

В.С. Шаманаев, И.Э. Пеннер, Г.П. Коханенко

Оптические неоднородности нижней границы облачности*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 4.10.2006 г.

Лазерным зондированием нижней границы облачности (НГО) получены горизонтальные распределения высоты НГО, градиента показателя рассеяния излучения в пограничной области облачности и усредненного по вертикали показателя рассеяния. Для этих параметров вычислены энергетические спектры их флуктуаций. Показано, что форма спектров качественно близка форме спектров, измеренных самолетным лидаром на верхней границе облачности. Ситуацию не изменяет даже наличие резко неоднородной НГО со скачкообразными изменениями ее высоты и выпадающими осадками.

Известно, что как верхняя граница облачности (ВГО), так и нижняя (НГО) неоднородны по своему строению. Это касается и геометрических неоднородностей, т.е. флуктуаций ВГО и НГО, и оптических, например показателя рассеяния излучения. Хотя и геометрические параметры вычисляются из оптических измерений.

Именно нижняя граница облачности была одним из первых объектов для лазерного зондирования: лидарные сигналы от облаков легко регистрировать и облака на небе почти всегда имеются. Более того, проводился достаточно широкий международный эксперимент ECLIPS («Экспериментальное пилотное изучение облаков лидарами») [1]. Около 15 лидарных групп от Австралии до Канады, включая Россию, в согласованное время зондировали облака. Однако какая-либо унифицированная система обработки и представления данных не использовалась. Обработанные по тем или иным алгоритмам лидарные сигналы представлялись чаще всего как гистограммы вероятности появления различных значений изучаемых параметров. Сопоставлять результаты различных участников было весьма сложно, особенно при наличии разрывных последовательностей эхосигналов, что часто бывает при проведении натуральных экспериментов.

Поэтому впоследствии мы перешли (при исследовании верхней границы облачности) к относительным измеряемым величинам, например колебаниям высоты облачности [2, 3]. По этой методике в измерительной выборке удаляется тренд, далее для нее вычисляется стандартное отклонение, вся выборка на него нормируется, и дальнейшие процедуры обработки производятся уже с этой преобразованной выборкой как со стационарным случайным процессом.

В описываемом эксперименте при вертикальном вверх зондировании нижней границы облачности мы сравнивали одновременное поведение высоты НГО, показателя рассеяния излучения σ в НГО и градиента σ в вертикальном направлении. На-

помним, что в соответствии с метеорологическим словарем [4] облака — это «системы взвешенных в атмосфере (не у самой земной поверхности) продуктов конденсации водяного пара — капель воды или кристаллов льда, или тех и других. При укрупнении облачных элементов и возрастании их скорости падения они выпадают из облаков в виде осадков. Диаметры капель в облаках — от долей микрометра до 200 мкм. Содержание жидкой воды в облаках от нескольких сотых долей грамма до нескольких граммов на 1 м³ облачного воздуха».

Вертикальное распределение σ имеет, в целом, детерминированный характер, но с большим влиянием случайной составляющей. Горизонтальное распределение σ на любой фиксированной высоте носит преимущественно флуктуационный характер. Под нижней границей облачности подразумевается слой толщиной несколько десятков метров, начиная от той высоты над землей (или расстояния от лидара), на которой в атмосфере появляются водяные капли (или кристаллы) и показатель рассеяния излучения превосходит таковой для подоблачной свободной атмосферы. Реально толщина этого слоя задается несколько условно (как, например, толщина атмосферного пограничного слоя), но применительно к лазерному зондированию логично привязывать ее к глубине проникновения зондирующего импульса в облако.

Показатель рассеяния в облаке вычислялся по асимптотическому алгоритму Ковалева [5]:

$$\sigma(r) = \frac{F(r)r^2}{2 \left[\int_{r_0}^{\infty} F(x)x^2 dx - \int_{r_0}^r F(x)x^2 dx \right]}, \quad (1)$$

где $F(r)$ — мощность эхосигнала, соответствующая расстоянию r от лидара; r_0 — расстояние до нижней границы облака. Понятие высоты нижней границы не вполне однозначное. Ее численное значение в некоторых пределах «изменяется» даже для одного

и того же эхосигнала в зависимости от выбранного критерия. Ранее мы анализировали это явление в работе [6]. В формуле (1) за расстояние до границы облака r_0 принята «микрофизическая» граница, когда сечение обратного рассеяния облачных частиц начинает превышать сечение обратного рассеяния собственно атмосферы и производная эхосигнала первый раз изменяет свой знак. Это позволяет несколько увеличить зондированную оптическую толщину облака и улучшить тем самым точность измерений показателя рассеяния.

Знак бесконечности « ∞ » символизирует собой именно асимптотический режим, когда эхосигнал затухает в облачной толще до нуля. Экспериментальная практика показала, что для относительно плотных облаков нижнего яруса бесконечная глубина зондирования может быть заменена на максимальную глубину r_{\max} , на которой система регистрации лидара еще фиксирует сигнал.

Ранее в работе [6] показано, что вычисленным из лидарных сигналов значениям $\sigma(r)$ можно доверять до глубины в облаке, равной половине максимальной глубины зондирования, т.е. до $0,5R_2 = 0,5(r_{\max} - r_0)$. (Использованы обозначения, соответствующие упомянутой работе [6]).

Поэтому для описания горизонтального строения границы облачности именно по показателю рассеяния был предложен средний по глубине показатель рассеяния

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{0,5R_2} \int_{r_0}^{r_0+0,5R_2} \sigma(x) dx. \quad (2)$$

Предлагается именно эту величину считать показателем рассеяния в данной точке границы облака. Она представляется достаточно естественной и самоорганизующейся, так как чем плотнее облако, тем меньше глубина проникновения луча и тем меньше глубина осреднения для $\hat{\sigma}$.

Еще одной характеристикой, пригодной для описания границы облака, является градиент показателя рассеяния. Он является мерой размытости НГО. Прямые измерения вертикального распределения оптической плотности облаков, например [7], выявили, что показатель рассеяния вначале возрастает, а ближе к верхней границе начинает убывать. Разумеется, это все промодулировано флуктуационными процессами. В приближении линейного возрастания величины показателя рассеяния в НГО в статье [6] дано

$$\text{grad}\sigma(r) = \mu_\sigma = \frac{1}{2(r_m - r_0)^2} \frac{2r_0 - r_m}{r_m}. \quad (3)$$

Действительно, если $\sigma(r) = \mu_\sigma(r - r_0)$ для $r > r_0$, то мощность эхосигнала от облака по каноническому уравнению лазерного зондирования в приближении однократного рассеяния

$$F(r) = \frac{A}{r^2} \mu_\sigma (r - r_0) \exp[-\mu_\sigma (r - r_0)^2]; \quad (4)$$

$$\sigma(r) = \mu_\sigma (r - r_0), \quad r > r_0.$$

Здесь принято, что рассеяние в облачной толще гораздо сильнее, чем таковое в подоблачной атмосфере. Константа A включает в себя все приборные и атмосферные постоянные, не существенные в данный момент для понимания рассматриваемых вопросов.

Напомним, что эхосигнал формируют два конкурирующих процесса: его возрастание за счет роста показателя рассеяния $\mu_\sigma(r - r_0)$ и бугеровское затухание за счет множителя $\exp[-\mu_\sigma(r - r_0)^2]$. Результатом является известный максимум на эхосигнале на глубине в облаке $r_m > r_0$. (Именно его часто используют как один из критериев при измерении расстояния до границы облака). Логарифмируя (4) и взяв производную по r , решаем задачу на экстремум в точке r_m . Получается выражение (3). Если мы работаем не с мощностью сигнала $F(r)$, а с его S -функцией $S(r) = F(r)r^2$, то (3) упрощается до $\mu_\sigma = 0,5(r_m - r_0)^{-2}$.

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты. Зондирование слоистообразной облачности выполнялось неоднократно описанным лидаром «Макрель-2», однако без использования поляризации. Технические параметры, имеющие отношение к решаемой задаче, следующие: стандартная длина волны излучения 532 нм, длительность лазерного импульса по уровню 0,35–15 нс, величина шага квантования 7-разрядного аналого-цифрового преобразователя для данного эксперимента 10 нс. Таким образом, пространственное разрешение всего лидара составляло 1,5 м, периодичность вспышек лазера 1 Гц.

Кроме того, в данном эксперименте мы контролировали скорость движения облаков. Видеокамерой с фиксированным углом поля зрения измерялось время перемещения по экрану монитора хорошо заметных облачных неоднородностей. Расстояние до НГО измерялось самим лидаром. Далее решалась тривиальная тригонометрическая задача и вычислялась скорость движения облаков. Все это позволяло оценивать горизонтальные размеры тех или иных облачных неоднородностей.

Использованные нами алгоритмы компьютерного выбора точек r_0 и r_m подробно описаны в [2, 3]. Их основой является последовательный перебор точек с шагом квантования АЦП с учетом монотонности изменения сигналов и превышения порогов.

Отметим, что функционалы $\hat{\sigma}$ и μ_σ получаются из одного и того же лидарного сигнала. Но их можно считать независимыми один от другого, так как $\hat{\sigma}$ является интегральной величиной, а μ_σ — дифференциальной. Поэтому в последующем статистическом анализе их можно сравнивать между собой как две независимые выборки.

На рис. 1 показаны результаты первичной обработки эхосигналов от облачного поля протяженностью 136 км.

Предварительный анализ данного эксперимента позволяет весь временной цикл измерений разбить на 3 участка с местным временем проведения зондирования в интервалах 18:30–19:00, 19:00–

19:50 и 19:50–20:30 для последующего сравнения статистических оценок оптических характеристик облачности. Основными критериями являются визуально наблюдаемая (рис. 1, *a*) дисперсия высоты НГО и общая двумерная картина поля НГО для этого эксперимента (на рис. 1, *a* она не показана, чтобы не перегружать его). Приблизительно до 18:55 и лидаром, и визуально наблюдались осадки в виде дождя с наклонной из-за ветра полосой падения.

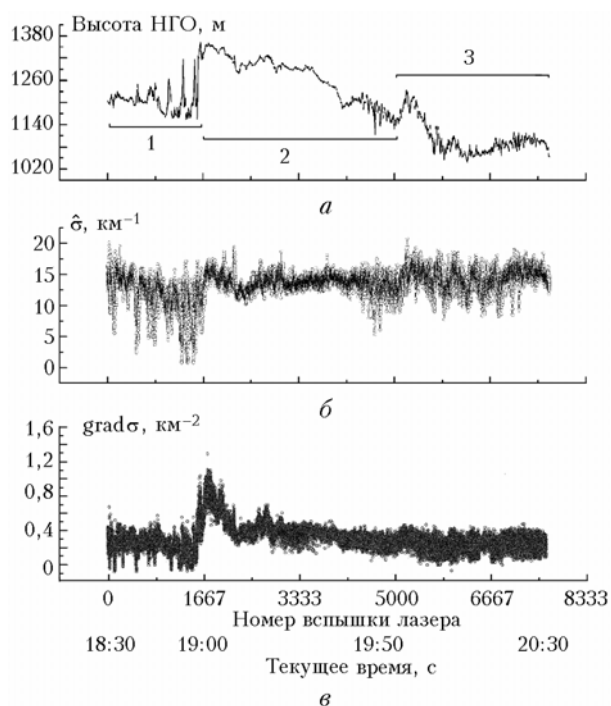


Рис. 1. Зондирование нижней границы слоистообразной облачности длиной 136 км: *a* – горизонтальный профиль высоты НГО; *b* – профиль среднего показателя рассеяния $\hat{\sigma}$; *c* – профиль градиента показателя рассеяния μ_{σ}

Абсолютное изменение высоты НГО здесь достигает 300 м. Однако со среднеглубинным значением $\hat{\sigma}$ в облачной границе ситуация иная. Его стандартное отклонение претерпевает существенные изменения за время эксперимента. Для трех выделенных по общезначимым признакам участков $\delta\hat{\sigma} = \Delta\sigma/\bar{\sigma}$, т.е. вариация равна 67, 29 и 47% (изменяется весьма ощутимо).

Математическое ожидание остается почти постоянным, что видно даже визуально. То же относится и к градиенту показателя рассеяния μ_{σ} . В районе резкого изменения характера НГО (это примерно 1667-я вспышка лазера) μ_{σ} скачками возрастает в 4–5 раз, но зато его флуктуации уменьшаются до 33%. На участках до и после скачка $\delta\mu_{\sigma}$ изменяется не слишком сильно (вариация 70–80%).

Применим и к нижней границе облачности аппарат быстрого преобразования Фурье, ранее хорошо показавший себя при наблюдениях ВГО [2, 3]. Наша цель заключалась в получении энергетиче-

ского спектра флуктуаций того или иного физического параметра в зависимости от длины пространственной волны. Вычисления выполнялись с помощью пакета программ Turbo Pascal Numerical Methods Toolbox. Это уже вторичная обработка лидарных сигналов.

Рис. 2 построен по всей совокупности данных более чем двухчасового зондирования, т.е. около 8000 вспышек лазера. На рис. 2, *a* флуктуации как $\hat{\sigma}$, так и $\text{grad}\sigma$ подчиняются в целом степенному закону. Но каноническому показателю степени « $-5/3$ » соответствует только $\text{grad}\sigma$, а функционал $\hat{\sigma}$ меняет мощность своих флуктуаций по зависимости « $-6/3$ », т.е. она убывает заметно быстрее. На кривой для флуктуаций $\text{grad}\sigma$ в месте излома спектра на длинах волн внутриоблачных процессов с масштабом пространственных длин волн 200–400 м (т.е. $f \sim 0,1$ Гц) нанесен доверительный интервал. Он показывает, что этот всплеск вполне значим и отображает наличие внутренних процессов в НГО.

Напомним, что пространственные длины волн λ связаны с физической частотой f следования зондирующих импульсов через измеренную нами скорость движения облаков v и $\lambda = v/f$. Скорость ветра на нижней границе облаков равнялась 20 м/с (их можно считать пассивной примесью), лазер работал с частотой 1 Гц.

Спектральные плотности флуктуаций $\hat{\sigma}$ и $H_{\text{НГ}}$ приведены к общему масштабу для качественного сравнения (рис. 2, *b*). Видно, что оба спектра разбиваются на два участка с разными пространственными масштабами, имеющими показатели степенной зависимости « $-5/3$ » и « $-6/3$ ».

В районе более высоких частот (доли герца, или длины волн 250–20 м) этот показатель степени равен « -2 », что более характерно для турбулентности, развивающейся внутри облачного слоя [8]. В области меньших частот (0,05–0,008 Гц, или длины волн 400–2500 м) этот показатель ближе к каноническому значению « $-5/3$ », что характерно для одномерных флуктуаций, находящихся в равновесном состоянии в инерционном интервале пространственных масштабов турбулентности. Область разделения частот приходится на пространственные масштабы порядка 200–400 м, что соответствует средней геометрической толщине облачного слоя [4] (напомним, что облака были слоисто-кучевые). Отметим также характерный масштаб порядка ~ 600 м, четко выделяемый в спектре флуктуаций показателя ослабления $\hat{\sigma}$. Он имеет сдвиг в более высокочастотную область по сравнению с таким же характерным масштабом флуктуаций $H_{\text{НГ}}$, который является по отношению к нему внешним масштабом турбулентности.

На рис. 3 приведены спектральные плотности флуктуаций рассматриваемых геометрических и оптических характеристик по отдельности для трех участков (см. рис. 1, *a*). До 19 ч, когда нижняя граница облачного поля была весьма нестабильна, все

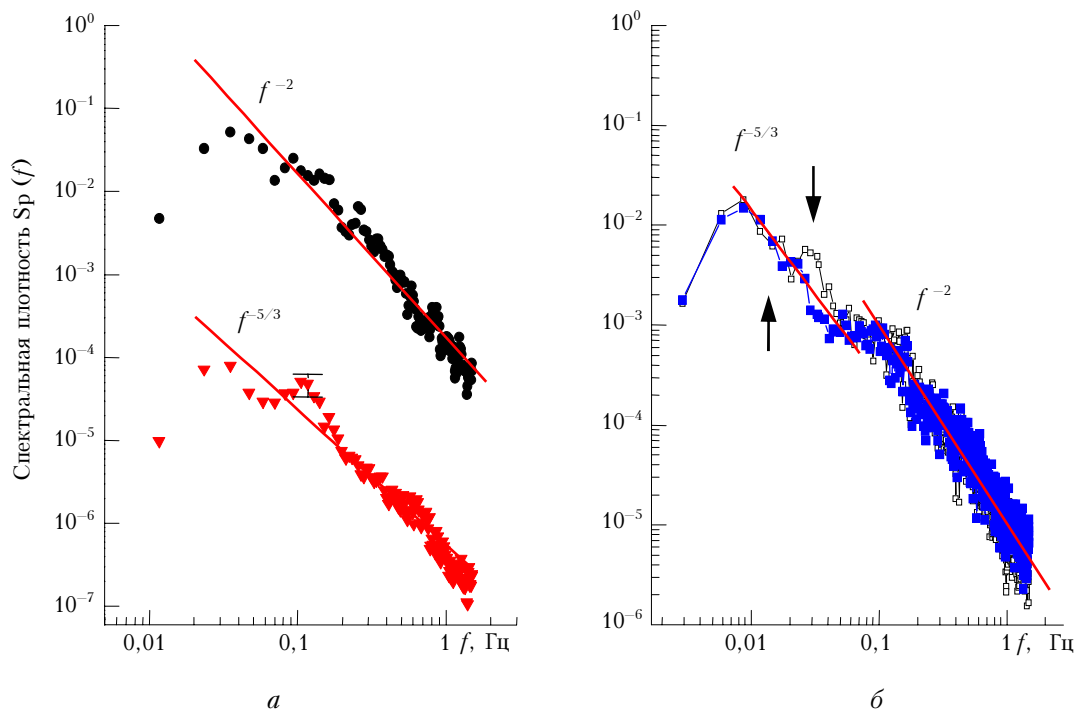


Рис. 2. Энергетические спектры флуктуаций параметров облачности: *a* – частотный спектр флуктуаций значений показателя рассеяния $\hat{\sigma}$ (кружки) и градиента показателя рассеяния (треугольники); сплошная линия – степенной закон; *б* – взаимно нормированные спектры флуктуаций показателя рассеяния и высоты нижней границы облачности. Светлые квадратики – показатель рассеяния $\hat{\sigma}$; темные квадратики – высота НГО; сплошная линия – аппроксимация спектра степенным законом. Стрелками выделен излом на спектре

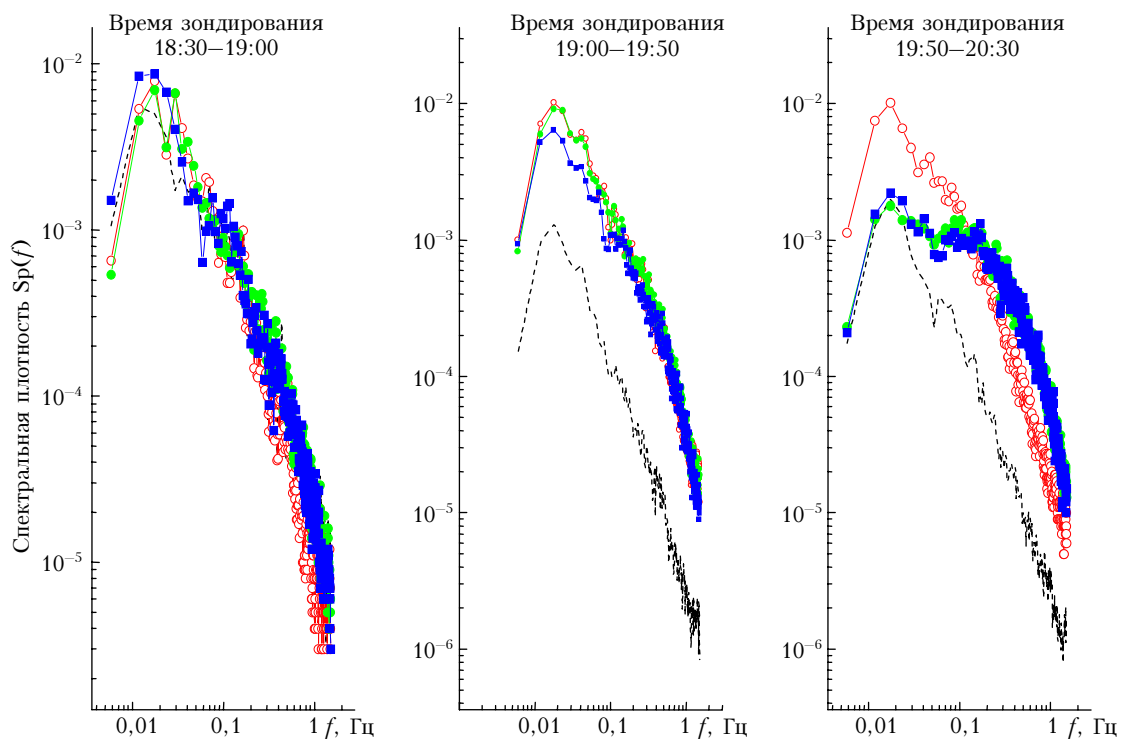


Рис. 3. Энергетические спектры флуктуаций параметров облачности для трех временных отрезков (см. рис. 1) эксперимента. Пунктирная линия – высота НГО; светлые кружки – рассеяние $\hat{\sigma}$; темные квадратики – $\text{grad}\sigma(r)$

три изучаемых параметра флуктуировали приблизительно по одинаковому закону, так что все спектры совпадали. Этот закон достаточно далек от чисто степенного закона, так как в этом двойном логарифмическом масштабе все кривые слегка выпуклые. В ходе дальнейшего эксперимента высота НГО имела тренд к понижению, но скачкообразные, разрывные ее изменения прекратились. И спектр флуктуаций именно высоты НГО стал подчиняться степенному закону « $-5/3$ » в том диапазоне частот (т.е. и пространственных длин волн размеров неоднородностей), который задается длиной даже укороченных выборок, а не всем массивом данных, как на рис. 2. Но флуктуации среднего показателя рассеяния и градиента показателя рассеяния сохранили свое отличие от канонического степенного закона. Однако для всего объема лидарных сигналов (см. рис. 2) флуктуации рассматриваемых параметров облачной границы все-таки приобретают в целом характер степенного закона, что совпадает с данными, полученными для верхней границы облаков [2, 3].

Работы была частично поддержана грантом МНТЦ № В-1063.

1. *Platt C.M., Young S.A., Carswell A.I., Pal S.R., McCormic M.P., Winker D.M., DelGuasta M., Stefanutti L.,*

Eberhard W.L., Hardesty M., Flamant R.N., Valentin R., Forgan B., Gimmetad G.G., Jager H., Khmelevtsov S.S., Kolev I., Kapriellov B., Lu Da-ren, Sassen K., Shamanaev V.S., Uchino O., Mizuno Y., Wandinger U., Weitkamp C., Ansmann A., Wooldridge C. The Experimental Cloud Lidar Pilot Study (ECLIPS) for Cloud-Radiation Research // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1994. V. 75. N 9. P. 1635–1654.

2. *Пеннер И.Э., Шаманаев В.С.* Лидарные исследования высоты верхней границы облачности над океаном. // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 12. С. 1146–1151.

3. *Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Шаманаев В.С.* Лидарные исследования высоты верхней границы облаков над Западной Сибирью // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13. № 4. С. 379–385.

4. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеониздат, 1963. 620 с.

5. *Ковалев В.А.* Об одном способе обработки сигналов лазерного локатора // *Тр. Гл. геофиз. обсерватории.* 1973. Вып. 321. С. 128–133.

6. *Шаманаев В.С.* К оценке коэффициента рассеяния излучения на границе облака // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5. № 7. С. 702–706.

7. *Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.Н., Шугаев В.Ф.* Оптическая плотность облаков. (Экспериментальные исследования) / Под ред. И.П. Мазина // *Тр. ЦАО.* 1976. Вып. 124. 167 с.

8. *Виплиценко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н.* Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 288 с.

V.S. Shamanaev, I.E. Penner, G.P. Kokhanenko. Optical inhomogeneities of the cloudiness low boundary.

In the experiment on laser sensing of the cloudiness low boundary (CLB), CLB height horizontal distributions, the gradient of the radiation scattering index in the cloudiness boundary area, and the vertically averaged scattering coefficient have been measured. Further, the energy spectra of the parameters and their fluctuations were calculated. The shape of the spectra was shown to be qualitatively close to those measured by the aircraft-borne lidar at the top cloud boundary. Even the presence of sharply inhomogeneous CLB with jump-like height variations and precipitations does not change the situation.