

*А. И. Захаров, Е. С. Кувалкин*

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗАТУХАНИЯ РАДИОСИГНАЛА В АТМОСФЕРНЫХ ГАЗАХ ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

18

*Статья посвящена программной реализации метода расчета затухания радиосигнала в атмосферных газах, предложенного Международным союзом электросвязи. Приведены алгоритм расчета затухания, реализованный в программном продукте MATLAB, и результаты расчета затухания для области широт более 45°.*

*The authors study the application of calculation method of radio signal attenuation in atmospheric gases, proposed by International Telecommunication Union [1]. The paper describes the algorithm of attenuation calculation, created in MATLAB program and calculated resulting attenuation for latitudes are greater than 45°.*

**Ключевые слова:** затухание в атмосферных газах, спутниковая связь, радиосвязь.

**Keywords:** attenuation in atmospheric gases, satellite communication, radio communication.

### Введение

Проектирование трасс радиосвязи неразрывно связано с оценкой потерь при распространении радиоволн, являющихся суммой действия различных факторов: затухания в атмосферных газах, дожде и других осадках, облаках, мерцания и многолучевости. Данная статья посвящена созданию алгоритма расчета затухания в атмосферных газах для дальнейшего применения при проектировании трасс радиосвязи с микроспутниками. Оценка затухания в атмосферных газах может производиться различными методами, один из которых – суммирование индивидуальных линий поглощения, как включающих суммирование резонансных линий кислорода и водяного пара, так и учитывающих нерезонансный спектр поглощения кислородом, водяным паром, а также молекулами азота при определенном давлении на частотах, превышающих 100 ГГц. Такой метод позволяет оценить затухание, обусловленное влиянием атмосферных газов на распространение радиоволны, для частот от 1 до 1000 ГГц.

**Цель работы:** создание алгоритма на основе метода оценки затухания, вызванного атмосферными газами, на примере широт более 45° и анализ полученных результатов.

В исследовании применяются методы послойного разбиения атмосферы на слои с последующим определением необходимых для расчета параметров (раздел 1), расчета погонного затухания в атмосферных



газах (раздел 2) и оценки суммарного затухания на трассе связи (раздел 3), приводятся созданный алгоритм и расчет для получения данных о затухании (раздел 4).

## 1. Определение параметров слоев атмосферы

Рассматриваемый метод расчета ослабления сигнала в атмосферных газах предложен Международным союзом электросвязи (МСЭ) [1] и основан на работах [2–4].

Суть метода заключается в послойном разбиении атмосферы на слои с определенными атмосферными параметрами: абсолютная температура  $T$  (К), давление сухого воздуха  $p$  (гПа), парциальное давление водяного пара  $p_{\text{водяной пар}}$  (гПа) и индекс рефракции  $n$ .

19

Важный аспект — это то, что трасса распространения сигнала не является абсолютно прямой, а испытывает некоторые преломления, которые можно описать, используя индексы рефракции  $n$  для каждого слоя и рассматривая преломление трассы на границе раздела слоев.

Таким образом, задача оценки затухания, вносимого атмосферными газами, сводится к нахождению погонного затухания и длины трассы в каждом отдельном слое, вычислению затухания, испытываемого радиосигналом при прохождении через данный слой, и последующему суммированию найденных воздействий.

Толщина слоев определяется экспоненциальной зависимостью с 10 см на уровне Земли до 1 км на высоте 100 км [5]. Такой способ разбиения ведет к минимизации ошибок в расчете общей протяженности трассы [5]. Толщина  $i$ -го слоя  $\delta_i$  вычисляется по формуле [1]

$$\delta_i = 0,0001 \cdot e^{\frac{i-1}{100}}, \text{ км.} \quad (1)$$

Высота, в пределах которой будет выполнен расчет, определяется количеством слоев. Рекомендуется проводить анализ в пределах от 30 до 100 км (802 и 922 слоя соответственно) [1].

Для определения таких параметров атмосферы, как  $T$ ,  $p$ ,  $p_{\text{водяной пар}}$ , существуют приближенные эмпирические формулы [6], позволяющие вычислить необходимые значения для различных широт (низких, средних, высоких) и времен года (зима, лето).

Данные о температуре и давлении также позволяют определить индекс рефракции радиоволн (radio refractive index)  $n$  в соответствующем слое атмосферы по следующей формуле [7]:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $N$  — рефракция радиоволн (radio refractivity), которая определяется по эмпирической формуле, полученной в работе [8]:

$$N = 77,6 \frac{p}{T} + 72 \frac{p_{\text{водяной пар}}}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{p_{\text{водяной пар}}}{T^2}. \quad (3)$$



## 2. Расчет погонного затухания для полученных условий окружающей среды

Погонное затухание в атмосферных газах обусловлено влиянием кислорода, азота (так называемого сухого воздуха) и водяного пара на распространение радиоволн. Исходя из этого, погонное затухание можно определить следующим образом [1]:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w, \text{ дБ/км}, \quad (4)$$

где  $\gamma_o$  и  $\gamma_w$  — погонные затухания в сухом воздухе и водяном паре соответственно.

Данную формулу можно видоизменить [1]:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 f \left( N''_{\text{кислород}}(f) + N''_{\text{водяной пар}}(f) \right), \quad (5)$$

где  $f$  — частота, для которой производится оценка затухания (ГГц);  $N''_{\text{кислород}}(f)$ ,  $N''_{\text{водяной пар}}(f)$  — мнимые части частотно-зависимых комплексных рефракций.

Таким образом, для оценки затухания в атмосферных газах первоочередную роль играет нахождение  $N''_{\text{кислород}}(f)$  и  $N''_{\text{водяной пар}}(f)$ . Для определения данных зависимостей применяется способ, основанный на вычислении интенсивностей спектральных линий  $S_i$  и их коэффициентов формы  $F_i$  для каждой спектральной линии кислорода и водяного пара соответственно [1].

Используются коэффициенты  $a_{1..6}$  и  $b_{1..6}$ , рассчитанные с учетом спектроскопических данных и приведенные в работе [2], и частоты центров спектральных линий  $f_i$ . Каждой резонансной линии соответствует ее частота  $f_i$  и набор из шести коэффициентов:  $a_{1..6}$  для кислорода и  $b_{1..6}$  для водяного пара.

Интенсивность спектральных линий  $S_i$  для кислорода и водяного пара может быть вычислена по формулам [1]

$$S_{i \text{ (кислород)}} = a_1 \cdot 10^{-7} p \theta^3 e^{a_2(1-\theta)}, \quad (6)$$

$$S_{i \text{ (водяной пар)}} = b_1 \cdot 10^{-1} p_{\text{водяной пар}} \theta^{3,5} e^{b_2(1-\theta)}, \quad (7)$$

где  $\theta = \frac{300}{T}$ .

Коэффициенты формы спектральных линий кислорода находятся по формуле [1]

$$F_{i \text{ (кислород)}} = \frac{f}{f_i} \left( \frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right). \quad (8)$$

В данном выражении также присутствуют такие величины, как ширина спектральной линии  $\Delta f$  и поправочный коэффициент  $\delta$  (в литера-



туре упоминается как коэффициент смещения линий [9]), учитывающий интерференцию спектральных линий кислорода. Данные величины вычисляются согласно следующим выражениям [1]:

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} \left( p\theta^{(0,8-a_4)} + 1,1 p_{\text{водяной пар}} \theta \right), \quad (9)$$

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) \cdot 10^{-4} \left( p + p_{\text{водяной пар}} \right) \theta^{0,8}. \quad (10)$$

Из-за происходящего зеемановского расщепления ширина спектральных линий кислорода изменяется. Данное явление учитывается с помощью выражения [1]

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \cdot 10^{-6}}. \quad (11)$$

Коэффициенты формы спектральных линий водяного пара определяются следующим выражением [1]:

$$F_i (\text{водяной пар}) = \frac{f}{f_i} \left( \frac{\Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right). \quad (12)$$

Ширина спектральной линии водяного пара [1]:

$$\Delta f = b_3 \cdot 10^{-4} \left( p\theta^{b_4} + b_5 p_{\text{водяной пар}} \theta^{b_6} \right). \quad (13)$$

Доплеровское расширение линий водяного пара влияет на ширину его спектральных линий [1]:

$$\Delta f = 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \cdot 10^{-12} f_i^2}{\theta}}. \quad (14)$$

При расчете  $N''_{\text{кислород}}(f)$  необходимо учесть влияние азота на затухание при определенном давлении и частотах выше 100 ГГц, а также существование нерезонансного (дебаевского) спектра кислорода на частотах ниже 10 ГГц. С данной целью вводится понятие полосы непрерывного поглощения в сухом воздухе, которая определяется следующим соотношением [1]:

$$N''_D(f) = f p \theta^2 \left( \frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{d \left[ 1 + \left( \frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \cdot 10^{-5} f^{1,5}} \right), \quad (15)$$

где  $d$  – ширина дебаевского спектра:

$$d = 5,6 \cdot 10^{-4} \left( p + p_{\text{водяной пар}} \right) \theta^{0,8}. \quad (16)$$

Таким образом, мнимые части комплексных частотно-зависимых рефракций являются суммой произведений интенсивностей спектральных линий  $S_i$  и их коэффициентов формы  $F_i$  для каждой спектральной линии кислорода и водяного пара с добавлением полосы непрерывного поглощения в сухом воздухе для кислорода:

$$N''_{\text{кислород}}(f) = \sum_{i (\text{кислород})} S_i F_i + N''_D(f), \quad (17)$$

$$N''_{\text{водяной пар}}(f) = \sum_{i (\text{водяной пар})} S_i F_i. \quad (18)$$

### 3. Оценка затухания на наклонной трассе

Для расчета длины участка трассы в каждом конкретном слое используется закон Снеллиуса. Чтобы упростить описания, трасса связи представляется как луч, который испытывает преломления на границе раздела слоев (рис. 1).

22

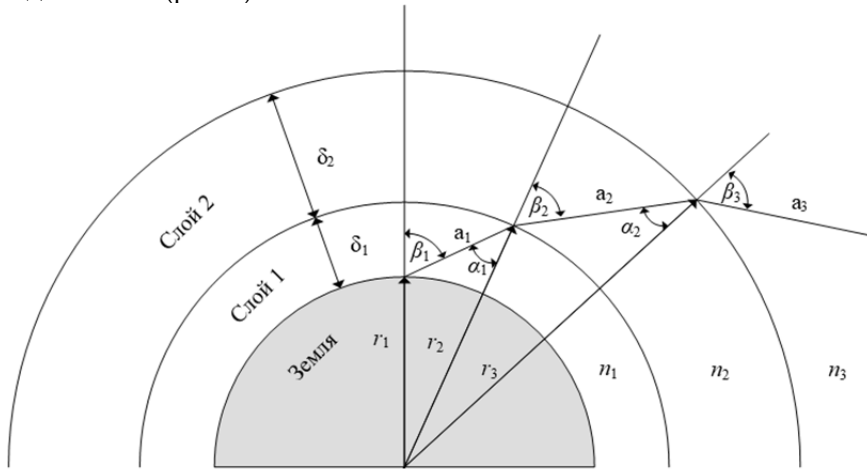


Рис. 1. Трасса, проходящая через атмосферу

Начало луча лежит в первом слое, в котором он отклоняется от нормали на угол  $\beta_1$  — угол падения на земную станцию, являющийся дополнением угла места  $\varphi$ . В данном слое луч проходит путь  $a_1$  и падает на следующий слой под углом падения  $\alpha_1$ , преломляется и преодолевает границу раздела, отклоняясь от нормали на угол выхода  $\beta_2$ . Данная последовательность повторяется для каждого слоя.

Соответственно, длина трассы в  $i$ -м слое определяется следующим выражением [1]:

$$a_i = -r_i \cos \beta_i + \frac{1}{2} \sqrt{4r_i^2 \cos^2 \beta_i + 8r_i \delta_i + 4\delta_i^2}, \quad (19)$$

где  $r_i$  — радиус от центра Земли до начала слоя  $i$ ;  $\delta_i$  — толщина данного слоя.

Угол падения на слой [1]:

$$\alpha_i = \pi - \arccos \left( \frac{-a_i^2 - 2r_i \delta_i - \delta_i^2}{2a_i r_i + 2a_i \delta_i} \right). \quad (20)$$

Угол выхода в следующем слое с помощью закона Снеллиуса выражается как [1]

$$\beta_{i+1} = \arcsin \left( \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin(\alpha_i) \right), \quad (21)$$

где  $n_i, n_{i+1}$  — индексы рефракции.



Таким образом, суммарное затухание на трассе равно сумме затуханий в различных слоях:

$$A = \sum_i a_i \gamma_i, \text{ дБ}, \quad (22)$$

где  $\gamma_i$  – погонное затухание  $i$ -го слоя, рассчитанное по формуле (5).

#### 4. Оценка затухания в атмосферных газах в области высоких широт

Приведенная методика оценки затухания в атмосферных газах применена в программном продукте *MATLAB* для формирования массива данных зависимости затухания на трассе от частоты радиосигнала в области широт более 45°.

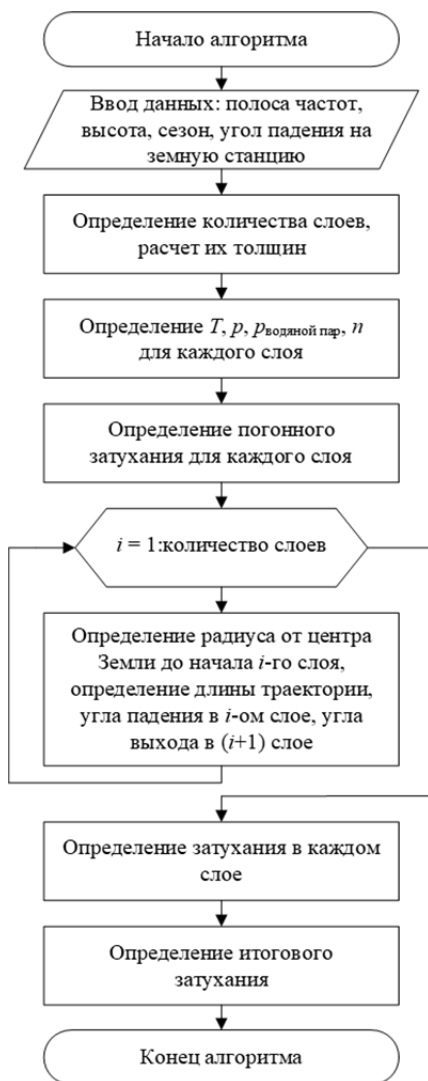


Рис. 2. Структурная схема алгоритма, реализованного в среде *MATLAB*



Во входных данных алгоритма (рис. 2) задается полоса частот, для которой будет проводиться анализ: шаг между частотами, верхняя и нижняя границы. Максимальная высота суммирования напрямую определяет, сколько будет создано слоев в диапазоне от 30 до 100 км. Задание сезона позволяет установить атмосферные параметры слоев в соответствии с рекомендациями МСЭ [6; 7]. Угол падения на земную станцию как дополнение угла места является характеристикой трассы, влияющей на ее отклонение от нормали.

В алгоритме определяется количество слоев, соответствующее заданной высоте, производится расчет атмосферных параметров и индекса рефракции для каждого слоя. На основе полученных данных, а также угла падения на земную станцию происходит расчет погонного затухания и длины траектории в отдельных слоях, после чего рассчитывается итоговая зависимость затухания в атмосферных газах от частоты возникающего на трассе связи.

Для определения зависимости затухания в атмосферных газах от частоты и от угла падения на земную станцию расчет затухания был проведен для различных значений  $\beta_1$ . Полученная зависимость представлена на рисунке 3.

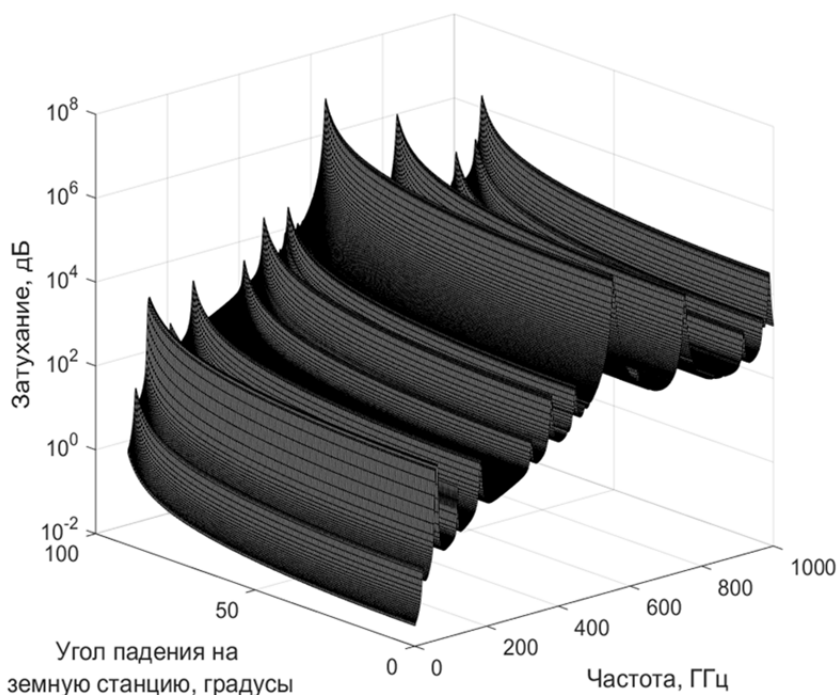


Рис. 3. Зависимость затухания от  $f$  и  $\beta_1$ , летний сезон,  $h = 100$  км



На рисунках 4 и 5 представлены семейства кривых, образующих данную поверхность в различных плоскостях, параллельных оси угла падения и оси частот соответственно.

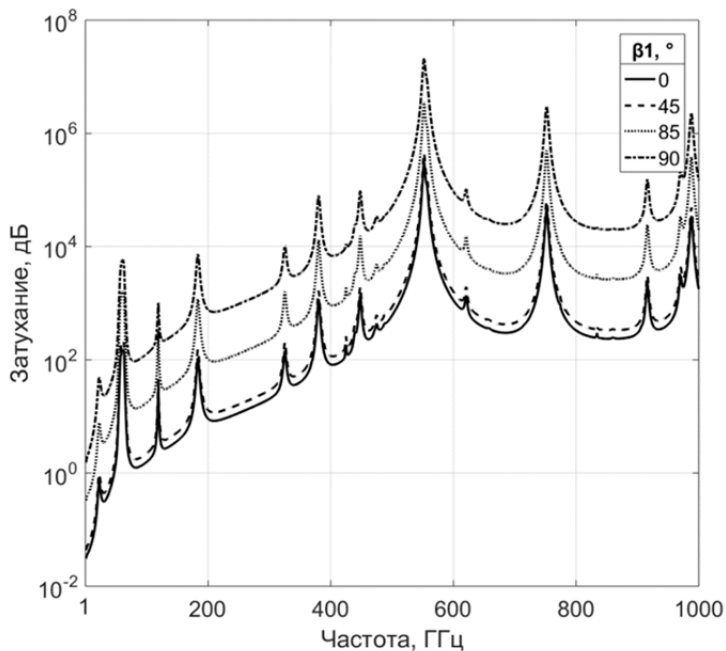


Рис. 4. Зависимость затухания от частоты, летний сезон,  $h = 100$  км

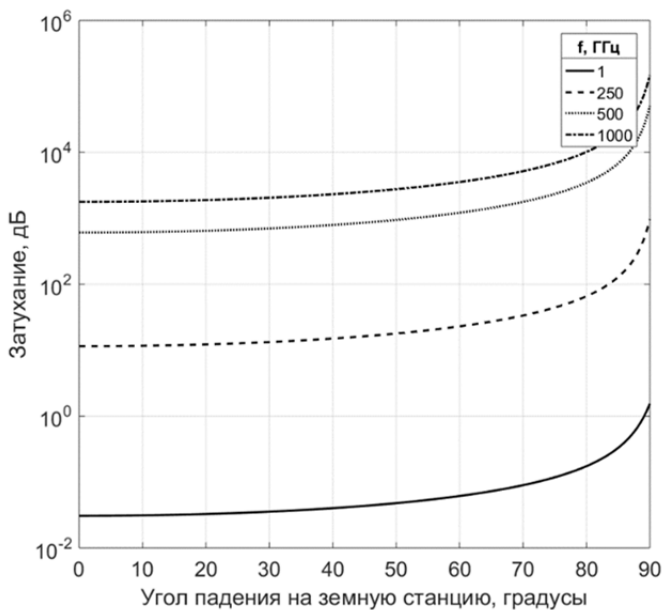


Рис. 5. Зависимость затухания от  $\beta_1$ , летний сезон,  $h = 100$  км





На рисунке 4 можно увидеть, что наиболее резкие пики затухания приходятся на частоты в районе 60, 552 и 752 ГГц. Можно отметить, что в целом с увеличением частоты радиоволн затухание также увеличивается. Таким образом, для связи с микроспутником целесообразно использовать диапазоны частот менее 47 ГГц, для которых затухание в атмосферных газах минимально.

На рисунке 5 прослеживается зависимость затухания от угла падения на земную станцию. При значениях  $\beta_1$  от 0 до 60° зависимости практически линейны. Затухание при  $\beta_1 = 0^\circ$  приблизительно в два раза меньше затухания при  $\beta_1 = 60^\circ$  (табл.). Далее наблюдается значительное возрастание значений затухания по нелинейному закону.

26

#### Значения затухания

Затухание	$\beta_1 = 0^\circ$	$\beta_1 = 60^\circ$
При $f = 1$ ГГц, дБ	0,0308	0,0614
При $f = 250$ ГГц, дБ	11,49	22,96
При $f = 500$ ГГц, дБ	606,9	1213
При $f = 1000$ ГГц, дБ	1775	3574

#### Заключение

В данной работе рассмотрена методика оценки возникающего в атмосферных газах затухания радиосигнала на наклонной трассе, основанная на послойном разделении атмосферы с вычислением затухания в каждом слое и последующим их суммированием. На основе этого метода в программном пакете *MATLAB* создан алгоритм расчета, позволяющий в широком диапазоне частот определить зависимость затухания в атмосферных газах от частоты радиосигнала в области широт выше 45°. Приведены результаты расчетов, полученных с помощью алгоритма.

#### Список литературы

1. *Затухание в атмосферных газах* : рекомендация МСЭ-R P.676-11 (09/2016).
2. Liebe H. J., Hufford G. A., Cotton M. G. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies Below 1000 GHz // AGARD Conference Proceedings. 1993. № 542 : Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation. P. 3-1-3-11.
3. Rosenkranz P. W. Water Vapor Microwave Continuum Absorption: A Comparison of Measurements and Models // Radio Sci. 1998. Vol. 33, iss. 4. P. 919—928.
4. Rosenkranz P. W. Correction to [Water Vapor Microwave Continuum Absorption: A Comparison of Measurements and Models] // Radio Sci. 1999. Vol. 34, iss. 4. P. 1025.
5. *Справочник по радиометеорологии*. Женева, 2013.
6. *Reference Standard Atmospheres* : recommendation ITU-R P.835-6 (12/2017).
7. *The Radio Refractive Index: its Formula and Refractivity Data* : recommendation ITU-R P.453-13 (12/2017).
8. Smith E. K., Weintraub S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // Proc. I. R. E. 1953. Vol. 41. P. 1035—1037.



9. Cadeddu M.P., Payne V.H., Clough S.A. *et al.* Effect of the Oxygen Line-Parameter Modeling on Temperature and Humidity Retrievals from Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. Vol. 45, iss. 7. P. 2216–2223.

#### Об авторах

Артем Игоревич Захаров — ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Евгений Сергеевич Кувалкин — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: EKuvalkin@stud.kantiana.ru

27

#### The authors

Artyom I. Zhaharov, Assistant, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Evgenii S. Kuvalkin, Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: EKuvalkin@stud.kantiana.ru