

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.191-197

## ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ИК ДИАПАЗОНЕ

И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, К.Г. Орлов

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия  
e-mails: mingalev\_i@pgi.ru ; godograf87@mail.ru; orlov@pgia.ru

**Аннотация.** В работе представлены новый алгоритм построения параметризаций молекулярного поглощения в атмосфере Земли, который учитывает изменение газового состава атмосферы с высотой и имеет ряд других достоинств, а также построенная с помощью этого алгоритма параметризация в диапазоне частот от 10 до 2000  $\text{см}^{-1}$  в интервале высот от поверхности Земли до 76 км. Проведено сравнение результатов расчетов поля собственного излучения атмосферы Земли, выполненных с использованием этой параметризации, с результатами эталонных расчетов (Line-by-Line), которое показало, что представленная параметризация имеет хорошую точность в нижней и средней атмосфере как при отсутствии облаков, так и при наличии облачных слоев с большой оптической толщиной.

### Введение

Расчет поля собственного ИК-излучения атмосферы необходим в различных физических приложениях, в частности, для интерпретации данных дистанционного зондирования атмосферы, а также для расчета нагрева атмосферы собственным ИК-излучением при моделировании общей циркуляции атмосферы Земли. При этом возникает проблема скорости проведения таких расчетов. Для гарантированного достижения точности 1% и лучше при расчетах интенсивности излучения разрешение по частоте должно составлять примерно 0,001  $\text{см}^{-1}$ . Расчеты с таким высоким разрешением по частоте называются эталонными расчетами (Line-by-Line). Они требуют очень больших вычислительных затрат и по этой причине не могут использоваться в моделях общей циркуляции атмосферы в настоящее время и в обозримом будущем.

Для решения указанной проблемы разработаны методы быстрого расчета поля излучения. Основная идея этих методов состоит в том, что реальная зависимость коэффициента молекулярного поглощения от частоты заменяется на модельную зависимость, более удобную для расчетов. При этом узкие спектральные каналы по определенному алгоритму объединяются в группы, каждая из которых заменяется на один широкий модельный канал. В результате несколько миллионов узких спектральных каналов заменяются на несколько десятков или несколько сотен модельных каналов, для каждого из которых проводится численное решение уравнения переноса излучения. Процедуру построения указанных модельных каналов называют построением параметризации молекулярного поглощения. Для проверки точности построенной параметризации результаты расчета поля излучения в модельных каналах сравниваются с результатами эталонных расчетов. Отметим, что на высотах 0-70 км нужно учитывать изменение газового состава атмосферы с высотой. Ниже высоты 15 км вклад водяного пара в коэффициент молекулярного поглощения является существенным, а вклад озона мал. Выше высоты 20 км снижается роль водяного пара и возрастает вклад озона. Поэтому спектры поглощения на малых и больших высотах не коррелируют.

Одним из методов построения параметризации является метод k-корреляции [1-17], который, в свою очередь, является одним из вариантов метода лебеговского осреднения сечений поглощения по частоте [18]. Ранее было создано большое число различных параметризаций молекулярного поглощения в атмосфере Земли в частотном диапазоне 10-3000  $\text{см}^{-1}$ , которые содержат от нескольких десятков до 150-200 модельных каналов [5-17]. Общая особенность этих параметризаций заключается в том, что все они обеспечивают хорошую точность (в пределах 0,5 К/сутки) расчетов скоростей нагрева-выхолаживания атмосферы за счет собственного излучения на высотах тропосферы и нижней стратосферы (примерно, до 20 км). На высотах более 25 км точность этих параметризаций существенно ухудшается. Способ построения параметризации, предложенный в работе [13], обеспечивает наилучшую точность при заданном числе модельных каналов, но является достаточно трудоемким в реализации, поскольку требуется проводить большой объем подгоночных расчетов для каждого модельного канала.

В данной работе предложен новый алгоритм построения параметризации молекулярного поглощения, который отличается от метода k-корреляции, учитывает изменение газового состава атмосферы с высотой, не требует проводить подгоночные расчеты для каждого модельного канала и относительно прост в программной реализации по сравнению с другими алгоритмами. Созданная авторами программа,

реализующая этот алгоритм, позволяет менять число модельных каналов параметризации в широких пределах. Представлена построенная с помощью этой программы параметризация молекулярного поглощения в атмосфере Земли, которая обладает хорошей точностью в диапазоне высот 0-76 км, как при отсутствии облачных слоев, так и при их наличии.

Точность построенной параметризации проверялась с помощью эталонных расчетов, выполненных с разрешением по частоте  $0.001 \text{ см}^{-1}$ . Коэффициенты молекулярного поглощения атмосферных газов рассчитывались с использованием спектроскопической базы данных HITRAN 2012 [19] по стандартной теории, согласно которой суммируются вклады различных линий поглощения при обрезании крыльев линий на расстоянии  $25 \text{ см}^{-1}$  от центра линии, и с учетом континуального поглощения водяного пара и углекислого газа, которое было задано с помощью эмпирической модели MT CKD [20]. Для проверки точности авторы провели сравнение результатов этих расчетов с результатами эталонных расчетов, выполненных другими научными группами в рамках международного проекта Continual Intercomparison of Radiation Codes (CIRC, <https://circ.gsfc.nasa.gov>). Результаты совпали с высокой точностью, не хуже 1%.

### Алгоритм построения параметризации

Для построения параметризации весь участок спектра разбивается на интервалы шириной  $90\text{-}125 \text{ см}^{-1}$ , которые далее будем называть интервалами осреднения. В каждом интервале осреднения узкие спектральные каналы по различным алгоритмам объединяются в широкие модельные каналы, которые еще называют носителями резонансов [18]. Основная идея нового алгоритма состоит в том, чтобы построение модельных каналов проводить в два этапа. На первом этапе выбирается высота первой сортировки в диапазоне 5-17 км, чтобы учесть линии поглощения водяного пара. Все узкие каналы из интервала осреднения разбиваются на  $N_1$  групп так, чтобы коэффициенты молекулярного поглощения узких каналов внутри каждой группы были достаточно близки между собой на этой высоте, а также на высотах 0-20 км. На втором этапе выбирается высота второй сортировки в диапазоне 40-55 км, чтобы учесть линии поглощения озона. Каждая полученная после первой сортировки группа узких каналов разбивается на  $N_2$  подгрупп так, чтобы коэффициенты молекулярного поглощения узких каналов внутри каждой подгруппы были достаточно близки между собой на этой высоте и на высотах 0-76 км. Узкие каналы, вошедшие в одну подгруппу, объединяются в один модельный канал. В итоге получается  $N_1 N_2$  модельных каналов на один интервал осреднения.

Обозначим через  $T$  и  $P$  – температуру и давление атмосферного газа, через  $\nu$  – частоту, через  $h$  – высоту от поверхности Земли, через  $K^{mol}(T, P, \nu)$  – объемный коэффициент молекулярного поглощения атмосферного газа, который при заданном молекулярном составе этого газа является функцией температуры, давления и частоты, и который следует рассчитывать по стандартной теории с использованием спектроскопической базы данных HITRAN 2012 [19] и с учетом континуального поглощения водяного пара и углекислого газа, которое можно задать с помощью эмпирических моделей, например, MT CKD [20].

В данной работе использовался следующий алгоритм построения модельных каналов. Рассмотрим интервал осреднения  $[\nu_{min}, \nu_{max}]$  шириной от 50 до  $125 \text{ см}^{-1}$ , который разделим на узкие каналы с частотой  $\nu_i$  внутри которых оптические параметры можно считать постоянными. Затем выбираем некоторые средние зависимости температуры  $T(h)$ , давления  $P(h)$  атмосферного газа и парциальных давлений водяного пара  $P^{(H_2O)}(h)$  и озона  $P^{(O_3)}(h)$  от высоты. Далее строим сетку по высоте  $h_k$ , в которой нумерация начинается на верхней границе атмосферы, и сетку по давлению  $P_k = P(h_k)$ ,  $P_0 < \dots < P_k < P_{k+1} < \dots < P_{max}$ , и задаем значения среднего профиля температуры атмосферного газа в узлах этой сетки:  $T_{k,0} = T(h_k) = T(P_k)$ . Отметим, что выбор шагов сетки по давлению должен обеспечивать приемлемую точность интерполяции оптических параметров. Проведенные авторами расчеты показали, что для достижения хорошей точности достаточно использовать шаги сетки по высоте 200 м на высотах менее 10 км и 400 м на высотах более 10 км.

Для каждого узла сетки по давлению  $P_k$  строим равномерную сетку значений температуры с шагом  $\Delta T$  по формуле

$$T_{k,l} = T_{k,0} + l \cdot \Delta T, \quad l = -L, \dots, L, \quad (1)$$

причем шаг  $\Delta T$  и число  $L$  выбираются так, чтобы все возможные значения температуры атмосферного газа при давлении  $P_k$  попадали внутрь отрезка  $[T_{k,0} - L \cdot \Delta T, T_{k,0} + L \cdot \Delta T]$ , и чтобы обеспечивалась приемлемая точность интерполяции оптических параметров по температуре. Проведенные авторами расчеты показали, что для выполнения перечисленных условий в нижней и средней атмосфере достаточно взять  $\Delta T = 10 \text{ K}$  и  $L = 10$ . Если взять  $\Delta T = 5 \text{ K}$ , то точность интерполяции практически не меняется, а если взять  $\Delta T = 20 \text{ K}$ , то эта точность заметно ухудшается на высотах более 20 км. Для каждого узла сетки по давлению и температуре  $P_k, T_{k,i}$  вводится дополнительная сетка значений парциальных давлений водяного пара  $P_{k,l,n}^{(H_2O)}$  и озона  $P_{k,l,q}^{(O_3)}$ .

Сначала выбираем высоту первой сортировки  $h_{c1}$  в интервале от 5 до 15 км, на которой производится объединение узких каналов в группы, такие, что одинаковые оптические параметры вошедших в одну группу узких каналов близки между собой в нижней атмосфере. Проведенные расчеты показали, что наилучшая точность достигается при выборе  $h_{c1}$  в интервале от 10 до 15 км. На этой высоте для фиксированных значений

$P(h_{C1}), T(h_{C1}), P^{(H_2O)}(h_{C1}), P^{(O_3)}(h_{C1})$  рассчитываем минимальное и максимальное значения коэффициента молекулярного поглощения по всем узким каналам из интервала осреднения:  $K_{C1,\min} = \min_i K^{mol}(h_{C1}, \nu_i)$ ,  $K_{C1,\max} = \max_i K^{mol}(h_{C1}, \nu_i)$ . На отрезке  $[K_{C1,\min}, K_{C1,\max}]$  вводим сетку значений объемного коэффициента молекулярного поглощения, равномерную в логарифмическом масштабе и заданную следующими формулами

$$K_{C1,0} = K_{C1,\min}, K_{C1,N_1} = K_{C1,\max}, K_{C1,j} = (K_{C1,0})^{(1-j/N_1)} \cdot (K_{C1,N_1})^{(j/N_1)}. \quad (2)$$

Эта сетка делит отрезок на  $N_1$  частей. После построения этой сетки осуществляется сортировка узких каналов на группы, которые объединяются в широкие модельные каналы по следующему правилу. Все узкие каналы, для которых выполняется условие  $K^{mol}(h_{C1}, \nu_i) \in (K_{C1,j-1}, K_{C1,j}]$ , объединяются в группу с номером  $j$ . Обозначим через  $N_j$  – число узких каналов, вошедших в эту группу, а через  $\Omega_j = (i_{j,1}, \dots, i_{j,N_j})$  – список номеров этих узких каналов, записанных в порядке возрастания.

Далее выбираем высоту второй сортировки  $h_{C2}$  в интервале от 40 до 55 км, на которой производится объединение узких каналов в модельные каналы, такие, что одинаковые оптические параметры узких каналов, вошедших в один модельный канал, близки между собой не только в нижней, но и в средней атмосфере. Проведенные расчеты показали, что наилучшая точность достигается при выборе  $h_{C2}$  в интервале от 45 до 50 км. На этой высоте сортировки каждую группу узких каналов, полученную при первой сортировке, делим на подгруппы. Для фиксированных значений  $P(h_{C2}), T(h_{C2}), P^{(H_2O)}(h_{C2}), P^{(O_3)}(h_{C2})$  рассчитываем минимальное и максимальное значения коэффициента молекулярного поглощения по всем узким каналам, вошедшим в множество  $\Omega_j$ :  $K_{C2,\min}(j) = \min_{i \in \Omega_j} K^{mol}(h_{C2}, \nu_i)$ ,  $K_{C2,\max}(j) = \max_{i \in \Omega_j} K^{mol}(h_{C2}, \nu_i)$ . На отрезке  $[K_{C2,\min}, K_{C2,\max}]$  вводим сетку, равномерную в логарифмическом масштабе и заданную следующими формулами

$$K_{C2,j,0} = K_{C2,\min}(j), K_{C2,j,N_2} = K_{C2,\max}(j), K_{C2,j,m} = (K_{C2,j,0})^{(1-m/N_2)} \cdot (K_{C2,j,N_2})^{(m/N_2)}. \quad (3)$$

Эта сетка делит отрезок на  $N_2$  частей. После построения этой сетки все узкие каналы из множества  $\Omega_j$ , для которых выполняется условие  $K^{mol}(h_{C2}, \nu_i) \in (K_{C2,j,m-1}, K_{C2,j,m}]$ , объединяются в модельный канал с индексами  $j, m$ . Обозначим через  $N_{j,m}$  – число узких каналов, вошедших в эту модельный канал, а через  $\Omega_{j,m} = (i_{j,1}, \dots, i_{j,N_{j,m}})$  – список номеров этих узких каналов, записанных в порядке возрастания.

Для каждого узла сетки по давлению и температуре и каждого модельного канала с индексами  $j, m$  вычисляются средние значения функции Планка  $B(T, \nu)$  по формуле:

$$B_{j,m}^{mod}(T_{k,l}) = \frac{1}{N_{j,m}} \sum_{i \in \Omega_{j,m}} B(T_{k,l}, \nu_i), \quad (4)$$

объемного коэффициента поглощения (суммы молекулярного и аэрозольного):

$$K_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}) = \frac{1}{B_{j,m}^{mod}(T_{k,l}) \cdot N_{j,m}} \sum_{i \in \Omega_{j,m}} K(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}, \nu_i) \cdot B(T_{k,l}, \nu_i), \quad (5)$$

объемного коэффициента рассеяния (суммы молекулярного и аэрозольного):

$$\alpha_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}) = \frac{1}{B_{j,m}^{mod}(T_{k,l}) \cdot N_{j,m}} \sum_{i \in \Omega_{j,m}} \alpha(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}, \nu_i) \cdot B(T_{k,l}, \nu_i), \quad (6)$$

альбедо однократного рассеяния:

$$\omega_{j,m}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}) = \frac{\alpha_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)})}{K_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}) + \alpha_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)})}, \quad (7)$$

индикатриса рассеяния в модельном канале с индексами  $j, m$  вычисляется по формуле:

$$\chi_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}, u) = \frac{\sum_{i \in \Omega_{j,m}} \chi(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}, v_i, u) \alpha(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}, v_i) B(T_{k,l}, v_i)}{\alpha_{j,m}^{mod}(T_{k,l}, P_k, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}) \cdot B_{j,m}^{mod}(T_{k,l}) \cdot N_{j,m}} \quad (8)$$

На этом процесс объединения узких каналов в широкие модельные и процесс вычисления средних значений оптических характеристик в узлах сетки по давлению и температуре для широких модельных каналов выполнен. Таким образом, сотни тысяч узких спектральных каналов из интервала осреднения заменяются на десятки или сотни (в зависимости от требуемой точности и скорости расчетов) широких модельных каналов.

При моделировании общей циркуляции атмосферы необходимо рассчитывать поле излучения в модельных каналах для вертикальных распределений концентраций и температуры поглощающих газов и распределений аэрозольных частиц над каждым узлом пространственной сетки на поверхности Земли. Поскольку над каждым из этих узлов в заданный момент времени имеется свое вертикальное распределение концентраций и температуры поглощающих газов и распределений аэрозольных частиц, то для каждого из этих распределений необходимо быстро рассчитывать вертикальные профили оптических параметров для каждого модельного канала.

Для выполнения этих расчетов используется следующий прием. Каждый из пяти оптических параметров, заданных формулами (3)-(8), в любом модельном канале является функцией давления, температуры, и парциальных давлений газов, удельное содержание которых в воздухе существенно меняется с высотой. В нашем примере это парциальные давления водяного пара  $P^{(H_2O)}$  и озона  $P^{(O_3)}$ . Для каждого узла сетки по давлению и температуре  $P_k, T_{k,i}$  вводится дополнительная сетка значений парциальных давлений водяного пара  $P_{k,l,n}^{(H_2O)}$  и озона  $P_{k,l,q}^{(O_3)}$ . Значения каждого оптического параметра как функции  $f(P, T, P^{(H_2O)}, P^{(O_3)})$  рассчитываются в узлах этой сетки и хранятся в памяти компьютера. Для расчета значений этой функции между узлами сетки  $P_k, T_{k,i}, P_{k,l,n}^{(H_2O)}, P_{k,l,q}^{(O_3)}$  используется полилинейная интерполяция по четырем переменным. Шаги сетки по парциальным давлениям следует подбирать так, чтобы обеспечить нужную точность интерполяции при минимальном числе узлов сетки.

Описанная методика позволяет быстро рассчитывать оптические параметры в каждом модельном канале для произвольных вертикальных распределений концентраций и температуры поглощающих газов и распределений аэрозольных частиц. При этом необходимо хранить в оперативной памяти массивы значений всех оптических параметров в узлах сетки по температуре и давлению для каждого модельного канала.

## Результаты расчетов

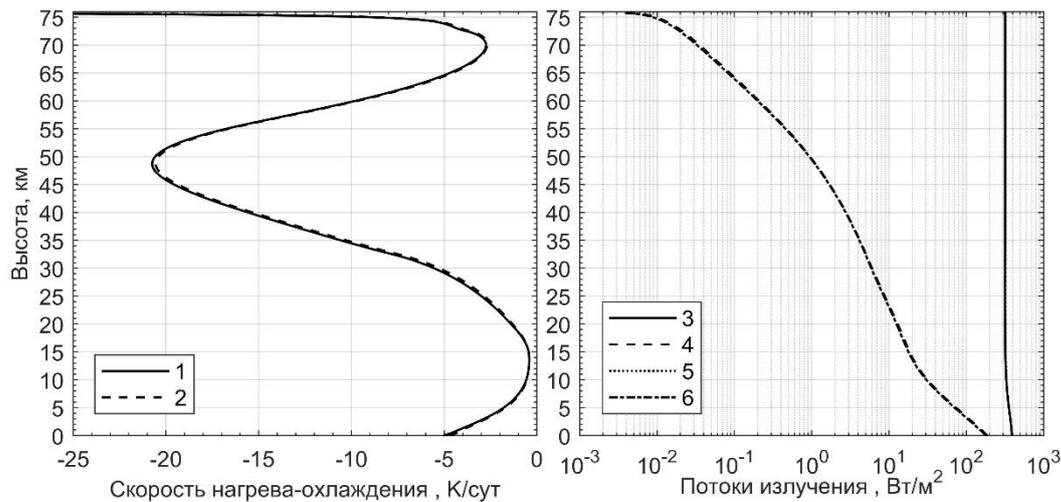
Авторами данной работы были проведены эталонные расчеты поля собственного излучения атмосферы Земли в приближении горизонтальной однородной атмосферы с разрешением по частоте  $0.001 \text{ см}^{-1}$  и расчеты этого поля, выполненные с использованием параметризаций оптических характеристик атмосферы Земли, в интервале высот от поверхности Земли до высоты 76 км. Расчеты проводились для различного числа модельных каналов, на разных высотах сортировки. Для численного решения уравнение переноса излучения применялся вариант метода дискретных ординат, детально описанный в работе [21]. В расчетах использовались равномерная сетка по высоте с шагом 200 метров и равномерная сетка по зенитным углам с шагом менее 9 градусов, учитывалось молекулярное и аэрозольное рассеяние [1-4, 22].

В расчетах использовались вертикальные профили температуры и концентраций основных атмосферных газов, рассчитанные по эмпирической модели NRLMSISE-00 для условий июля над северной Атлантикой на широте  $55^\circ$ , а также вертикальные профили объемных долей малых газовых составляющих, нормированный коэффициент экстинкции, альbedo однократного рассеяния и параметр асимметрии для аэрозольных частиц в облаках, построенные по экспериментальным данным, приведенным в монографии [1], а также приведенная в [23] зависимость от высоты коэффициента экстинкции в верхнем, среднем и нижнем облачных слоях при длине волны 0.5 мкм. Оптическая толщина облачных слоев была взята большой и близкой к максимально наблюдаемой для проверки точности параметризации. В атмосфере рассматриваются три типа фоновых аэрозолей: континентальные, морские и стратосферные аэрозоли. Оптические параметры этих аэрозолей взяты из работы [24].

Результаты эталонных расчетов сравнивались с результатами расчетов, в которых использовалась следующая параметризация. Весь диапазон  $10\text{-}2000 \text{ см}^{-1}$  делится на 4 части:  $10\text{-}500 \text{ см}^{-1}$ ,  $500\text{-}1000 \text{ см}^{-1}$ ,  $1000\text{-}1500 \text{ см}^{-1}$  и  $1500\text{-}2000 \text{ см}^{-1}$ . В диапазоне  $10\text{-}500 \text{ см}^{-1}$  использовались 5 интервалов осреднения  $10\text{-}100 \text{ см}^{-1}$ ,  $100\text{-}200 \text{ см}^{-1}$ ,  $200\text{-}300 \text{ см}^{-1}$ ,  $300\text{-}400 \text{ см}^{-1}$ ,  $400\text{-}500 \text{ см}^{-1}$ , на каждом из которых сначала выделялись 4 канала с помощью первой сортировки, которая проводилась на высоте 15 км, а затем в каждом из этих 4 каналов выделялись 8 подканалов с помощью второй сортировки, которая проводилась на высоте 50 км. Всего использовалось 160 модельных каналов в этом диапазоне. В диапазоне  $500\text{-}1000 \text{ см}^{-1}$  использовались 5 интервалов осреднения  $500\text{-}600 \text{ см}^{-1}$ ,  $600\text{-}700 \text{ см}^{-1}$ ,  $700\text{-}800 \text{ см}^{-1}$ ,  $800\text{-}900 \text{ см}^{-1}$ ,  $900\text{-}1000 \text{ см}^{-1}$ , на каждом из

которых сначала выделялись 4 канала с помощью первой сортировки, которая проводилась на высоте 15 км, а затем в каждом из этих 4 каналов выделялись 12 подканалов с помощью второй сортировки, которая проводилась на высоте 46 км. Всего в этом диапазоне использовалось 240 модельных каналов.

В диапазоне  $1000-1500\text{ см}^{-1}$  использовались 4 интервала осреднения  $1000-1125\text{ см}^{-1}$ ,  $1125-1250\text{ см}^{-1}$ ,  $1250-1375\text{ см}^{-1}$ ,  $1375-1500\text{ см}^{-1}$ , на каждом из которых сначала выделялись 4 канала с помощью первой сортировки, которая проводилась на высоте 15 км, а затем в каждом из этих 4 каналов выделялись 8 подканалов с помощью второй сортировки, которая проводилась на высоте 47 км. Всего использовалось 128 модельных каналов в этом диапазоне. В диапазоне  $1500-2000\text{ см}^{-1}$  использовались 4 интервала осреднения  $1500-1625\text{ см}^{-1}$ ,  $1625-1750\text{ см}^{-1}$ ,  $1750-1875\text{ см}^{-1}$ ,  $1875-2000\text{ см}^{-1}$ , на каждом из которых сначала выделялись 4 канала с помощью первой сортировки, которая проводилась на высоте 15 км, а затем в каждом из этих 4 каналов выделялись 6 подканалов с помощью второй сортировки, которая проводилась на высоте 50 км. Всего использовалось 96 модельных каналов в этом диапазоне. Таким образом, 199000 узких спектральных каналов, используемых при эталонных расчетах, заменяются на 528 модельных каналов.



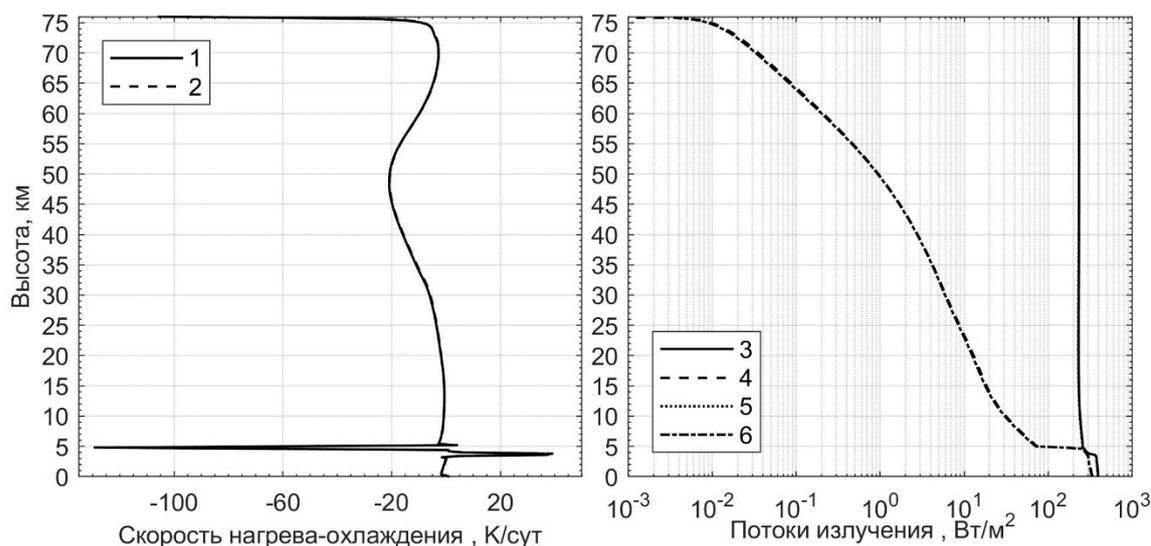
**Рисунок 1.** Поток восходящего и нисходящего собственного излучения в частотном диапазоне  $10-2000\text{ см}^{-1}$  и скорости нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет этих потоков в безоблачной атмосфере. *Кривая 1* - рассчитанная с использованием параметризации скорость нагрева-охлаждения, *кривая 2* - эта же скорость, полученная с помощью эталонных расчетов. *Кривые 3 и 4* - рассчитанные с использованием параметризации потоки восходящего и нисходящего собственного излучения, *кривые 5 и 6* - эти же потоки, полученные с помощью эталонных расчетов.

На рис. 1 представлены потоки восходящего и нисходящего собственного излучения в частотном диапазоне  $10-2000\text{ см}^{-1}$  в безоблачной атмосфере и скорости нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет этих потоков, полученные с помощью эталонных расчетов, а также с помощью расчетов, когда использовалась параметризация. Из рис. 2 видно, что скорость нагрева-охлаждения атмосферного газа, рассчитанная с использованием параметризации, очень близка к этой же скорости, полученной с помощью эталонных расчетов. Наибольшее отклонение между этими скоростями достигается на высоте 48 км и составляет около  $0.2\text{ К/сутки}$ . Поток восходящего и нисходящего излучения, рассчитанные с использованием параметризации, совпадают с этими же потоками, полученными с помощью эталонных расчетов, с относительной погрешностью меньше 1%.

На рис. 2 представлены те же самые профили, что и на рис. 1, только рассчитанные при наличии в интервале высот от 3 до 6 км среднего облачного слоя с большой оптической толщиной, параметры которого приведены в [23]. Этой толщиной обусловлены большие значения скорости нагрева-охлаждения воздуха внутри облачного слоя. На рис. 2 видно, что скорость нагрева-охлаждения атмосферного газа и восходящий и нисходящий потоки, рассчитанные с использованием параметризации и с помощью эталонных расчетов совпадают с хорошей точностью. Отклонение между потоками, полученными при эталонных расчетах и при расчетах с использованием параметризации, вне и внутри облачного слоя меньше 1%, а отклонение между скоростями нагрева не превышает  $0.2\text{ К/сутки}$  вне облачного слоя и  $0.5\text{ К/сутки}$  внутри этого слоя. В случаях наличия нижнего или верхнего облачных слоев с большой оптической толщиной точность параметризации оказалась такой же.

Авторы исследовали влияние высот первой и второй сортировки на точность параметризации. Высоту первой сортировки меняли в пределах от 5 до 20 км. Оказалось, что высота 15 км близка к оптимальной. При

выборе другой высоты первой сортировки точность параметризации при сохранении числа модельных каналов не улучшается. Высоту второй сортировки также меняли в широких пределах от 35 до 60 км. Оказалось, что высота выбранные в представленной параметризации высоты второй сортировки близки к оптимальным. Их изменение не улучшало точность параметризации. Также результаты расчетов показали, что при увеличении числа модельных каналов по сравнению с их числом в представленной параметризации точность параметризации улучшается незначительно, а при уменьшении этого числа эта точность ухудшается более существенно. Ширина интервалов осреднения в диапазоне 100-125 см<sup>-1</sup> является оптимальной.



**Рисунок 2.** Потоки восходящего и нисходящего собственного излучения в частотном диапазоне 10-2000 см<sup>-1</sup> и скорости нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет этих потоков при наличии среднего облачного слоя с большой оптической толщиной. *Кривая 1* - рассчитанная с использованием параметризации скорости нагрева-охлаждения, *кривая 2* - эта же скорость, полученная с помощью эталонных расчетов. *Кривые 3 и 4* - рассчитанная с использованием параметризации потоки восходящего и нисходящего собственного излучения, *кривые 5 и 6* - эти же потоки, полученные с помощью эталонных расчетов.

### Закключение

Результаты расчетов показали, что в диапазоне высот 0-75 км как в безоблачной атмосфере, так и при наличии облачных слоев с большой оптической толщиной в частотном интервале от 10 до 2000 см<sup>-1</sup> потоки восходящего и нисходящего собственного излучения, полученные с помощью эталонных расчетов, и скорости нагрева атмосферного газа за счет этих потоков мало отличаются от этих же потоков и скоростей нагрева, полученных с помощью расчетов, в которых используется описанная в данной работе параметризация. В частности, отклонение между скоростями нагрева не превышает 0.2 К/сутки вне облачных слоев и 0.5 К/сутки внутри облачных слоев с большой оптической толщиной, что говорит о хорошей точности предложенной параметризации. Оказалось, что учет фоновых атмосферных аэрозолей незначительно влияет (не более 0,5 К/сут) на скорость нагрева-охлаждения воздуха за счет переноса излучения в интервале частот от 10 до 2000 см<sup>-1</sup> на высотах менее 3 км и практически не влияет на высотах более 3 км. При отсутствии облаков учет молекулярного рассеяния в дальнем ИК диапазоне слабо влияет на потоки излучения и нагрев атмосферного газа. Предложенный алгоритм построения параметризации учитывает изменение газового состава атмосферы с высотой, обеспечивает хорошую точность, не требует проведения подгоночных расчетов для каждого модельного канала, относительно прост в программной реализации и позволяет менять число модельных каналов параметризации в широких пределах.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Б.А. Фомину за полезные советы и помощь в работе.

### Литература

1. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб: Наука, 2003. 474 с.
2. Кондратьев К.Я. Актинометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 692 с.
3. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 376 с.
4. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 661с.

5. Творогов С.Д. Некоторые аспекты задачи о представлении функции поглощения рядом экспонент // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 3. С. 315-326.
6. Творогов С.Д., Несмелова Л.И. О некоторых применениях рядов экспонент для вычисления функции поглощения // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 8. С. 1141-1144.
7. Творогов С.Д., Несмелова Л.И., Родимова О.Б. Представление функций пропускания рядами экспонент // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 3. С. 373-377.
8. Творогов С.Д., Несмелова Л.И., Родимова О.Б. Расчет функций пропускания в ближней ИК-области спектра с помощью рядов экспонент // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10, № 12. С. 1475-1480.
9. Творогов С.Д., Несмелова Л.И., Родимова О.Б. К вопросу об уточнении интегрирования по частоте при вычислении радиационных характеристик // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 9. С. 832-834.
10. Творогов С.Д. Применение рядов экспонент для интегрирования уравнения переноса излучения по частоте // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 9. С. 763-766.
11. Творогов С.Д. О построении ряда экспонент непосредственно по информации о функции пропускания // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 9. С. 736-739.
12. Творогов С.Д., Родимова О.Б. Расчет функций пропускания при малых давлениях // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 915-921.
13. Фомин В.А. Метод параметризации газового поглощения атмосферной радиации, позволяющий получить К-распределение с минимальным числом членов // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 3. С. 268-271.
14. Fomin V.A. A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 1. FKDM, fast k-distribution model for the longwave // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109, D02110.
15. Fomin V.A., Correa P.M. A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 2. FKDM, fast k-distribution model for the shortwave // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110, D02106.
16. Mlawer E.J., et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, No. D14, P. 16,663-16,682.
17. Hogan R.J. The Full-Spectrum Correlated-k Method for Longwave Atmospheric Radiative Transfer Using an Effective Planck Function // J. Atmos. Sciences. 2010.
18. Шильков А.В., Герцев М.Н. Верификация метода лебеговского осреднения // Мат. моделирование. 2015. Т. 27, № 8. С.13–31.
19. Rothman L.S., et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 2013. Vol. 130, P. 4-50.
20. Mlawer E.J., et al. Development and recent evaluation of the MT CKD model of continuum absorption. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2012, Vol. 370, pp. 2520-2556.
21. Игнатъев Н.И., Мингалев И.В., Родин А.В., Федотова Е.А. Новый вариант метода дискретных ординат для расчета собственного излучения в горизонтально однородной атмосфере // ЖВМ и МФ, 2015, т. 55, № 10, с. 109–123.
22. Fomin V.A. Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 1995. V. 53. P. 663-669.
23. Мингалев И.В., Федотова Е.А., Орлов К.Г. Влияние оптически толстых слоев на нагрев атмосферы собственным излучением // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 5, с. 100–108.
24. McClatchey R.A., Bolle H.-J., Kondratyev K.Ya. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation // World Climate Research Programme. International Association For Meteorology And Atmospheric Physics, Radiation Commission. 1986. WCP 112, WMO/TD-No. 24. 60 p.