

## Динамика лидарных отражений в мезосфере Камчатки в период зимнего аномального поглощения радиоволн в ионосфере

В.В. Бычков<sup>1</sup>, В.Н. Маричев<sup>2</sup>, А.С. Пережогин<sup>1</sup>,  
Б.М. Шевцов<sup>1</sup>, А.В. Шумейко<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт космofизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР),  
с. Паратунка Камчатской области*

<sup>2</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.09.2008 г.

Приводится описание рэлеевского лидара, запущенного на Камчатке в 2007 г. Анализируется связь результатов лидарных и проводившихся одновременно ионосферных наблюдений. Приводятся данные, подтверждающие результаты наблюдений, полученных в ИОА г. Томска в период с 1988 по 2000 г., о формировании аэрозольных слоев в области стратосферы в зимнее время. Исследуется связь образования аэрозольных слоев, наблюдавшихся над стратосферой на Камчатке, с аномальным поглощением радиоволн в ионосфере, наблюдавшимся в это же время. Обнаружен регулярный рост отношения рассеяния, начиная с высот порядка 60 км. Исследуются динамика лидарных сигналов в этой области и ее связь с состоянием нижней ионосферы.

*Ключевые слова:* стратосферное потепление, мезосфера, лидар, аэрозоли, ионосфера, аномальное поглощение радиоволн.

### Введение

Считается общепринятым, что стратосфера очень суха и условия для конденсации воды в ней не возникают. Тем не менее повышенное отношение коэффициентов рассеяния в области высот 40–45 км в зимнее время наблюдалось над Томском в период с 1988 по 2000 г. [1]. Проведенные в работе [1] оценки показывают, что до достижения точки росы содержания воды в области стратосферы не хватает зимой пять порядков, летом шесть. Кроме того, выявлено, что аэрозольные слои на высотах 40–45 км, как правило, наблюдались в периоды повышенного поглощения радиоволн в ионосфере. Показано также, что наблюдаемые экспериментально характерные изменения температурного профиля в мезосфере и содержания положительных ионов в области стратосферы, сопровождающие явления аномального зимнего поглощения радиоволн, могут приводить к созданию условий для конденсации воды и образования водных аэрозолей в области высот 45–65 км.

Наиболее благоприятные условия для конденсации образуются на высоте около 60 км. Стратосфера при этом опускается до высот 40 км, возникает явление стратосферного потепления. Проведен-

ные на Камчатке в январе–марте 2008 г. лидарные и синхронные ионосферные наблюдения позволили обнаружить в период с 18 по 23 января появление аэрозольных слоев в области от 50 до 65 км. Аномально высокое поглощение радиоволн в это же время было зарегистрировано по данным ионосферной станции ИКИР.

### Средства наблюдений

Введенная в эксплуатацию на Камчатке рэлеевская лидарная станция, состоящая из твердотельного лазера Brilliant В и телескопа, собранного по схеме Ньютона, имеет следующие характеристики: длина волны излучения второй гармоники Ni:YAG – 532 нм, диаметр пучка после выхода из коллиматора – 6 см, энергия в импульсе – 0,4 Дж, длительность импульса – 5 нс, частота посылки лазерных импульсов – 10 Гц, диаметр приемного зеркала 60 см, фокусное расстояние – 210 см, расходимость луча после выхода из коллиматора –  $10^{-5}$  рад, угол зрения приемника –  $5 \cdot 10^{-4}$  рад. Возможные расстояния между осями излучателя и приемника – 0, 130 и 510 см. Вертикальное разрешение – 1,5 км обусловлено временным разрешением в 10 мкс счетчика фотонов Hamamatsu-N8784. В фотоприемном блоке использовались ФЭУ Н8259-01 и светофильтр на длине волны 532 нм со следующими параметрами: пропускание в максимуме более 60%, ширина на полувысоте 3 нм и подавление в области блокировки 180–850 нм менее 0,1%.

\* Василий Валентинович Бычков (vasily@ikir.kamchatka.ru); Валерий Николаевич Маричев; Андрей Сергеевич Пережогин; Борис Михайлович Шевцов; Алексей Васильевич Шумейко.

Все приведенные в настоящей статье результаты получены на базе лидара 510 см. Для исключения засветок от сигналов ближней зоны применялось электронное запирающее ФЭУ до высоты 21 км. Для наблюдений за состоянием ионосферы использовалась типовая автоматическая ионосферная станция (АИС) с цифровым приемным блоком. Компьютеры, управляющие работой АИС и лидарной станцией, синхронизованы во времени по GPS.

Программа управления лидаром, а также программы обработки сигналов разработаны в ИКИР [2]. При разработке программ использовалась методика вычисления отношения суммарного коэффициента рассеяния к аэрозольному  $R$ , описанная в работе [3]. Коэффициент молекулярного рассеяния вычислялся в соответствии с работой [4], температура и давление атмосферы могут вычисляться по моделям CIRA [5] или MSIS-2000 [6]. Предусмотрен также режим расчета высотных профилей рассеяния по экспериментальным массивам данных температуры и давления. Диапазон высот принимаемых сигналов составлял в 2007 г. 20–150 км с шагом 1,5 км. С 18 февраля 2008 г. высота регистрируемых сигналов поднята до 300 км, а с 28 марта до 600 км.

## Экспериментальные данные

Величина поглощения радиоволн в ионосфере оценивалась по значению регулярно измеряемого стандартного ионосферного параметра  $f_{\min}$  — минимальной частоты, на которой на ионограммах появляется след слоя  $E$  или  $F$ . Поглощение радиоволн в атмосфере определяется главным образом произведением плотности электронов на плотность нейтральной компоненты. В атмосфере Земли условия для поглощения радиоволн частоты 1–2 МГц реализуются в интервале высот 80–100 км, и, таким образом, этот параметр используется в исследованиях ионосферы для оценки важнейшей характеристики плазмы — плотности электронов в области  $D$ . В декабре и марте выраженных явлений аномального поглощения не наблюдалось. На рис. 1, *a* приведен среднесуточный ход параметра  $f_{\min}$  за январь

и февраль 2008 г. по данным ионосферной станции ИКИР. Тонкой линией нанесено среднесуточное значение по невозмущенным дням.

По рис. 1, *a* видно, что в период с 18 января по 5 февраля наблюдалась серия из трех явно выраженных, следовавших одно за другим явлений аномального поглощения, с максимумами 22, 28 января и 3 февраля. Интенсивность и длительность каждого последующего явления уменьшались. Пригодными для лидарных наблюдений по погодным условиям в этот период оказались дни 18, 20, 23, 24 и 29 января. Все приведенные ниже профили отношения рассеяния получены накоплением за 4 ч и содержат около 140 тыс. исходных сигналов. Уровень фонового сигнала измерялся в течение 2 мс, с 20 по 22 мс в каждом промежутке между посылками импульсов лазера. Таким образом, для каждого единичного профиля сигнала в качестве фонового бралось среднее по 200 значениям фонового сигнала, измеренным в промежутке между импульсами. Итоговая величина фонового сигнала за 15 мин получалась суммированием и усреднением 1800000 измеренных значений.

На рис. 1, *б, в* приведены значения фонового сигнала  $N_f$  с накоплением 15 мин и отношение сигнал-фон, полученные 18 и 29 января для суммарно-го сигнала за 4 ч. Разница в ходе кривых объясняется изменением фазы Луны, близкой к полнолуннию 18 января, и к новолунию 29 января. Данные для значений фона и отношения сигнал-фон за 20, 23 и 24 января лежат в промежутке между кривыми за 18 и 29 января в соответствии с убыванием фазы Луны.

Аномальное поглощение сопровождалось стратосферным потеплением. На рис. 2 приведен ход температуры в области высот от 10 до 85 км по данным спутника Аура.

В нижнем ряду приведены профили отношения рассеяния, полученные в эти же дни. Стратосферное потепление началось 18 января с увеличения температуры примерно на 7–8 К на высоте 10 км, похолодания в области 30 км на 15° и потепления в области 50 км на 20°. 20 января область потепления распространяется на высоты от 10 до 40 км,

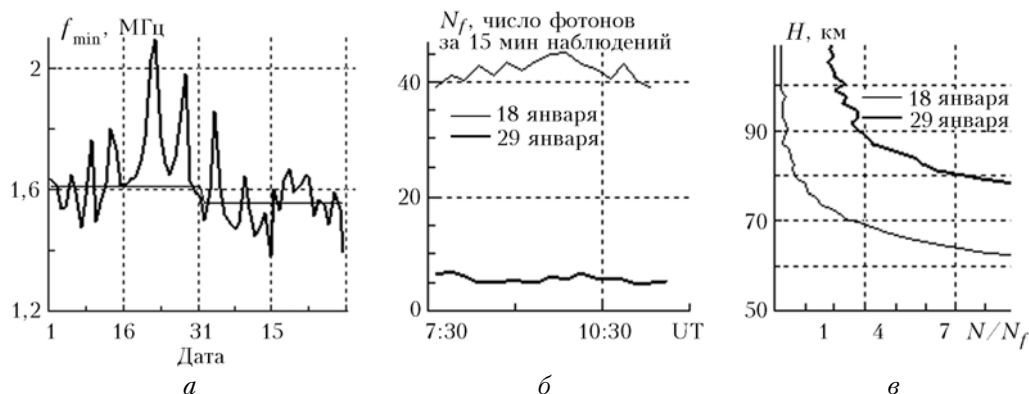


Рис. 1. Среднесуточный ход ионосферного параметра  $f_{\min}$  в зимние месяцы 2008 г. (*a*), фоновый сигнал (*б*) и отношение сигнал-фон (*в*) во время лидарных наблюдений 18 и 29 января 2008 г.

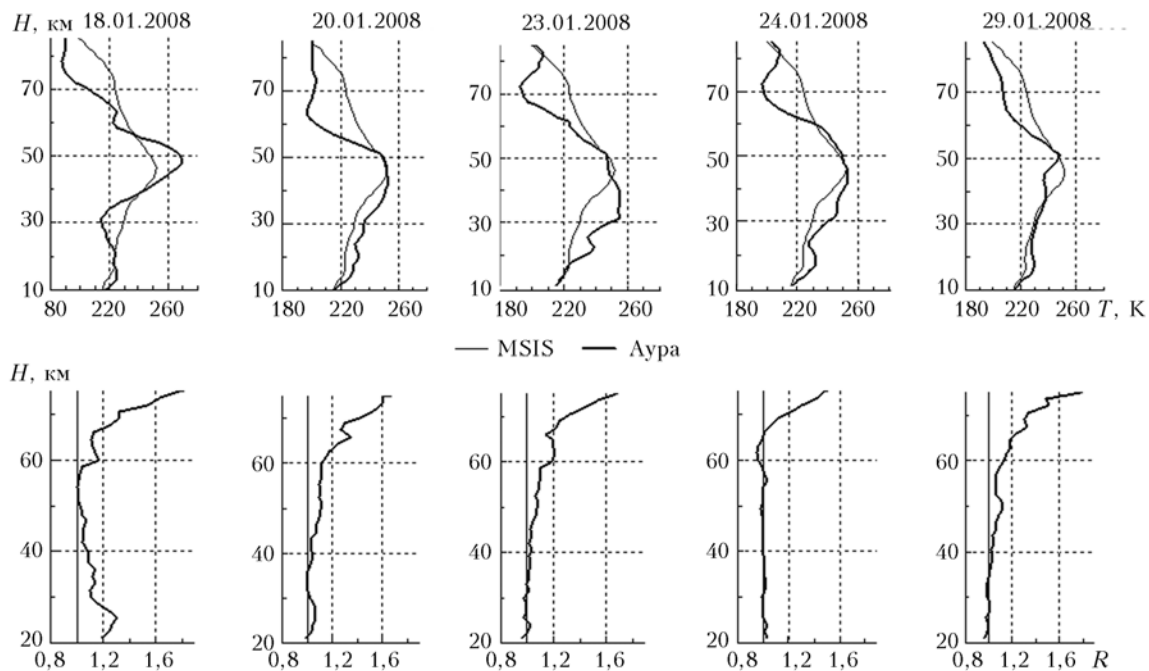


Рис. 2. Температурный профиль по данным спутника Аура (верхний ряд) в сравнении с моделью MSIS-2000 и отношение рассеяния за эти же дни по данным лидарных наблюдений (нижний ряд)

одновременно наблюдается похолодание более чем на  $30^\circ$  вблизи 63 км. 23 января стратопауза перемещается на высоту около 30 км, область максимального похолодания смещается с 63-го на 70-й км.

Профиль температуры начинает восстанавливаться 24 января, хотя и сохраняются при этом потепление ниже стратопаузы и заметное похолодание в области 70 км. Аномального поглощения в ионосфере 24 января уже не наблюдается. Во второй волне аномального поглощения (29 января) изменения температуры выше 50 км имеют тот же характер, но в области от 40 до 50 км наблюдается похолодание до  $14^\circ$ .

В нижнем ряду рис. 2 приведены профили аэрозольного отношения рассеяния  $R = 1 + R_a/R_m$  за 18, 20, 23, 24 и 29 января, где  $R_m$ ,  $R_a$  — коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния соответственно. Накопление сигнала большое, и профили доверительного интервала не приводятся, так как в этом масштабе отображения они практически совпадают с профилем сигнала. 18 января — начало явления аномального поглощения радиоволн в ионосфере. Характерными являются хорошо выраженный максимум с  $R = 1,2$  в области 60 км и повышенное отношение рассеяния в области 20–40 км. На профилях за все остальные дни повышенного рассеяния в области 20–40 км не наблюдается, за исключением незначительного повышения 20 января на высоте около 25 км. Двадцатого января максимум отношения рассеяния из области 60 км перемещается на 65 км, 23 января значения  $R$  в нем начинают уменьшаться, и максимум полностью исчезает 24 января, в день окончания первой волны аномального поглощения в ионосфере.

29 января окончание второй волны аномального поглощения в ионосфере. Наблюдается небольшое повышение в ходе  $R$  на высотах около 50 км, но в связи с отсутствием данных за предыдущие дни добавить что-либо к уже сказанному сложно. Можно лишь отметить, что в этот день наблюдалось понижение температуры в указанной области.

По результатам первого года лидарных наблюдений на Камчатке профили рассеяния, полученные с конца марта по ноябрь, имеют обычно такой же вид, как и профиль за 24 января. Как правило, значение  $R$  практически не отличается от единицы до высоты 60 км. Примерно с высоты 60 км на всех без исключения профилях виден рост отношения рассеяния. На зимних профилях и в обычные дни наблюдаются эпизодически небольшие повышения отношения рассеяния в области высот 40–60 км. Исследование подобных явлений на реальных данных по температуре не проводилось. Сравнение представленных профилей с профилями, полученными по данным температуры и давления модели MSIS, показывает, что для дней аномального поглощения и стратосферных потеплений использование модельных результатов может привести к существенным искажениям.

## Динамика лидарных сигналов

Рассчитаны коэффициенты корреляций  $K$  между рядами 15-минутных значений  $f_{\min}$  и сглаженными методом скользящего среднего по интервалу 3 км значениями отношений рассеяния  $R$  в 1,5-км слое. Значимой для ряда из 16 данных является

величина коэффициента корреляции большая 0,25. Ход кривой значения коэффициента корреляции от высоты за 18 января представлен на рис. 3, а.

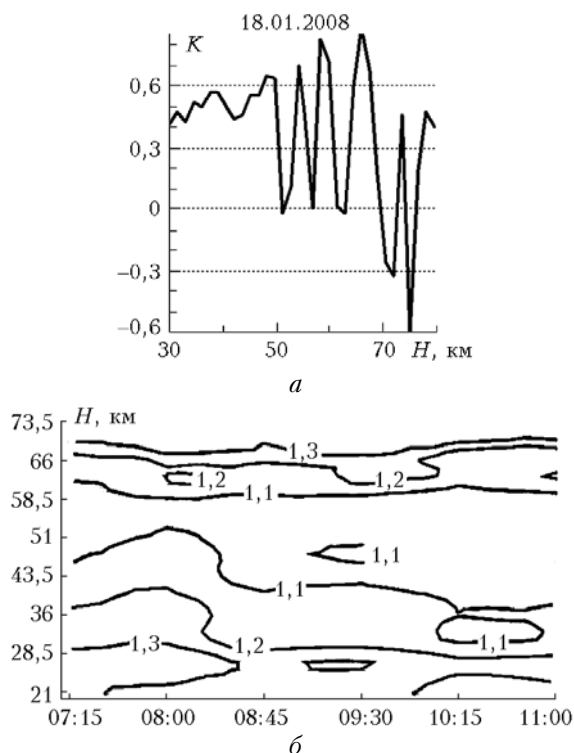


Рис. 3. Высотный ход коэффициентов корреляции значений  $R(H)$  с  $f_{\min}$  за 18 января (а) и распределение  $R(H)$  за 4 ч наблюдений (б)

Для наглядности на рис. 3, б приведено распределение отношения рассеяния в координатах высота–время за 4 ч наблюдений. Распределение построено по 15-минутным высотным профилям  $R$ , значения  $R$  сглажены по двум соседним точкам методом скользящего среднего.

По данным рис. 3, а, с высоты около 50 км начинаются волнообразные изменения коэффициента корреляции от нуля до величин, заметно превышающих уровень значимости. В области высот 60 и 70 км получены максимальные значения коэффициента корреляции, равные 0,82 и 0,88. Положение максимумов в ходе итогового профиля  $R(H)$  за 18 января на высотах 60 и 70 км (см. рис. 2) хорошо соответствует положению максимальных значений коэффициента корреляции (см. рис. 3, а). Примерно одинаковое расстояние между пиковыми значениями коэффициента корреляции, равное 6–7 км, может указывать на наличие волновых процессов в атмосфере, сопровождающих явление аномального зимнего поглощения радиоволн в ионосфере.

Двадцатого января ход значений коэффициентов корреляции величин  $R$  в 1,5-км слоях и  $f_{\min}$  уже не отличается такой периодичностью. Значения коэффициентов корреляции, существенно превышающие уровень значимости, наблюдались в областях 50–60 и 67–73 км. Были рассчитаны коэффи-

циенты корреляции между  $f_{\min}$  и средним значением  $R$  в этих областях. Область положительной корреляции в интервале 67–73 км с коэффициентом корреляции, равным 0,55, совпадает с провалом в этом интервале высот в нарастающем в целом ходе значений  $R$ . Не обнаружено заметных корреляций 23 и 24 января, значения коэффициентов корреляции практически не выходят за пределы интервала значимости. В связи с очень малым количеством дней, имеющих для исследования, результаты, приведенные на рис. 3, могут рассматриваться лишь как предварительные.

Явление аномального зимнего поглощения радиоволн частоты 1–2 МГц в нижней ионосфере исследовалось во время Международного геофизического года в 1975–1976 гг. В работах 80-х гг., например [7], на модельных расчетах показано, что это явление может быть объяснено повышением турбулентности в атмосфере и переносом паров воды в верхнюю мезосферу. Таким образом, физические причины связи отношения рассеяния с параметром  $f_{\min}$  могут определяться тем обстоятельством, что рост концентрации электронов в области 80–100 км в ночное время обеспечивается ростом содержания воды. В нижележащих слоях рост содержания воды может вызывать рост отношения рассеяния.

На всех приведенных профилях наблюдается рост отношения рассеяния, начиная с высоты около 60 км. Этот рост характерен для всех без исключения профилей, полученных в ИКИР в 2007–2008 гг. На высоте 100 км характерное значение  $R$  лежит в интервале 20–40. В области 80–100 км рост отношения коэффициентов рассеяния может определяться наличием метеорной пыли и экспоненциально уменьшающимся значением коэффициента молекулярного рассеяния. Этот рост продолжается с ростом высоты и в настоящей статье далее не обсуждается.

Из-за большого роста коэффициентов отношения рассеяния в области 80–100 км, а также в связи с не очень надежными данными по температуре на высотах вблизи 100 км и плохим соотношением сигнал-фон в этом диапазоне высот исследовалась динамика не коэффициентов отношения рассеяния, а самих лидарных сигналов. Были рассчитаны коэффициенты корреляций между рядами 15-минутных значений сигнала, нормированного на квадрат расстояния до приемника, и значениями  $f_{\min}$ . При расчетах корреляций использовалось среднее значение  $f_{\min}$ , определенное по двум значениям на границах каждого 15-минутного интервала.

В лидарных данных для расчета корреляции была выбрана нормированная величина суммарного за 15 мин сигнала, определяемая как  $N_n = (N - N_f) \cdot H^2$ , где  $N$  – суммарный сигнал,  $N_f$  – суммарный фоновый сигнал,  $H$  – высота. Предварительно расчеты проводились для 1,5-км слоев, затем выбирался наиболее толстый слой с наличием положительных корреляций, вычислялся суммарный по слою нормированный сигнал и для него окончательно повторялся расчет коэффициента

Коэффициенты корреляции среднего по диапазонам высот сигнала  $N_n$  с параметром ионосферы  $f_{\min}$

Дата	18.01	20.01	23.01	24.01	29.01	11.02	18.02	19.02	03.03	04.03
$K$	0,48	0,63	0,4	0,37	0,5	0,62	0,74	0,46	0,407	0,274
$dH$ , км	78,5–81,5	82–100	85,5–91,5	78,5–91,5	78–102	90–97,5	77–100	94,5–96,5	94,5–96,5	94,5–96,5

корреляции с  $f_{\min}$ . В связи с плохим соотношением сигнал-фон на этих высотах ряд 15-минутных лидарных данных сглаживался один раз по двум соседним точкам методом скользящего среднего. Расчеты проведены для всех без исключения дней наблюдений с января по начало марта 2008 г. Результаты представлены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что по меньшей мере в половине исследованных зимних дней наблюдаются заметные корреляции лидарных сигналов в широких областях высот со значением  $f_{\min}$ . Значимые корреляции наблюдаются для всех дней аномального поглощения в ионосфере. Заметные корреляции наблюдаются также 11 и 18 февраля, когда выраженного явления аномального поглощения в ионосфере по среднесуточным значениям не отмечено. Для выяснения возможных причин наличия или отсутствия корреляций лидарных данных с  $f_{\min}$  был проанализирован ход кривой  $f_{\min}$  за эти дни. Анализ хода  $f_{\min}$  по 15-минутным значениям показал, что для всех дней с наличием корреляции наблюдается сильная изменчивость значений  $f_{\min}$  в течение наблюдений, обычно сопровождаемая заметным трендом к увеличению или уменьшению значений.

На рис. 4 представлены типичные графики хода кривой  $f_{\min}$  для дней с наличием корреляции (20 и 29 января) и дней с ее отсутствием (19 февраля). Тонкой линией нанесена линия тренда. 20 и 29 января наблюдается сильная изменчивость  $f_{\min}$ , достигающих значений более 1,8 МГц в ночное время. Такой ход  $f_{\min}$  характерен для дней аномального зимнего поглощения радиоволн в ионосфере. Девятнадцатого февраля наблюдаются небольшие колебания  $f_{\min}$  вокруг горизонтальной линии тренда вблизи 1,4 МГц, обычных для Камчатской АИС. Таковы же графики  $f_{\min}$  для 3 и 4 марта. Значения  $f_{\min}$  на них стабильны, практически лежат в пределах точности измерения этих параметров. Таким

образом, корреляции лидарных сигналов с ионосферным параметром  $f_{\min}$  могут быть выявлены только при наличии заметного тренда к увеличению или уменьшению  $f_{\min}$  в течение периода наблюдений, что, как правило, наблюдается в дни аномального зимнего поглощения в ионосфере и не наблюдается в другие сезоны.

Физические причины корреляций лидарных сигналов в области 80–100 км с  $f_{\min}$  могут объясняться теми же факторами. Имеются сообщения об аэрозоле размером около 70 нм в области  $D$  ионосферы [8]. Все фотохимические реакции в мезосфере идут с недостатком воды. При повышении содержания воды повышается скорость всех фотохимических реакций, определяющих плотность электронов в области  $D$ . Таким образом, рост содержания воды приводит к росту плотности электронов в области 80–100 км и, как следствие, к росту  $f_{\min}$ . Одновременно может происходить укрупнение частиц аэрозоля за счет конденсации на них молекул воды, так как температура в области мезопазузы очень низкая.

## Заключение

Выводы работы [1] о возможности формирования аэрозольных слоев над стратопазузой в периоды зимнего аномального поглощения радиоволн в ионосфере подтверждаются лидарными наблюдениями на Камчатке. Качественно подтверждаются также выводы работ 70–80-х гг. XX в., например [7], о том, что явление аномального зимнего поглощения радиоволн может вызываться повышением турбулентности в атмосфере и выносом паров воды за стратопазузу. Более детальный анализ этого явления требует больших наборов данных. По имеющемуся у нас ограниченному погодными условиями набору данных за один год какие-то более обобщенные выводы сделать сложно.

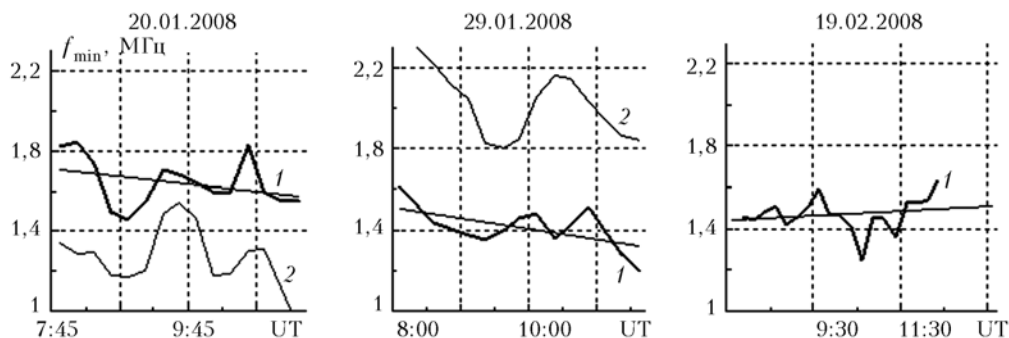


Рис. 4. Ход кривой  $f_{\min}$  (1) и суммарного по области корреляции сигнала (2), нормированного на квадрат высоты

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 16, программы ДВО РАН № 06-II-CO-07-026, гранта РФФИ № 07-05-00734а.

1. Бычков В.В., Маричев В.Н. Образование водных аэрозолей в верхней стратосфере в периоды зимнего аномального поглощения радиоволн в ионосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 3. С. 248–255.
2. Буздуга Д.С., Никитин С.А., Пережогин А.С. Программный комплекс автоматизации лидарных измерений «LiSA» (Lidar sounding of atmosphere). М.: ВНИИЦ, 2007. № гос. рег. 50200701666.
3. Ельников А.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Лидарные наблюдения стратосферного слоя аэрозоля над Западной Сибирью // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1988. Т. 24. № 8. С. 818–823.
4. Маричев В.Н., Ельников А.В. О методе лазерного зондирования атмосферного озона на длинах волн 308 и 532 нм // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1. № 5. С. 77–83.
5. COSPAR International Reference Atmosphere. 1972. Akad.-Verl., 1972. P. 450.
6. <http://www.brodo.de/english/pub/nrlmsise/>.
7. Кошелев В.В., Климов Н.Н., Сутырин Н.А. Аэрономия мезосферы и нижней термосферы. М.: Наука, 1983. 183 с.
8. <http://cedar-l.hao.ucar.edu/community/CLRV1.pdf>.

*V.V. Bychkov, V.N. Marichev, A.S. Perezhogin, B.M. Shevtsov, A.V. Shumeiko. Dynamics of lidar reflections in the mesosphere of Kamchatka during winter abnormal absorption of radiowaves in ionosphere.*

The description of Rayleigh lidar, which started to work in Kamchatka in 2007, is given. The connection between lidar results and ionospheric observations, which have been done simultaneously, is analyzed. The data, which confirm the results of observations made at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS since 1988 till 2000 on the formation of aerosol layers in the stratopause area in winter, are given. The connection between the formation of aerosol layers, which were observed above the stratopause in Kamchatka, and the anomalous absorption of radiowaves in the ionosphere observed at the same time is analyzed. The regular growth of dispersion relation beginning from the height of 60 km has been found. The dynamics of lidar signals in this area and its connection with the condition of lower ionosphere is investigated.