

С. В. Молчанов, А. С. Яковлев, А. Н. Алещенко, А. И. Иванов

ПРИМЕНЕНИЕ ОРБИТАЛЬНО-УГЛОВОГО МОМЕНТА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Изучена возможность модернизации атмосферного оптического канала применением системы ММО с орбитально-угловыми модами излучения. Произведена оценка повышения производительности системы связи после модернизации.

The possibility of modernization of atmospheric optical channel by using orbital angular momentum MIMO system has been studied. An assessment of the increase in the performance of the communication channel after modernization is given.

Ключевые слова: атмосферно-оптические линии связи, энергетическая эффективность, орбитально угловой момент излучения.

Keywords: free space optics, energy efficiency, orbital angular momentum of light.

С момента принятия в июне 2018 г. международной конференцией 3GPP стандартов мобильной связи нового поколения 5G в области технологий систем связи происходит быстрое совершенствование и внедрение современных технических решений, обеспечивающих новый уровень повышения производительности беспроводных систем связи. Важный этап в развитии технологий 5G был достигнут с новым подходом при разработке телекоммуникационных систем — применением конвергенции между проводными и беспроводными технологиями передачи информации [1]. Поэтому сегодня востребованы технологии, позволяющие максимально упростить переход между различными средами распространения сигнала. Одним из таких перспективных направлений разработки и исследования является технология FSO (Free Space Optics). Данная технология основана на применении высококачественного модулированного оптического излучения для передачи информации через открытую атмосферную среду. Системы FSO позволяют организовать высокоскоростной канал передачи данных (десятки Гбит/с) на расстояниях до нескольких тысяч метров. Основными преимуществами беспроводных оптических каналов являются [2]:

- высокая защищенность от перехвата и глушения;
- более простая инсталляция в сравнении с кабельными коммуникациями;
- отсутствие строгого регулирования в области инфракрасного и оптического спектра частот;



- высокая теоретическая пропускная способность;
- отсутствие интерференции между разными каналами (нечувствительность к электромагнитным помехам);
- коммерческая доступность;
- регулируемая полоса пропускания и возможность реконфигурации канала.

Таким образом, использование FSO является одним из способов обеспечения развития стандартов связи и построения инфраструктуры 5G. Для этого используется сценарий внедрения стандарта 5G eMBB (Enhanced Mobile Broadband), который подразумевает увеличение пропускной способности базовых станций до 20 Гбит/с на передачу и 10 Гбит/с на прием, что требует увеличения производительности существующих магистральных каналов связи. Традиционные решения задач модернизации существующих оптоволоконных линий связи – экономически затратное мероприятие. Преимущественным аспектом применения eMBB является расширение беспроводной сотовой инфраструктуры в сельской местности, что подразумевает установку базовых станций в труднодоступных регионах, где использование оптоволоконных технологий является технически нереализуемым. Кроме того, высокая загруженность существующего радиочастотного ресурса и сложности с лицензированием новых участков радиодиапазона, а также повышение опасности влияния излучения с увеличением мощности и частоты на здоровье человека выступают преградой для использования традиционных технологий беспроводной связи.

Важной задачей, влияющей на эффективность инфокоммуникационной системы передачи, является увеличение спектральной эффективности каналов связи [3]. Спектральная эффективность системы связи представляет собой отношение скорости передачи информации (R , бит/с) к ширине полосы пропускания (W , Гц) канала связи и измеряется показателем SE [бит/с/Гц]:

$$SE = \frac{R}{W} \left[\frac{\text{бит} / \text{сек}}{\text{Гц}} \right]. \quad (1)$$

Спектральная эффективность характеризует, насколько продуктивно в произвольной системе связи используется полоса частот в канале связи. При разработке инфокоммуникационных систем передачи используется подход, обеспечивающий достижение максимальной спектральной эффективности, что увеличивает объем пользовательской информации, передаваемой в одной и той же полосе частот (частотном спектре) в единицу времени [4]. Из (1) следует, что для увеличения спектральной эффективности необходимо стремиться к сужению используемой полосы частот W либо увеличивать скорость передачи информации R , но эти действия имеют ограничения, связанные с пределом Шеннона.



Одним из подходов решения задачи повышения спектральной эффективности являются ММО-системы (Multi Input Multi Output) с пространственным или комбинированным разделением каналов [4; 5]. Поскольку спектральное разделение каналов и различные виды модуляции подразумевают увеличение подверженности канала различным помехам, использование исключительно этих методов в FSO сопряжено с трудностями в связи с особенностями распространения оптического излучения в атмосфере. Различные явления, такие как туман, снег, дождь, воздушная турбулентность, поглощение и рассеяние в воздухе, являются причиной затухания и деградации канала связи [2].

Для пространственного разделения каналов могут использоваться различные подходы, например использование нескольких пар приемников-передатчиков оптических сигналов или изменение величины поляризации сигнала [6]. Однако каналы в данных методах сильно подвержены взаимовлиянию и перекрестным помехам, что ограничивает возможность их наращивания.

Однако в последнее время развивается новый метод пространственного разделения оптических каналов на основе орбитально углового момента света [7]. Известно, что фотоны одновременно обладают моментом спина (МС), на основе которого действует поляризация, и орбитально угловым моментом (ОУМ), связанным с азимутальной фазой комплексной плоскости электрического поля. Свет, обладающий орбитально-угловым моментом, также называют закрученным. Каждый фотон может обладать азимутальной фазой $\exp(l\phi\hbar)$, где l – целое число, отражающее одну из мод закрученности. Каждая из таких мод ортогональна, к тому же теоретически их количество не ограничено [7]. Возможность генерировать и выделять из сигнала моды закрученности методами интерферометрии или голографии позволяет создавать FSO-системы с непревзойденно высокой спектральной и фотонной эффективностью, которая может достигнуть нескольких бит на фотон [8]. Следовательно, мультиплексирование ОУМ может использоваться для разрешения проблемы несовместимости FSO и оптоволоконных линий.

В данной работе приведено исследование эффективности применения пространственного разделения каналов при помощи использования разных мод ОУМ-излучения на примере имитационной модели в программной среде *OptiSystem*. В качестве технологии построения канала выбрана схема ММО с использованием нескольких дублирующих друг друга каналов передачи в целях улучшения качества соединения и борьбы с негативными эффектами передачи в атмосфере.

Традиционно канал FSO состоит из передающей и приемной частей. Основными элементами передатчика являются источник излучения, модулятор и оптическое устройство для распространения сигнала. Оптический сигнал модулируется и направляется в объектив, который наводится на приемную сторону. Приемник обычно состоит из объектива, оптического фильтра, фотодетектора, предусилителя и демодулятора (рис. 1).

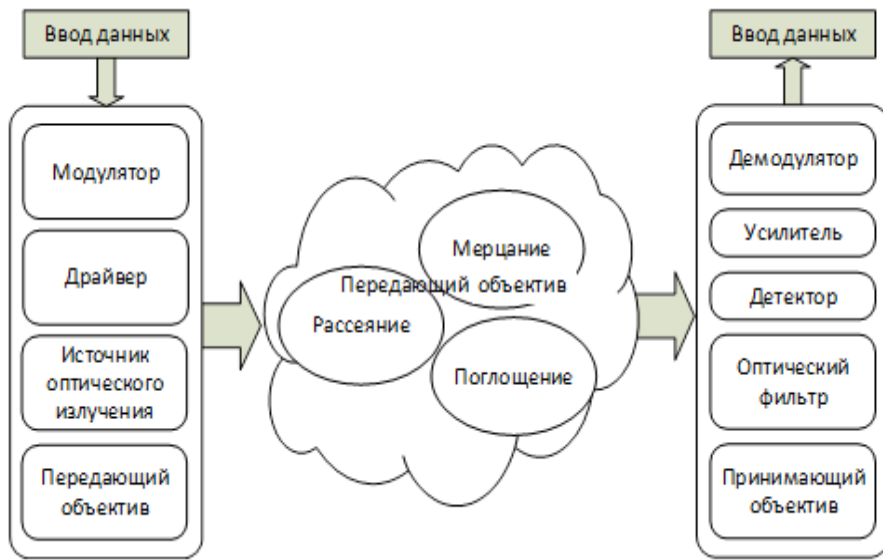


Рис. 1. Конструкция канала FSO

Объектив собирает и фокусирует оптические лучи на активную поверхность фотодетектора. Оптический фильтр предназначен для снижения влияния фонового излучения (например, солнечного света). Фотодетектор преобразует оптический сигнал в электрический. Выходной сигнал фотодетектора подвергается усилению и затем демодулируется.

Суммарные потери при передаче P (дБ) являются суммой потерь на затухании и геометрических потерь, создаваемых расхождением лазерного луча в пространстве:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{расх}} + P_{\text{атм}}. \quad (2)$$

Оптический сигнал подвергается затуханию в атмосфере за счет поглощения, мерцания, рассеяния, геометрического расхождения луча, турбулентности и других факторов. Суммарный коэффициент затухания может быть вычислен по следующей формуле:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda), \text{ дБ/км}, \quad (3)$$

где $\alpha_m(\lambda)$ и $\alpha_a(\lambda)$ представляют собой коэффициенты молекулярного поглощения и поглощения на аэрозолях соответственно, а $\beta_m(\lambda)$ и $\beta_a(\lambda)$ отражают коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния соответственно.

Атмосферные потери зависят от дальности передачи и вычисляются как

$$P_{\text{атм}} = L * \alpha(\lambda). \quad (4)$$



Вследствие геометрического расхождения пучка излучения также возникают геометрические потери. Площадь светового пятна на приемнике оказывается больше площади самого приемника. Геометрические потери зависят от угла расхождения, площади приемника и дальности передачи:

$$P_{\text{расх}} = 20 \lg \left(\frac{L \cdot \varphi}{d_{\text{прием}}} \right), \quad (5)$$

где $d_{\text{прием}}$ — диаметр приемника.

56

Также важное влияние на качество сигнала в системах FSO оказывает турбулентность атмосферы, которая представляет собой хаотические потоки и завихрения воздушных масс в отсутствие облачности. В результате этого феномена возникает фазовое смещение проходящего оптического излучения. Для симуляции данного эффекта в построенной модели была использована вероятностная модель «гамма — гамма», заложенная в программной среде OptiSystem. Характеристики оборудования FSO для построения модели выбраны в соответствии с существующими на рынке и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики модели

Наименование	Величина	Значение	Единица измерения
Полоса пропускания	B	10	Гбит/с
Расстояние связи	L	1500,00	м
Угол расхождения	ϕ	0,00	рад
Диаметр приемника	d	0,10	м
Потери на расхождение	$P_{\text{расх}}$	29,54	дБ
Коэффициент затухания	a	0,00	дБ/м
Потери на затухание	$P_{\text{атм}}$	3,00	дБ
Общие потери мощности	$P_{\text{общ}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{расх}}$	32,54	дБ
Мощность источника	$P_{\text{ист}}$	30,00	дБм
Запас по мощности	$A = P_{\text{ист}} - S_{\text{пр}} - P_{\text{общ}}$	27,46	дБм

Целью исследования является оценка возможной модернизации данной системы FSO путем встраивания оборудования для генерации / детектирования модулированного излучения нескольких орбитально-угловых мод с целью улучшения качества сигнала. Необходимо учитывать, что генерация и детектирование состояний ОУМ может быть реализовано несколькими способами [7; 8] и подразумевает использование дополнительной внутрисистемной оптики, что отражается на сложности, размерах и стоимости системы. Также, несмотря на теоретически неограниченное количество ОУМ — мод излучения, с ростом числа l возрастает сложность процессов генерации и детектирования данных мод. Таким образом, необходимо обеспечить баланс между увеличением производительности и сложностью исследуемой системы связи.

В качестве симуляции мод, пространственно-разделенных ОУМ-каналов в среде *OptiSystem*, были использованы отдельные блоки приемника-передатчика FSO (рисунок 2 – пример для четырех каналов). В физической модели это разделение достигается при помощи использования голографических фильтров и одной пары объективов, обеспечивая имитацию орбитально-углового момента фотонов.

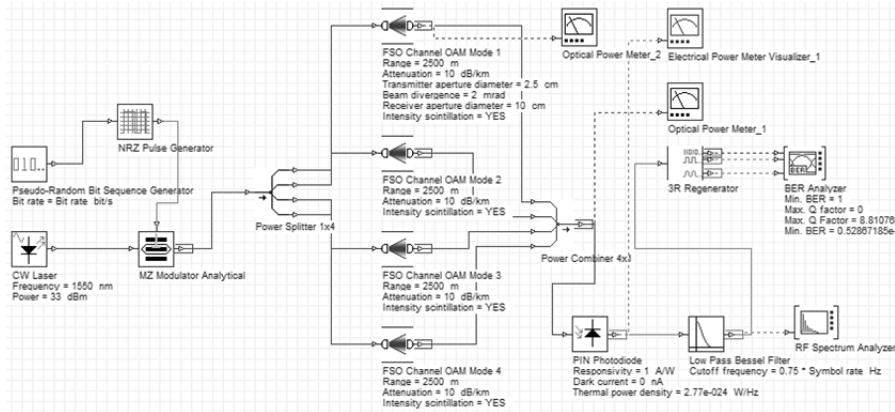


Рис. 2. Схема модели четырехканальной оптической системы связи в среде *OptiSystem*

В качестве основных показателей при исследовании систем передачи данных используются BER (Bit-Error Rate) и Q-factor, которые показывают вероятность появления битовой ошибки и качество сигнала соответственно. В качестве эталона для современных высокоскоростных каналов принимаются значения $BER < 10^{-10}$ и Q-фактора = 6,63 [9]. В модели в качестве анализатора этих параметров используется блок BER Analyzer. Измерения были произведены для симуляции условий слабой и сильной турбулентности, а также сильного дождя и тумана. Параметр C_n^2 отражает структурный показатель преломления, который используется в модели «гамма – гамма» для симуляции турбулентности, выбраны типовые для заданных условий значения [10]. Значения коэффициентов затухания среды передачи использовались аналогичные испытаниям оборудования производителя fSONA и др. [11]. Значения параметров модели, соответствующие данным условиям, отображены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры модели для различных погодных условий

Погодные условия	Структурная постоянная показателя преломления	Коэффициент затухания, дБ/км
Слабая турбулентность	$C_n^2 = 10^{-15}$	a = 3
Сильная турбулентность	$C_n^2 = 10^{-12}$	a = 3
Сильный дождь	$C_n^2 = 10^{-15}$	a = 10
Сильный туман	$C_n^2 = 10^{-15}$	a = 26



Первоначально выбрано оптимальное количество используемых каналов системы связи с ОУМ, для чего произведена оценка прироста производительности при фиксированных условиях передачи ($L=1500$, слабая турбулентность при различном количестве каналов с ОУМ-разделением). Результаты отражены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3

Оценка прироста производительности системы связи в зависимости от количества каналов ММО

Количество каналов	Q-фактор	Прирост производительности, %
1	9,8	–
2	13,74	40
4	19,7	43
6	24,28	23
8	27,16	12
10	29,43	8

58

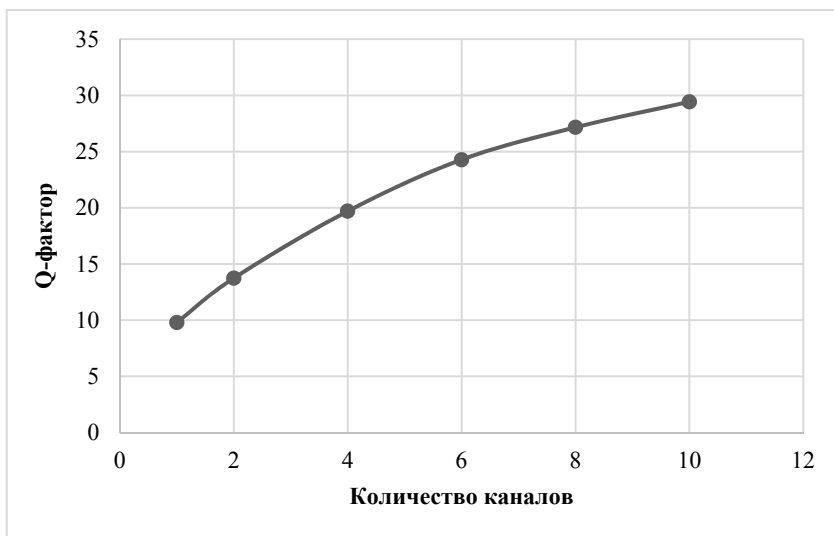


Рис. 3. График повышения производительности системы связи относительно количества каналов

Опираясь на полученные при моделировании системы связи данные выбрана 4-канальная система, поскольку для этого варианта наблюдается наибольший прирост производительности при относительном усложнении системы.

В результате моделирования системы связи построены графики зависимости Q-фактора от дальности связи в сравнении с аналогичным каналом без использования разделения на 4 ортогональных моды (рис. 4, 5).

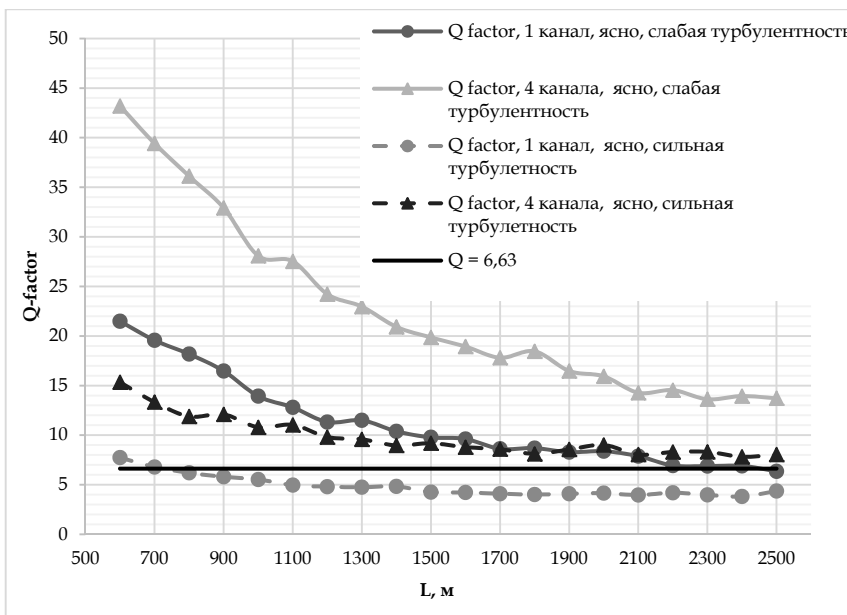


Рис. 4. График зависимости Q-фактора от расстояния в условиях турбулентности для одиночного и ММО-каналов

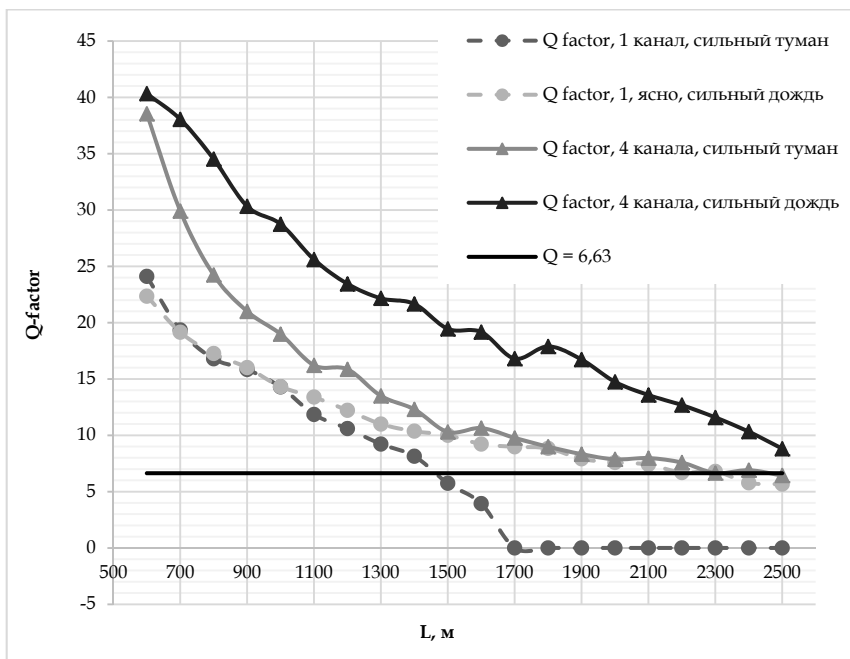


Рис. 5. График зависимости Q-фактора от расстояния в условиях дождя и тумана для одиночного и ММО-каналов



Из графиков видно, что в случае использования методов разделения каналов наблюдается снижение вероятности ошибки BER, обеспечивая существенный прирост качества сигнала. В случае слабой турбулентности прирост в среднем составил 202 %, сильной турбулентности — 203 %, дождя — 192 % и тумана — 160 %. Стоит отметить, что в условиях сильной турбулентности типовой канал без пространственного разделения обладает показателями Q-фактора ниже порогового значения на расстоянии более 600 м, а при тумане — при расстоянии более 1700 м, то есть эксплуатация канала становится невозможной ввиду превышения энергетического бюджета. При этом система связи с использованием MIMO может эксплуатироваться на расстояниях выше 2500 м в любых условиях, кроме сильного тумана.

В соответствии с результатами исследования можно заключить, что применение технологии пространственного разделения каналов с использованием ОУМ позволяет наращивать производительность канала, повышая энергетическую эффективность. В связи с этим подобные системы связи могут использоваться как в современных решетчатых сетях на небольших расстояниях с высокой пропускной способностью, так и на повышенных расстояниях в условиях недоступности или нецелесообразности других технологий. Кроме того, использование схем MIMO может позволить повысить эффективность традиционных методов улучшения качества сигнала, таких как применение разных видов модуляции или помехоустойчивого кодирования. Также с развитием технологий генерации и детектирования ОУМ мод количество каналов может наращиваться для дальнейшего увеличения энергетической эффективности.

Список литературы

1. Mukherjee B. Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks. Davis, 2017.
2. Mikołajczyk J. Analysis of free-space optics development // Metrology and Measurement Systems. 2017. Vol. 24, iss. 4. P. 653–674.
3. Штомпель Н. Выбор метода модуляции в волоконно-оптических телекоммуникационных системах // Системи обробки інформації. 2013. Вип. 1. С. 220–223.
4. Ерохин С. Д. Анализ спектральной эффективности современных широкополосных систем связи. М., 2010.
5. Mansoura A. New challenges in wireless and free space optical communications // Optics and Lasers in Engineering. 2017. Vol. 89. P. 95–108.
6. Rajbhandari S. Optical spatial diversity for FSO communications // Principles and Applications of Free Space Optical Communications. Herts, IET, 2019.
7. Князев Б. А. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты // Успехи физических наук. 2018. Т. 188, № 5. С. 509–539.
8. Robert Fickler A. Z. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 // PNAS. 2016. № 113 (48). P. 13642–13647.
9. Gruneisen T. Holographic generation of complex fields with spatial light modulators: application to quantum key distribution // Application Optics. 2008. Vol. 47, iss. 4. P. 32–42.



10. Ткалич О.П. Применение глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов // Электроника та системи управління. 2009. №2. С. 32 – 41.

11. Боев А.А. Беспроводной канал передачи информации со скоростью 40 Гбит/с // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. №62. С. 44 – 48.

12. Singh L. Proc. International Conference on Recent Advances and Future Trends in Information Technology // Performance Evaluation of FSO and Radio Frequency Communication System Due to Combined Effect of Fog and Snow. 2012.

13. Молчанов С.В. Применение когерентного временно-частотного мультиплексирования для повышения производительности атмосферной оптической линии // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки. 2019. Вып. 2. С. 31 – 39.

14. Murugan S. Design and Analysis of 5G Optical Communication System for Various Filtering Operations using Wireless Optical Transmission // Results in Physics. 2019. Vol. 12. P. 460 – 468.

15. Stull R. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 1988.

Об авторах

Сергей Васильевич Молчанов – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SMolshanov@kantiana.ru

Александр Сергеевич Яковлев – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: ASYAkolev@stud.kantiana.ru

Алексей Николаевич Алешенко – доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

Алексей Иванович Иванов – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: aivanov@kantiana.ru

The authors

Dr Sergey V. Molchanov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SMolshanov@kantiana.ru

Alexander S. Yakovlev, Masret's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: ASYAkolev@stud.kantiana.ru

Alexey N. Aleshchenko, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

Prof. Alexey I. Ivanov, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: aivanov@kantiana.ru