и ПКО на г. Ловчорр в период фена 3–4 октября 2004 г. (*dd* и *V* – направление и скорость ветра, $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, *f* – относительная влажность, $N_{\text{общ}}/N_{\text{нижн}}$ – количество общей и нижней облачности в баллах)

Дата	Срок, ч	<i>dd</i> , румб	<i>V</i> , м/с	$t_{\text{в}}$, °С	<i>f</i> , %	$N_{\text{общ}}/N_{\text{нижн}}$, балл	ПКО, млрд ⁻¹
02.10.2004	15	юз	2	-0,9	100	10/10	27,2
02.10.2004	18	юз	2	-1,8	100	10/10	24,2
02.10.2004	21	юз	2	-1,3	100	9/9	24,9
03.10.2004	00	юз	2	-0,6	95	4/0	25,9
03.10.2004	03	з	2	-0,5	89	3/0	24,5
03.10.2004	06	зсз	2	0,7	74	2/0	34,8
03.10.2004	09	сз	3	3,2	50	1/0	42
03.10.2004	12	сз	2	6,0	51	0/0	42,9
03.10.2004	15	сз	4	7,5	49	0/0	40,9
03.10.2004	18	зз	6	6,2	47	0/0	42,5
03.10.2004	21	з	8	5,1	45	0/0	44,4
04.10.2004	00	зсз	4	5,0	43	0/0	41,5
04.10.2004	03	тихо	0	2,6	50	7/0	37,5
04.10.2004	06	зсз	4	2,5	50	4/0	36,8
04.10.2004	09	зсз	9	1,7	69	3/0	31
04.10.2004	12	зсз	7	1,2	81	2/0	32,4
04.10.2004	15	сз	5	1,3	87	4/1	29,6

Таблица 3

Значения основных метеорологических параметров и ПКО на г. Ловчорр в период фена 23–24 апреля 2004 г. (условные обозначения те же, что и для табл. 2)

Дата	Срок, ч	<i>dd</i> , румб	<i>V</i> , м/с	$t_{\text{в}}$, °С	<i>f</i> , %	$N_{\text{общ}}/N_{\text{нижн}}$, балл	ПКО, млрд ⁻¹
23.04.2004	09	тихо	0	-11,9	100	3/1	25,6
23.04.2004	12	ю	3	-12,4	100	2/1	27,5
23.04.2004	15	ююв	4	-12,2	90	2/0	31,6
23.04.2004	18	ю	4	-11,8	70	0/0	42,8
23.04.2004	21	ю	3	-12,4	54	0/0	46,3
24.04.2004	00	ю	2	-11,5	55	0/0	45,8
24.04.2004	03	ю	2	-10,4	56	0/0	45
24.04.2004	06	тихо	0	-9,2	51	0/0	47
24.04.2004	09	тихо	0	-6,7	51	0/0	43,4
24.04.2004	12	тихо	0	-6,8	48	0/0	46,3
24.04.2004	15	тихо	0	-8,1	52	7/0	41,5
24.04.2004	18	с	4	-9,2	54	9/0	40,7
24.04.2004	21	тихо	0	-10,4	71	5/0	35,3

на г. Ловчорр в данный период года составляют более 90% при полном отсутствии суточного хода. Феновый процесс сопровождался также одновременным повышением температуры воздуха на 2 °С к 06 ч. Дальнейшее повышение могло быть частично вызвано и дневным прогреванием воздуха в условиях совершенно ясного неба, что исказило температурный эффект самого фена.

Появление нисходящих движений в атмосфере привело к одновременному повышению ПКО с 25 до 45 млрд⁻¹ (см. табл. 2). Обратные процессы (подъем относительной влажности и снижение ПКО) начались также практически одновременно – примерно в 1 ч ночи 4 октября. К этому времени изменилась и синоптическая обстановка: антициклон сместился на юг, усилилось влияние атлантического циклона, а нисходящие движения сменились восходящими.

Еще одним примером могут служить события 23–24 апреля 2004 г., когда опять же на периферии антициклона в условиях штиля и безоблачного неба во второй половине дня 23 апреля (после 17 ч 30 мин) и ночью начались снижение относительной влажности со 100 до 47% и соответствующее повышение концентрации озона с 26 до 46 млрд⁻¹ (табл. 3).

Температурный эффект фена к 6 ч утра 24 апреля составил 3 °С. В последующие часы рост температуры продолжался, что, однако, могло быть вызвано и обычным суточным ходом.

Выводы

1. Проведен анализ результатов измерений приземной концентрации озона (ПКО) на г. Ловчорр (высота 1089 м над у.м., Хибинский горный массив) в периоды фенов из свободной атмосферы.

2. Показано, что появление фена в пункте наблюдений сопровождается синхронными вариациями ПКО, относительной влажности и, в меньшей степени, температуры воздуха. Повышения ПКО в феновых ситуациях составляют 10–20 млрд⁻¹ и вызваны поступлением обогащенного озоном воздуха из вышележащих слоев атмосферы.

3. Одновременное появление феновых эффектов в записях метеорологических величин может быть использовано для выявления изменений ПКО, вызванных нисходящими движениями воздуха в горных районах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-05-64114, 04-05-79085 и 05-05-64271), INTAS

(грант № 01-0016), а также Программы фундаментальных исследований ОФН/ОНЗ РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований».

1. *Барри Р.Г.* Погода и климат в горах. Л.: Гидрометеопиздат, 1985. 312 с.
2. *Бурман Э.А.* Местные ветры. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969. 342 с.
3. *Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С.* Курс климатологии. Ч. 1 и 2. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1952. 488 с.

4. *Flohn H.* Witterung und Klima in Mitteleuropa, 2. Auflage. Forschungen zur Deutschen Landeskunde. 78. S. Stuttgart: Hirzel Verlag, 1954. S. 214.
5. *Полтораус Б.В.* Фены Западного Кавказа // Метеорол. и гидрол. 1972. № 7. С. 57–65.
6. *Приходько М.Г.* Справочник инженера-синоптика. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. 328 с.
7. *Русин И.Н., Тараканов Г.Г.* Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1996. 308 с.
8. *Шелковников М.С.* Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеопиздат, 1985. 208 с.

V.I. Demin, M.I. Beloglazov, E.G. Mokrov. Foehn effects above Khibiny in changes of surface ozone concentration.

The results of measurements of surface ozone concentration (SOC) on mountain Lovchorr (height of 1089 meters a.s.l., the Khibiny mountainous massif) in the free foehn periods are given. It is shown that the foehn occurrence at the observation site is accompanied by synchronous variations of SOC, relative humidity and, to a lesser degree, temperature of air. The SOC increase in foehn situations can amount to 10–20 ppb and is caused by the intrusion of the air enriched by ozone from the upper atmosphere layers into the surface layer at downcurrent movements in the anticyclone.