

Г.А. Титов

## РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕОДНОРОДНЫХ СЛОИСТО-КУЧЕВЫХ ОБЛАКОВ. 2. ПОГЛОЩЕНИЕ

Исследуется влияние горизонтального переноса на точность определения поглощения как разности между полными потоками излучения, измеренными над и под облаками. При такой схеме восстановления поглощения горизонтальный перенос интерпретируется как кажущееся поглощение и является основным источником неопределенности.

Если измеренные полные потоки излучения усреднить по интервалам длиной  $\sim 6$  км и больше, то горизонтальным переносом можно пренебречь и получить достоверные оценки среднего (по этому интервалу) поглощения. Средние по реализации (длина  $\sim 200$  км) альбедо, пропускание и поглощение можно получить, если длина интервала между последовательными измерениями полных потоков не превосходит  $\sim 10$  км. Одновременные измерения полных потоков видимой и коротковолновой (0,4 – 4,0 мкм) радиации позволяют существенно улучшить оценки поглощения и изучить изменчивость поглощения на малых ( $\sim 0,1$  км) масштабах.

### 1. Введение

Солнечная радиация, поглощенная атмосферой и подстилающей поверхностью и преобразованная в другие энергии, контролирует все динамические процессы в климатической системе Земли. Взаимодействие облаков и радиации является одним из наиболее важных и недостаточно изученных атмосферных процессов, управляющих климатом. Наиболее ярким примером, наглядно иллюстрирующим наше скудное понимание переноса излучения в облаках, является проблема аномального поглощения [1–3]. После более чем 40 лет работы мы до сих пор не можем ответить на следующие, наиболее важные, на наш взгляд, вопросы, имеющие фундаментальное значение для понимания физики взаимодействия солнечной радиации с облаками:

– почему поглощение облаками, полученное из натурных измерений, часто превышает поглощение, рассчитанное с помощью радиационных моделей?

– существует ли в атмосфере реальный неизвестный поглотитель, или это явление является следствием неопределенностей в натурных измерениях и (или) во входных параметрах используемых моделей переноса излучения?

– насколько аккуратно радиационные модели, используемые для расчетов, описывают радиационные свойства реальных облаков?

Почти все атмосферные радиационные модели предполагают, что облака являются однородными по горизонтали (плоскопараллельная модель). Оптические свойства реальных облаков флуктуируют в пространстве, и масштаб этих флуктуаций варьируется в пределах нескольких порядков величины. Эта горизонтальная неоднородность облаков может быть одним из основных источников расхождений между натурными измерениями и вычислениями, основанными на плоскопараллельной модели.

Данная работа является логическим продолжением исследований, выполненных в [4], поэтому мы будем использовать те же самые модель неоднородных слоисто-кучевых облаков, метод решения уравнения переноса, обозначения и т.д. Для удобства при ссылках на формулы и рисунки будем использовать двойную нумерацию. Например, (4.6) обозначает формулу (6) из [4]. Ниже обсуждается влияние горизонтального переноса на точность определения поглощения.

### 2. Поглощение и горизонтальный перенос излучения в облаках

Согласно уравнению (4.6) мы можем определить поглощение солнечной радиации некоторым объемом облака, если известны полные потоки, выходящие через *замкнутую* поверхность, ограничивающую этот объем. На практике же измеряются только полные потоки над и под облаками, т.е.  $F_0$ ,  $F^\uparrow(x, y, H)$  и  $F^\downarrow(x, y, h)$  (см. рис. 4.1). Тогда уравнение (4.6) содержит две известные (альбедо и пропускание) и две неизвестные (поглощение и горизонтальный пере-

нос) функции, и, следовательно, реальное поглощение  $A(x, y)$  не может быть определено. Если горизонтальный перенос излучения игнорируется и используется уравнение баланса (4.7), то вместо  $A(x, y)$  определяется восстановленное поглощение  $A'(x, y)$ , вычисляемое по формуле

$$A'(x, y) = A(x, y) + E(x, y) = 1 - R(x, y) - T(x, y). \quad (1)$$

В этом случае горизонтальный перенос рассматривается как некоторое кажущееся поглощение. Поскольку  $E(x, y)$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения и по порядку величины равно  $A(x, y)$ , то восстановленное поглощение  $A'(x, y)$  может сильно отличаться от реального. Таким образом, горизонтальный перенос излучения может быть одним из основных источников неопределенности при измерении поглощения облаками. Рассмотрим два возможных подхода, позволяющих устранить эту неопределенность и улучшить оценку поглощения.

1. После усреднения полных потоков по пространству  $\langle E \rangle = 0$  уравнение баланса лучистой энергии (4.8) содержит одно неизвестное, и среднее поглощение  $\langle A \rangle$  однозначно рассчитывается по формуле

$$\langle A \rangle = 1 - \langle R \rangle - \langle T \rangle. \quad (2)$$

Прежде чем использовать формулу (2), необходимо ответить на вопрос: Каковы минимальные размеры области, по которой нужно выполнить усреднение?

2. Предположим, что имеются данные измерений альбедо и пропускания в видимой (индекс «vis») и ближней ИК (индекс «ir») области спектра. В видимом диапазоне длин волн нет поглощения  $A_{\text{vis}}(x, y) \equiv 0$  и из уравнения (6) можно найти горизонтальный перенос излучения

$$E_{\text{vis}}(x, y) = 1 - R_{\text{vis}}(x, y) - T_{\text{vis}}(x, y). \quad (3)$$

Пусть известна функция  $E_{\text{ir}}(x, y) = f(E_{\text{vis}}(x, y))$ . Согласно (4.6) поглощение в ИК-диапазоне можно вычислить по формуле

$$A_{\text{ir}}(x, y) = 1 - R_{\text{ir}}(x, y) - T_{\text{ir}}(x, y) - f(E_{\text{vis}}(x, y)). \quad (4)$$

Отметим, что этот метод улучшения оценки поглощения был предложен в [5], где изучалось поглощение солнечной радиации облаками конечных горизонтальных размеров. При этом предполагалось, что горизонтальный перенос приблизительно одинаков в различных спектральных интервалах, т.е.  $E_{\text{ir}}(x, y) = E_{\text{vis}}(x, y)$ . Ниже будет показано, что в неоднородных слоисто-кучевых облаках это предположение, вообще говоря, не выполняется.

Для того чтобы протестировать оба подхода, будем использовать одномерную модель облаков с наклоном степенного энергетического спектра оптической толщины  $\beta = 5/3$  и метод решения уравнения переноса, описанные в [4]. Другие значения  $\beta$  отмечаются в тексте и подписях к рисункам. Для простоты и лучшего понимания физики в ИК-области спектра будем учитывать только поглощение каплями воды и положим альбедо однократного рассеяния  $\omega_{0,\text{ir}} = 0,99$ . Для каждого пикселя наряду с альбедо и пропусканием рассчитывалось поглощение. При  $\omega_{0,\text{ir}} = 0,99$   $\langle A \rangle = 0,18$ , что приблизительно соответствует среднему поглощению облачной атмосферы [1,6].

Поглощение  $A_{\text{ir}}(x_i)$  как функция восстановленного поглощения  $A'_{\text{ir}}(x_i) = A_{\text{ir}}(x_i) + E_{\text{ir}}(x_i)$ ,  $i = 1, \dots, 4096$ , рассчитанного по формуле (1), показано на рис. 1,а. Видно, что поглощение сильно зависит от оптической толщины данного и соседних пикселей и может изменяться почти в 4 раза. Между  $A_{\text{ir}}(x_i)$  и  $A'_{\text{ir}}(x_i)$  отсутствует однозначная зависимость, например,  $A'_{\text{ir}}(x_i) = 0,20$  соответствуют значения реального поглощения  $0,08 \leq A_{\text{ir}}(x_i) \leq 0,32$ . Аналогичная картина наблюдается при других зенитных углах Солнца и альбедо подстилающей поверхности. Таким образом, по *отдельным* измерениям полных потоков излучения на верхней и нижней границе неоднородных облаков *невозможно* достоверно оценить поглощение.

Очень редко возможны ситуации, когда за счет горизонтального переноса пиксель получает больше излучения, чем поглощается внутри него, и тогда  $A'_{\text{ir}}(x_i) < 0$ . Этим можно объяснить тот факт, что при оценке поглощения из самолетных измерений полных потоков солнечной радиации над и под облаками иногда получались отрицательные значения [1, 6, 7]. Интересным представляется то, что восстановленное поглощение  $A'_{\text{ir}}(x_i)$  изменяется от отрицатель-

ных значений до  $\sim 0,35$ , что приблизительно соответствует значениям поглощения, полученным из натуральных измерений.

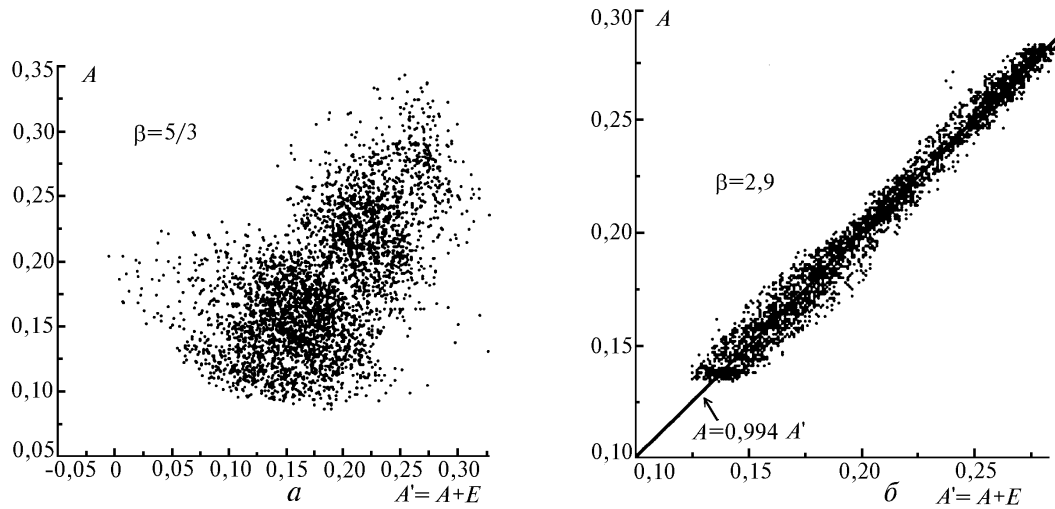


Рис. 1. Поглощение  $A$  как функция восстановленного поглощения  $A' = A + E$  при  $\xi_{\odot} = 60^{\circ}$ ,  $A_s = 0$  (океан) и  $\omega_{0,ir} = 0,99$ :  $a - \beta = 5/3$ ;  $b - \beta = 2,9$

Как отмечалось в [4], при  $\beta = 2,9$  облачное поле является почти однородным на масштабах от 0,1 до 1–2 км и горизонтальным переносом излучения можно пренебречь. В этом случае наблюдается хорошая линейная корреляция между реальным и восстановленным поглощением (рис. 1, б). Это согласуется с результатами анализа натуральных измерений [8]: модели дают корректные значения альbedo облаков в ближней ИК-области спектра, когда облака «выглядят» более однородными.

**2.1. Пространственное усреднение.** Для того чтобы ответить на сформулированный выше вопрос о достаточном пространственном усреднении, будем использовать потоки излучения, усредненные по различному числу пикселей,

$$R(nx) = \frac{1}{2^{nx}} \sum_{i=1}^{2^{nx}} R(x_i), \quad T(nx) = \frac{1}{2^{nx}} \sum_{i=1}^{2^{nx}} T(x_i), \quad A(nx) = \frac{1}{2^{nx}} \sum_{i=1}^{2^{nx}} A(x_i), \quad E(nx) = \frac{1}{2^{nx}} \sum_{i=1}^{2^{nx}} E(x_i), \quad nx = 0, 1, \dots \quad (5)$$

Длина  $l(nx)$  части реализации, по которой выполняется усреднение, равна  $l(nx) = \Delta x \cdot 2^{nx}$ .

Для оценки влияния облаков на поглощение солнечной радиации используется отношение [3]

$$r = \frac{CRF_S}{CRF_{TOA}}, \quad CRF_S = F_S^{\text{all}} - F_S^{\text{clr}}, \quad CRF_{TOA} = F_{TOA}^{\text{all}} - F_{TOA}^{\text{clr}}, \quad r = -\frac{1 - A_s}{s}, \quad (6)$$

где  $CRF_S$  и  $CRF_{TOA}$  обозначают радиационный форсинг облаков на уровне подстилающей поверхности ( $S$ ) и на верхней границе атмосферы ( $TOA$ ). Радиационный форсинг облаков определяется как разность между потоками излучения  $F$  для облачной атмосферы (all) и ясного неба (clr). Для описания поглощения облаками также используется наклон  $s$  линейной регрессии между альbedo и пропусканием [2], связанный с  $r$  выражением  $r = (1 - A_s)/s$ . В [2] без сколь угодно строгого обоснования утверждается, что наклон  $s$  является прямой мерой поглощения.

При нулевом альbedo  $A_s$  подстилающей поверхности отношение радиационных форсингов равно

$$r(nx) = \frac{1 - T(nx)}{R(nx)} = 1 + \frac{A(nx) + E(nx)}{R(nx)}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при произвольном значении  $nx$  отношение радиационных форсингов облаков зависит как от поглощения, так и от горизонтального переноса. Отношение  $r(nx)$  будет однозначно определять поглощение облаками только при  $nx > nx_*$ , где значение  $nx_*$  определяется из неравенства  $A(nx_*) \gg E(nx_*)$ .

Горизонтальный перенос  $E(nx)$  и отношение  $r(nx)$ , рассчитанные для различных значений альbedo однократного рассеяния, представлены на рис. 2. Видно, что  $r(nx)$  сильно зависит от числа пикселей и в общем случае *не является прямой мерой* поглощения облаками. Этот же вывод получен в [9], где проанализированы 4-летние глобальные данные о солнечных потоках, полученные с помощью спутниковых и наземных измерений. При  $nx > nx_* \approx 2^7$  горизонтальным переносом можно пренебречь, а  $r(nx)$  становится почти постоянным и действительно характеризует поглощение облаками. Таким образом, из-за горизонтального переноса излучения можно определить поглощение, усредненное по интервалам длиной  $l(2^7) \sim 6$  км и больше. Последнее означает, что реализацию длиной  $\sim 200$  км можно разбить на  $\sim 30$  непересекающихся интервалов и для каждого интервала можно найти среднее поглощение. Используя измерения полных потоков для *одного* спектрального интервала (ширина интервала не имеет значения), *невозможно* получить достоверные оценки поглощения, усредненного по интервалам меньшей длины, например  $\sim 1$  км и меньше. Другими словами, поглощение неоднородными слоистыми облаками может быть определено с *максимальным* пространственным разрешением  $\Delta l \sim 6$  км.

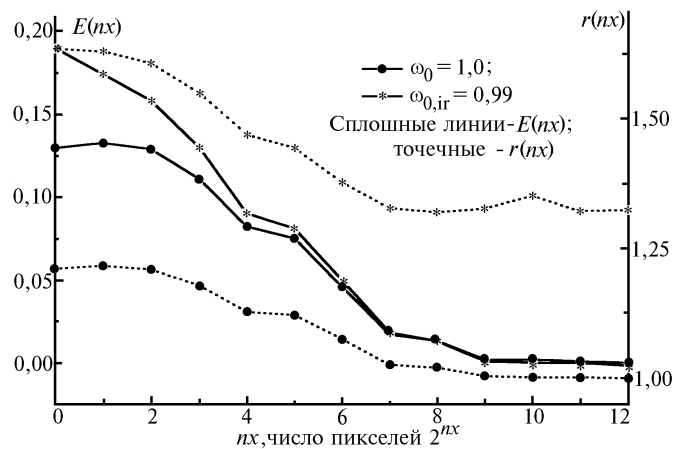


Рис. 2. Зависимость горизонтального переноса и отношения радиационных форсингов облаков от числа пикселей, по которым выполнено усреднение:  $\xi_{\odot} = 60^\circ$  и  $A_s = 0$  (океан)

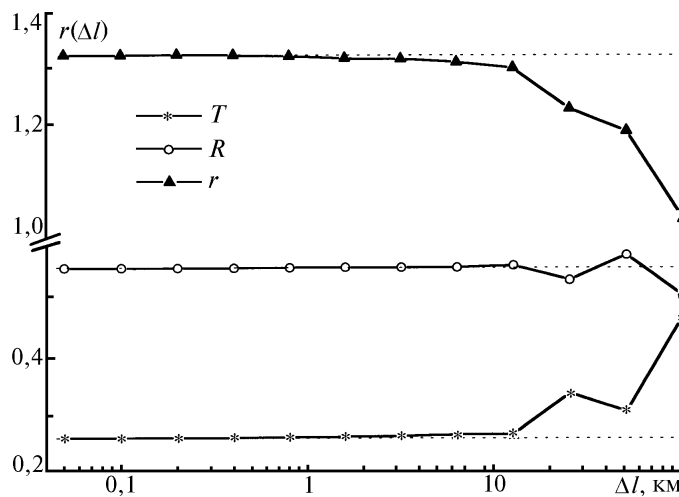


Рис. 3. Зависимость альbedo, пропускания и отношения радиационных форсингов облаков от пространственного разрешения:  $\xi_{\odot} = 60^\circ$ ,  $\omega_0 = 0,99$  и  $A_s = 0$  (океан)

При тестировании радиационных блоков моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) нужно измерить альbedo, пропускание и поглощение, усредненные по ячейке МОЦА. Использование набора приемников, которые расположены в пределах этой ячейки и измеряют одновременно, позволит устранить влияние зенитного угла Солнца и временной изменчивости облачного поля, например на пропускание. С каким минимальным пространственным разрешением  $\Delta l$

нужно измерять потоки радиации? Каково оптимальное количество приемников? Математическое моделирование позволяет ответить на эти вопросы. Рассчитаем средние (по реализации) альбедо и пропускание при различном разрешении  $\Delta l = 2^i \Delta x$ ,  $i = 0, \dots, nx - 1$  по формулам

$$R(\Delta l) = \frac{1}{2^{nx-i}} \sum_{j=1}^{2^{nx-i}} R_{n_{ij}}, \quad T(\Delta l) = \frac{1}{2^{nx-i}} \sum_{j=1}^{2^{nx-i}} T_{n_{ij}}, \quad n_{ij} = j2^i, \quad (8)$$

а отношение радиационных форсингов  $r(\Delta l) = [1 - T(\Delta l)]/R(\Delta l)$ . Согласно (8) при вычислении  $R(\Delta l)$  и  $T(\Delta l)$  используются все точки ( $i = 0$ ), точки с номерами 2, 4, 6, ...,  $2^{nx}$  ( $i = 1$ ) и т.д.

На рис. 3 представлены  $R(\Delta l)$ ,  $T(\Delta l)$  и  $r(\Delta l)$  как функции  $\Delta l$ . При длине реализации  $\sim 200$  км минимальное пространственное разрешение  $\Delta l \sim 10$  км, и для измерения пропускания нужно использовать  $\sim 20$  приемников. Важность этого результата состоит в том, что он наглядно иллюстрирует возможности математического моделирования при планировании дорогостоящих экспериментов.

**2.2. Измерения в видимой и ближней ИК-области спектра.** Предположим, что имеются синхронные измерения (над и под облаками) полных потоков излучения в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Отметим, что вместо ИК-области спектра могут быть использованы измерения полных потоков коротковолновой (0,3 – 4,0 мкм) радиации.

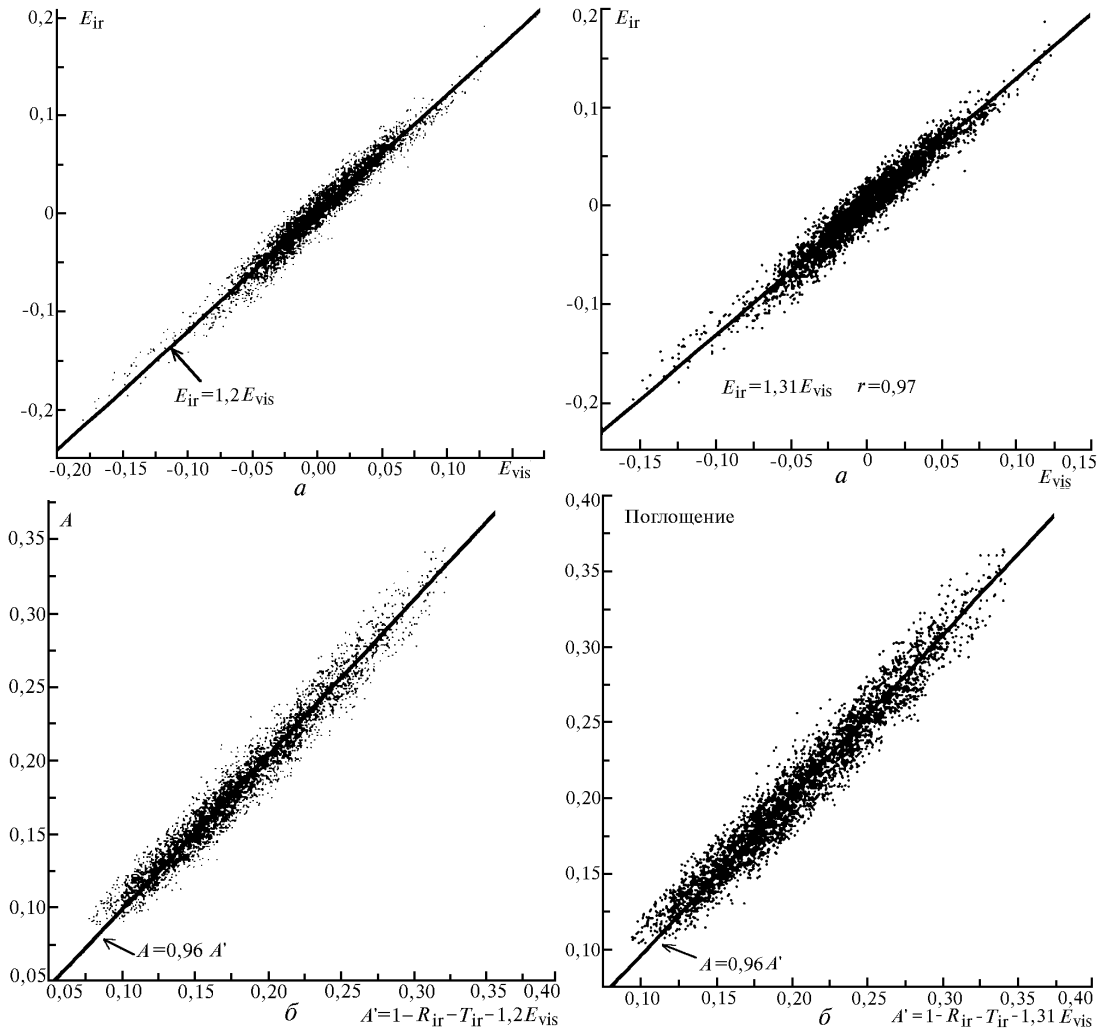


Рис. 4. Линейная регрессия между  $E_{ir}$  и  $E_{vis}$  и поглощение  $A$  как функция улучшенной оценки поглощения  $A'$  при  $\xi_{\odot} = 60^\circ$  и  $A_s = 0$  (океан)

Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но при  $A_s = 0,4$  (пустыня)

Из (4) следует, что для улучшения оценки поглощения нужно знать функцию  $E_{ir}(x,y) = f(E_{vis}(x,y))$ , которую можно найти с помощью моделирования. Используя линейную регрессию между  $E_{ir}$  и  $E_{vis}$ , получим  $E_{ir} = 1,2E_{vis}$  (рис. 4). Подставляя это соотношение в (4), получим улучшенную оценку поглощения  $A'$ , которая хорошо согласуется с реальным поглощением ( $\max |A - A'| \leq 0,05$ ). Из сравнения результатов, представленных на рис. 1 и 4, следует, что рассматриваемая простая схема «измерений» позволяет существенно улучшить оценку поглощения облаками. Этот вывод остается справедливым при других значениях альбедо подстилающей поверхности и зенитного угла Солнца (см. рис. 5 и 6).

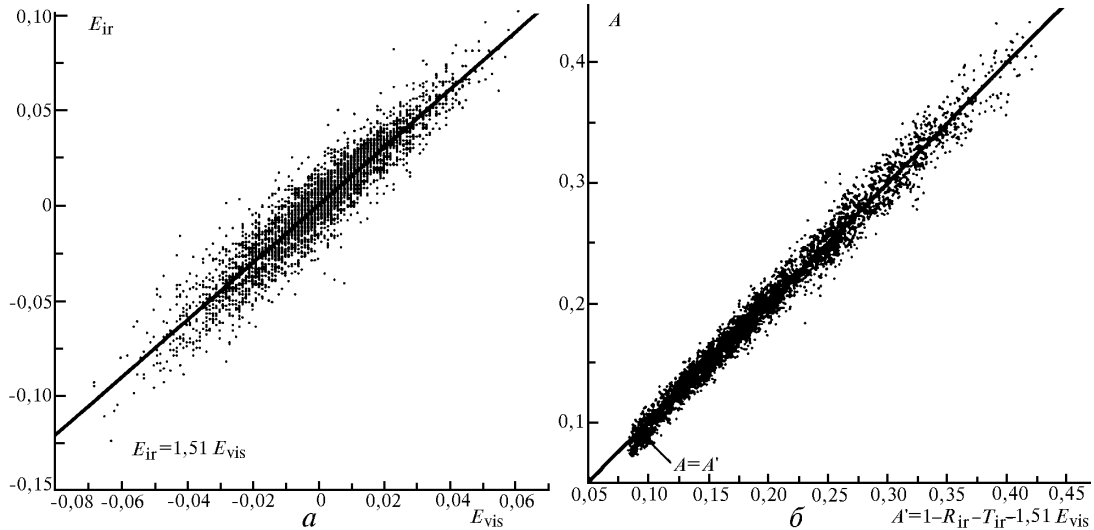


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но при  $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$

Важным преимуществом синхронных измерений в видимой и ближней ИК-области спектра является то, что они позволяют отказаться от усреднения и получить достоверные оценки поглощения с высоким пространственным разрешением. Использование этих измерений позволяет изучить мелкомасштабные ( $\sim 0,1$  км) флуктуации поглощения солнечной радиации неоднородными облаками.

На рис. 4–6 представлен парадоксальный, на первый взгляд, результат: горизонтальный перенос излучения при наличии поглощения  $|E_{ir}|$  может быть больше, чем при его отсутствии  $|E_{vis}|$ . Поскольку  $\langle E_{ir} \rangle = \langle E_{vis} \rangle = 0$ , то распределение  $E_{ir}$  шире, чем  $E_{vis}$  (рис. 7). Этот эффект можно объяснить следующим образом. Рассмотрим часть траектории фотона между  $n$ -м и  $n+2$  столкновениями. Пусть  $n$ -е и  $n+2$  столкновения принадлежат пикселю с номером  $i$ , а  $n+1$  столкновение принадлежит любому из пикселей с номерами  $i+1$  или  $i-1$ . Другими словами, фотон вышел из пикселя и после столкновения в соседнем пикселе вернулся. В случае чистого рассеяния статистический вес фотона, который пропорционален лучистой энергии, не изменяется при столкновении, поэтому такая часть траектории дает нулевой вклад в горизонтальный перенос. При наличии же поглощения каплями воды фотон выходит из пикселя с одним статистическим весом, а возвращается с меньшим и горизонтальный перенос не равен нулю. Это означает, что при наличии поглощения число траекторий, дающих вклад в  $E_{ir}$ , увеличивается и распределение  $E_{ir}$  уширяется. Если это объяснение является верным, то учет поглощения атмосферными газами должен привести к дополнительному уширению распределения  $E_{ir}$ .

### 3. Заключение

При определении поглощения как разности между потоками излучения, измеренными над и под облаками, горизонтальный перенос интерпретируется как кажущееся поглощение и является основным источником неопределенности. Наличие этого кажущегося поглощения как в *видимой*, так и ближней ИК-области спектра подтверждается натурными измерениями в разорванных слоисто-кучевых облаках [7]. Из-за горизонтального переноса излучения некоторые пиксели могут получить больше лучистой энергии от окружающих пикселей, чем погло-

щается внутри них. Такие пиксели имеют отрицательное восстановленное поглощение, которое было получено при интерпретации данных натуральных измерений [1, 6, 7].

Из отдельных измерений полных потоков излучения невозможно аккуратно оценить поглощение облаками. После усреднения измеренных полных потоков излучения по фрагментам реализации длиной  $\sim 6$  км и больше горизонтальным переносом радиации можно пренебречь и можно получить достоверные оценки среднего (по этому фрагменту) поглощения. Такое усреднение можно выполнить, если полные потоки измерены с гораздо более высоким пространственным разрешением ( $\sim 0,1$  км). Для оценки средних по реализации (длина  $\sim 200$  км) альbedo, пропускания и поглощения потоки солнечной радиации необходимо измерять с пространственным разрешением  $\sim 10$  км.

Используя одновременные измерения полных потоков в видимой и коротковолновой ( $0,4 - 4,0$  мкм) области спектра, а также линейную корреляцию между горизонтальным переносом  $E_{ir}$  коротковолновой и  $E_{vis}$  видимой радиации, удастся существенно улучшить оценку поглощения неоднородными облаками. В этом случае мы можем получить достоверные оценки поглощения с высоким пространственным разрешением и, следовательно, изучить изменчивость поглощения на малых ( $\sim 0,1$  км) масштабах. Одноточечное распределение  $E_{ir}$  шире, чем  $E_{vis}$ , коэффициент линейной регрессии между  $E_{ir}$  и  $E_{vis}$  больше 1. Это объясняется тем, что при наличии поглощения увеличивается число траекторий фотонов, дающих вклад в горизонтальный перенос радиации. Учет поглощения атмосферными газами и стохастических границ слоисто-кучевых облаков увеличит  $|E|$ , т.е. одноточечное распределение  $E$  станет еще более широким. По этой причине здесь мы рассмотрели минимальное влияние горизонтального переноса на точность определения поглощения облаками.

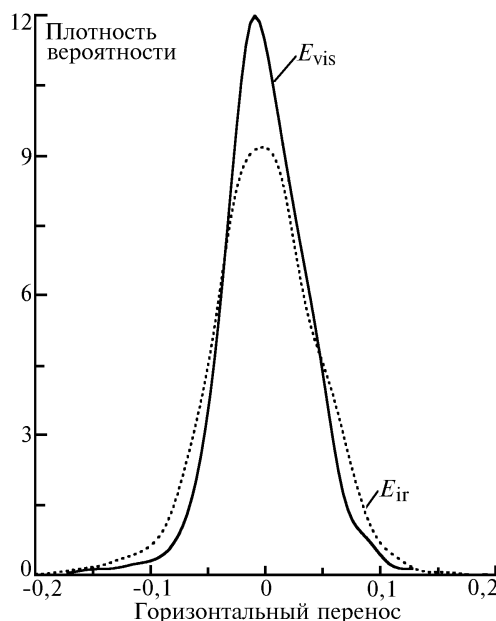


Рис. 7. Плотности вероятности горизонтального переноса при наличии и отсутствии поглощения:  $A_s = 0$  (океан) и зенитный угол Солнца  $\xi_{\odot} = 60^\circ$

На основе приведенных выше результатов можно сделать достаточно обоснованное предположение о том, что радиационные эффекты неоднородных облаков и прежде всего горизонтальный перенос радиации позволяют объяснить аномальное поглощение облаками. Основной причиной расхождений между теорией и экспериментом является некорректная интерпретация данных натуральных измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке DOE's ARM Program (контракт No. 350114-A-Q1) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 96-05-64275).

1. Stephens G. L. and Tsay Si-Chee // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1990. V. 116. P. 671-704.
2. Cess R. D. et al. // Science, 1995, V. 267. P. 496-499.
3. Ramanatan et al. // Science. 1995. V. 267. P. 499-503.

4. Титов Г. А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1297–1309.
5. Ackerman S. A. and Cox S. K. // J. Appl. Meteor. 1981. V. 20. P. 1510–1515.
6. Rawlins F. // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1989. V. 115. P. 365–382.
7. Hayasaka T., Kikuchi N., and Tanaka M. // J. Appl. Meteorol. 1995. V. 34. P. 1047–1055.
8. Hayasaka T., Nakajima T., Fujioshi Y., Ishizaka Y., Takeda T. and Tanaka M. // J. Appl. Meteorol. 1995. V. 34. P. 460–470.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
13 мая 1996 г.

**G. A. Titov. Radiation effects of inhomogeneous stratocumulus clouds. 2. Absorption.**

The influence of horizontal photon transport on the accuracy of absorption estimates as differences between the net fluxes measured above and below the clouds is studied. With such an absorption retrieval scheme, the horizontal transport is interpreted as apparent absorption, and is the main source of uncertainty.

If the measured net fluxes are averaged over intervals ~ 6 km or longer, the horizontal transport can be neglected, and reliable estimates of the average (over this interval) absorption can be obtained. Realization (~ 200 km length) average albedo, transmittance, and absorptance can be obtained, provided the interval between successive net flux measurements is no longer than ~ 10 km. Simultaneous net flux measurements of the visible and shortwave (0.4 – 4.0  $\mu\text{m}$ ) radiation allow one to substantially improve the absorption estimates and to study the variability of absorption at small (~ 1 km) scales.