

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН

УДК 621.391.63; 535.36

Статистическое моделирование характеристик канала оптической связи на рассеянном излучении с беспилотным летательным аппаратом

М.В. Тарасенков[✉], В.В. Белов, Е.С. Познахарев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.04.2022 г.;
после доработки 29.06.2022 г.;
принята к печати 16.07.2022 г.

Рассматривается модель атмосферного канала оптической связи на рассеянном излучении между земной поверхностью и беспилотным летательным аппаратом (БПЛА). Методом Монте-Карло оценивается, как меняются ослабление полезного сигнала, минимальная энергия в импульсе источника, обеспечивающая устойчивую связь, и максимальная скорость передачи информации в зависимости от оптико-геометрических условий формирования канала связи. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для выбора оптимальных конфигураций систем оптической связи на рассеянном излучении с БПЛА.

Ключевые слова: атмосфера, рассеянное лазерное излучение, оптическая связь на рассеянном излучении, видимый и УФ-диапазоны длин волн, беспилотный летательный аппарат; atmosphere, scattered laser radiation, NLOS optical communication, visible and UV wavelength regions, unmanned aerial vehicle.

Введение

Оптическая связь вне прямой видимости — одно из интенсивно развивающихся направлений осуществления связи в атмосферной среде. Можно выделить следующие существующие и перспективные приложения этого типа связи: 1) связь на отраженном излучении на небольших базовых расстояниях [1, 2] (например, внутри помещений); 2) связь на рассеянном излучении между наземными объектами [3, 4] (базовые расстояния от нескольких метров до десятков километров); 3) связь по схеме «земная поверхность — беспилотный летательный аппарат (БПЛА)» [5, 6]; 4) связь между БПЛА [7, 8]; 5) связь между БПЛА и спутником [9, 10]. В ИОА СО РАН нами ранее была показана возможность осуществления устойчивой оптической связи на рассеянном излучении в видимом диапазоне в темное время суток на базовых расстояниях до 70 км [11] и в УФ-диапазоне в условиях дня на базовых расстояниях до 1,3 км [12].

В рамках теоретических работ были получены следующие результаты [13, 14]:

- 1) созданы программы статистического моделирования импульсной реакции канала оптической связи на рассеянном излучении [13];
- 2) оценена оптимальная длина волны излучения лазера для осуществления наземной оптической

связи на рассеянном излучении в УФ-диапазоне в дневных и ночных условиях для базовых расстояний до 50 км [14].

Осуществление устойчивой связи между земной поверхностью и БПЛА — это новое перспективное направление развития атмосферной оптической связи [15]. Связь на рассеянном излучении с БПЛА потенциально может использоваться: 1) в условиях городской застройки, когда прямая видимость блокирована зданиями; 2) в условиях сложной местности, когда прямая видимость блокирована деревьями или неровностями поверхности; 3) при многоадресной связи, когда информация принимается несколькими абонентами; 4) при ретрансляции сигналов через БПЛА для увеличения устойчивости связи и скорости передачи информации; 5) при организации непрерывной связи с произвольно движущимся БПЛА. Отметим немногочисленность работ, посвященных связи с БПЛА [5–10], и единичные работы, посвященные связи на рассеянном излучении с движущимся БПЛА (например, [16]). Это обуславливает актуальность задачи оценки оптимальных схем связи и параметров приемо-передающей аппаратуры.

Постановка задачи и метод решения

Рассматривается следующая постановка задачи.

Пусть имеется плоская система «атмосфера — земная поверхность». Земная поверхность неотражающая. Рассматривается диапазон длин волн от 0,2 до 0,71 мкм — каналы с центрами на длинах волн $\lambda = 0,205; 0,215; \dots; 0,705$ мкм и шириной каналов

* Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Егор Сергеевич Познахарев (724_pes1992@iao.ru).

$\Delta\lambda = 0,01$ мкм. Атмосфера разделена на 32 однородных слоя, в пределах каждого из которых определены коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и ослабления. Молекулярное поглощение задается с использованием данных из [17–19]. Остальные оптические параметры атмосферы задаются генератором LOWTRAN-7 [20] для модели лета средних широт. В рассматриваемом спектральном диапазоне основными поглощающими газами являются O_3 , O_2 и H_2O . Также на принимаемый сигнал могут оказывать влияние в УФ-диапазоне поглощения SO_2 , N_2O и NO_2 . За основу брались сечения поглощения газов с шагом в 1 см^{-1} . Рассматриваются следующие концентрации малых газов в приземном слое атмосферы [20]: $H_2O - 13,98\text{ г/м}^3$, $O_3 - 3,017 \cdot 10^{-2}\text{ ppmv}$, $SO_2 - 3 \cdot 10^{-4}\text{ ppmv}$, $N_2O - 0,32\text{ ppmv}$, $NO_2 - 2,3 \cdot 10^{-5}\text{ ppmv}$. Приземная температура воздуха бралась равной $T = 294,2\text{ К}$, атмосферное давление в приземном слое $P = 1013$ мбар. Брались средние коэффициенты поглощения по рассматриваемым каналам с равномерной аппаратной функцией приемной системы. Расчеты методом Монте-Карло выполнялись в монохроматическом приближении. Используемые в расчетах модели атмосферы в УФ-диапазоне описаны в [14] и были близки к моделям в [4, 22].

Пусть на земной поверхности располагается источник импульсного излучения с угловой расходимостью ν_0 , ось которого ориентирована вертикально вверх ($\theta_s = 0^\circ$) (рис. 1). Отдельный импульс имеет длительность Δt_0 и мощность $P_0(t)$. Форма импульса предполагается прямоугольной. На базовом расстоянии от источника Y_N на высоте от поверхности Земли h_d располагается БПЛА с приемной системой, ось которой направлена под зенитным углом θ_d , имеет поле зрения ν_d , площадь входного зрачка оптического приемника S_d . Пусть оптический блок приемной системы идеальный, а в качестве фотоприемника используется ФЭУ УФК-4Г-2 [21]. ФЭУ характеризуется следующими величинами: 1) темновой ток I_T ; 2) спектральная чувствительность фотокатода Σ_c ; 3) полоса пропускания частот Δf ; 4) коэффициент усиления M . Значения Σ_c для ФЭУ УФК-4Г-2 приведены в табл. 1.

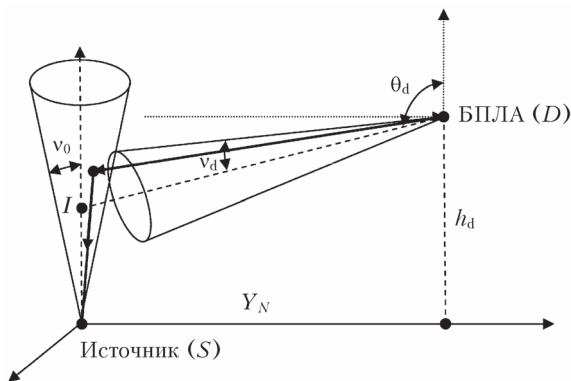


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи (копланарная схема связи) (I – точка пересечения осей источника и приемной системы)

Таблица 1

Спектральная чувствительность фотокатода для ФЭУ УФК-4Г-2 [21]

λ , мкм	Σ_c , мА/Вт	λ , мкм	Σ_c , мА/Вт	λ , мкм	Σ_c , мА/Вт
0,205	22	0,375	53	0,545	51
0,215	26	0,385	56	0,555	48
0,225	29	0,395	61	0,565	45
0,235	33	0,405	69	0,575	42
0,245	37	0,415	75	0,585	39
0,255	40	0,425	79	0,595	36
0,265	45	0,435	81	0,605	32
0,275	50	0,445	82	0,615	29
0,285	52	0,455	81	0,625	26
0,295	53	0,465	80	0,635	23
0,305	51	0,475	78	0,645	19
0,315	49	0,485	75	0,655	16
0,325	48	0,495	72	0,665	13
0,335	47	0,505	68	0,675	11
0,345	48	0,515	64	0,685	8
0,355	48	0,525	60	0,695	7
0,365	50	0,535	56	0,705	5

Пусть на верхнюю границу атмосферы падает поток солнечного излучения под зенитным углом θ_{sun} от вертикали и азимутальным углом φ_{sun} , откладываемым от направления визирования.

Требуется оценить характеристики качества связи в зависимости от оптико-геометрических условий ее реализации. В рамках теории линейных систем для описания канала связи достаточно знать его импульсную реакцию $h(t)$ на входной импульс $\delta(t)$. Для определения импульсной реакции использовалось две программы метода Монте-Карло [13]: программа локальной оценки для однократно рассеянной компоненты импульсной реакции и программа модифицированной двойной локальной оценки для многократно рассеянной составляющей импульсной реакции. Эти программы были модифицированы, чтобы учесть, что возможны ситуации, когда поле зрения приемной системы может полностью перекрываться земной поверхностью.

Зная импульсную реакцию канала связи $h(t)$ и излучаемый импульс $P_0(t)$, можно найти мощность принимаемого излучения

$$P(t) = S_d \int_0^{+\infty} P_0(t_1) h(t - t_1) dt_1. \quad (1)$$

Одна из величин, характеризующих качество связи, – это отношение мощности источника к мощности принимаемого излучения, приведенное к децибелам [22]:

$$\eta = 10 \lg \frac{P_0}{\bar{P}}, \quad (2)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} P(t) dt,$$

где \bar{P} – средняя мощность принимаемого излучения; Δt – длительность импульса принимаемого полезного сигнала, которая задавалась как интервал времени, в пределах которого принимаемый импульс имеет мощность в 5% от максимальной и выше.

Вторая величина, которой характеризуют качество связи, — это отношение сигнал-шум [23–25]:

$$\text{SNR} = \frac{\bar{P}_{\Sigma_c} M}{\sqrt{e \Delta f M^2 (\bar{P}_{\Sigma_c} + P_b \Sigma_c + I_T)}} \quad (3)$$

(e — заряд электрона). Мощность фонового излучения P_b в (3) определяется из интенсивности излучения Солнца, не взаимодействовавшего с земной поверхностью, I_{sun} по формуле

$$P_b = \Delta \lambda S_d 2\pi(1 - \cos v_d) I_{\text{sun}}. \quad (4)$$

Расчет I_{sun} выполнялся методом Монте-Карло на сопряженных траекториях с локальными оценками в точках столкновения, основанным на [26].

В случае $\text{SNR} \geq 10$ можно ожидать устойчивую связь между источниками и БПЛА. Тогда, зная η , P_b и характеристики приемной аппаратуры, можно оценить минимальную энергию импульса источника, для которой в приемной системе $\text{SNR} \geq \text{SNR}_0 = 10$, по формуле

$$Q_{0,\min} = \Delta t_0 \times \left(\frac{C_2 \text{SNR}_0^2 + \sqrt{\text{SNR}_0^4 C_2^2 + 4 \text{SNR}_0^2 C_1 (\Sigma_c M)^2}}{2 (\Sigma_c M)^2} \right) \cdot 10^{n/10}, \quad (5)$$

$$C_1 = e \Delta f M^2 (P_b \Sigma_c + I_T),$$

$$C_2 = e \Delta f \Sigma_c M^2.$$

При распространении в канале связи импульса от источника к приемнику импульс из-за рассеяния «расширяется» по времени. Это, в свою очередь, ограничивает предельное количество импульсов, которые можно передавать по каналу связи:

$$v_{\max} = \frac{1}{\Delta t}. \quad (6)$$

Тестирование программ метода Монте-Карло

Для доказательства работоспособности использованных программ результаты, полученные с их помощью, сравнивались с тестовыми расчетами из [27]. В [27] рассматривались следующие условия: источник и приемная система расположены на земной поверхности, атмосфера однородная, рассеяние изотропное, коэффициент рассеяния $\sigma_s = 0,49 \text{ км}^{-1}$, а коэффициент ослабления $\sigma_t = 1,23 \text{ км}^{-1}$, базовое расстояние $Y_N = 100 \text{ м}$, компланарная схема связи. Результаты в [27] получены аналитически в приближении однократного рассеяния излучения. Нами был выполнен аналогичный расчет методом Монте-Карло с локальными оценками в точках столкновения в приближении однократного рассеяния. Моделировалось $n_1 = 1,5 \cdot 10^8$ траекторий. Результат сравнения приведен на рис. 2. Средняя погрешность расчетов импульсных реакций не превышала 0,6%. Под погрешностью здесь и далее понимается отношение корня от выборочной дисперсии расчетов

к выборочному математическому ожиданию. В табл. 2 приведены максимальные и средние абсолютные различия результатов расчетов методом Монте-Карло и результатов из [27].

Таблица 2

Максимальные и средние абсолютные отличия результатов [27] от результатов расчетов методом Монте-Карло

v_0 , град	v_d , град	θ_0 , град	θ_d , град	Максимальное отличие, $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Среднее отличие, $1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
10	15	30	60	0,32	0,10
10	15	45	30	0,06	0,02
10	15	45	0	0,06	0,02
7,5	15	30	60	0,31	0,06
7,5	15	45	30	0,14	0,03
7,5	15	45	0	0,04	0,02
10	20	30	60	1,14	0,12
10	20	45	30	0,25	0,03
10	20	45	0	0,03	0,01
7,5	20	30	60	0,21	0,04
7,5	20	45	30	0,28	0,05
7,5	20	45	0	0,11	0,02

Сравнение показывает, что результаты наших расчетов хорошо согласуются с результатами [27]. Тестирование многократно рассеянной составляющей импульсной реакции выполнялось в [14].

Результаты и их обсуждение

Проведено несколько серий численных экспериментов. Для всех серий расчетов следующий набор оптико-геометрических условий не менялся: метеорологическая дальность видимости $S_M = 1, 10$ и 50 м , что соответствует вертикальной АОТ_{0,55} = $4,9, 0,67$ и $0,16$; $v_0 = 1^\circ$; $h_d = 0,1 \text{ км}$; $S_d = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $\Delta t_0 = 30 \text{ нс}$; $M = 10^6$; $\Delta f = 10 \text{ кГц}$; $I_T = 10^{-15} \text{ А}$; $\theta_{\text{sun}} = 45^\circ$; $\phi_{\text{sun}} = 0^\circ$. Общее число траекторий для программы метода Монте-Карло с локальными оценками в точках столкновения бралось $n_1 = 1,5 \cdot 10^8$, для программы с модифицированной двойной локальной оценкой — $n_2 = 1,5 \cdot 10^7$, а для программы расчета интенсивности фонового излучения Солнца — $n_3 = 1,5 \cdot 10^5$.

В рамках первой серии анализировалось, как влияет θ_d на качество связи. Расчеты выполнялись для следующих оптико-геометрических условий: $\lambda = 0,205; 0,395; 0,555$ и $0,705 \text{ мкм}$, $v_d = 1^\circ$, $\theta_d = 88, 90, 92$ и $94,5^\circ$, $Y_N = 1 \text{ км}$. Выбраны были именно эти длины волн, потому что каналы с центрами $\lambda = 0,205$ и $0,705 \text{ мкм}$ располагаются на границах рассматриваемого диапазона длин волн, $\lambda = 0,395 \text{ мкм}$ — переходный канал от УФ- к видимому диапазону, а $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ располагается в середине видимого диапазона. В работах других авторов чаще всего рассматриваются длины волн в пределах $\lambda = 0,2–0,3 \text{ мкм}$, однако оптическая связь потенциально может быть организована и вне этого диапазона. Результаты расчетов η приведены на рис. 3. Средняя погрешность импульсных реакций

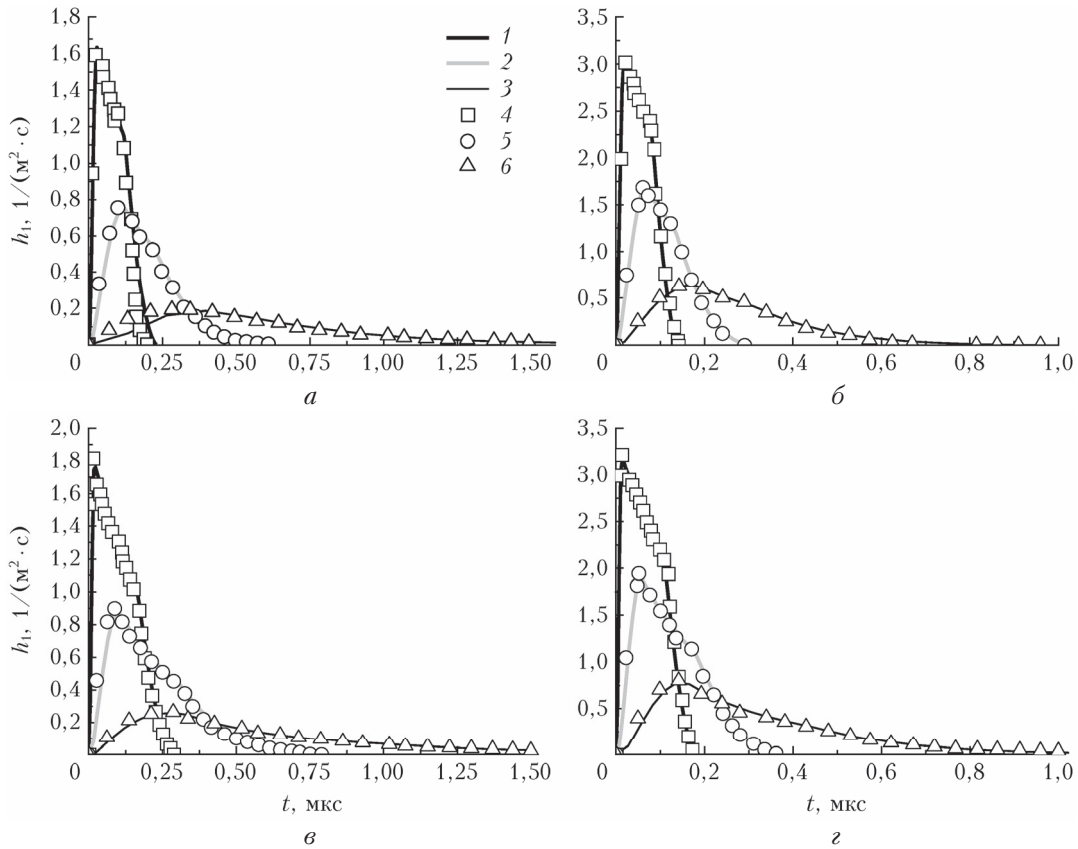


Рис. 2. Импульсные реакции в приближении однократного рассеяния h_1 : *a* – $\nu_0 = 10^\circ$, $\nu_d = 15^\circ$; *б* – $\nu_0 = 7,5^\circ$, $\nu_d = 15^\circ$; *в* – $\nu_0 = 10^\circ$, $\nu_d = 20^\circ$; *г* – $\nu_0 = 7,5^\circ$, $\nu_d = 20^\circ$. Результаты расчетов методом Монте-Карло: 1 – $\theta_0 = 30^\circ$, $\theta_d = 60^\circ$; 2 – $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_d = 30^\circ$; 3 – $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_d = 0^\circ$. Результаты расчетов из [27]: 4 – $\theta_0 = 30^\circ$, $\theta_d = 60^\circ$; 5 – $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_d = 30^\circ$; 6 – $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta_d = 0^\circ$

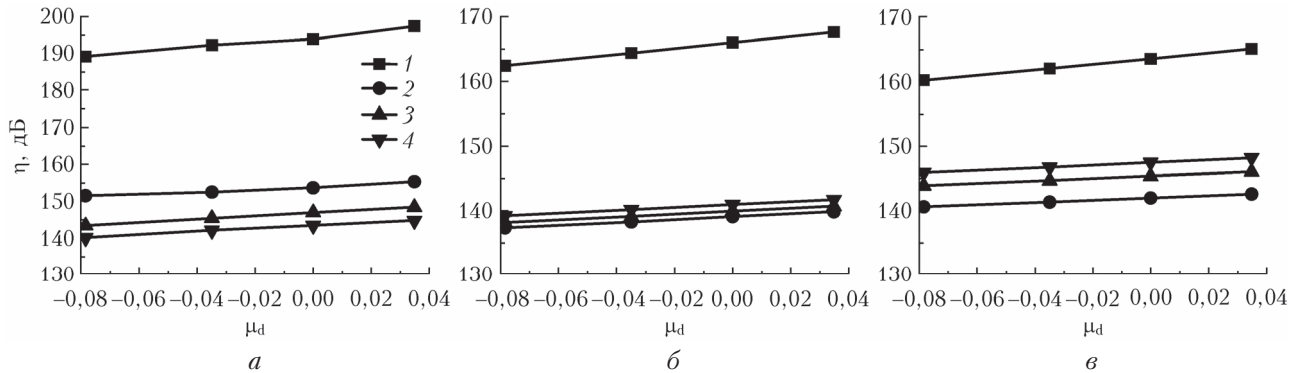


Рис. 3. Зависимость η от $\mu_d = \cos\theta_d$: $S_M = 1$ (*a*), 10 (*б*), 50 км (*в*); $\lambda = 0,205$ (1), 0,395 (2), 0,555 (3) и 0,705 мкм (4)

не превышала 4,4%. Доля многократно рассеянного излучения в значениях импульсной реакции для временных интервалов центральной временной зоны лежала в пределах 10–80% для $S_M = 1$ км, 1–12% для $S_M = 10$ км и <3% для $S_M = 50$ км.

Анализ результатов показывает, что с убыванием $\mu_d = \cos\theta_d$ величина η убывает почти линейно. Поэтому наилучшая связь реализуется при $\theta_d = 94,5^\circ$. Для ситуаций с малыми значениями S_M или высокой мутностью атмосферы (рис. 3, *a*) для рассмотренных длин волн наименьшее ослабление полезно-

го сигнала достигается на $\lambda = 0,705$ мкм, а для двух других ситуаций (рис. 3, *б*, *в*) – на $\lambda = 0,395$ мкм. Причина в том, что $S_M = 1$ км соответствует более высоким значениям коэффициентов рассеяния, что, в свою очередь, приводит к значительному ослаблению полезного сигнала. Однако при $\lambda = 0,705$ мкм рассеяние существенно меньше, поэтому и ослабление меньше. На $\lambda = 0,205$ мкм наблюдается наибольшее ослабление полезного сигнала для всех рассмотренных ситуаций в силу высокого молекулярного поглощения.

В рамках второй серии расчетов анализировалось, как влияет угол поля зрения приемной системы v_d на качество связи. Расчеты выполнялись для следующих оптико-геометрических условий: $\lambda = 0,205; 0,395; 0,555$ и $0,705$ мкм; $v_d = 1$ и 5° ; $\theta_d = 90^\circ$; $Y_N = 1$ км. Результаты этих расчетов приведены на рис. 4. Средняя погрешность импульсных реакций не превышала 6,6%. Доля многократно рассеянного излучения в значениях импульсной реакции для временных интервалов центральной временной зоны лежала в пределах 1–88% для $S_M = 1$ км, 1–19% для $S_M = 10$ км и меньше 6% для $S_M = 50$ км.

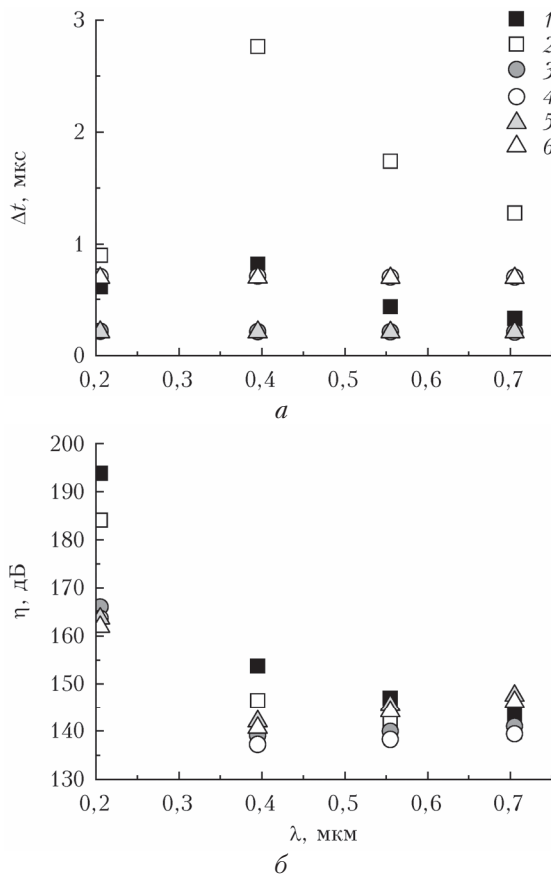


Рис. 4. Зависимость от длины волны: *a* — длительности принимаемого импульса Δt ; *б* — ослабления полезного сигнала η , для различных моделей атмосферы и полей зрения приемной системы при $\theta_d = 90^\circ$, $Y_N = 1$ км; 1 — $S_M = 1$ км, $v_d = 1^\circ$; 2 — $S_M = 1$ км, $v_d = 5^\circ$; 3 — $S_M = 10$ км, $v_d = 1^\circ$; 4 — $S_M = 10$ км, $v_d = 5^\circ$; 5 — $S_M = 50$ км, $v_d = 1^\circ$; 6 — $S_M = 50$ км, $v_d = 5^\circ$

Анализ результатов показывает, что с ростом v_d увеличивается мощность полезного сигнала (η убывает) и существенно увеличивается длительность принимаемого импульса Δt (от 1,5 до 4 раз в рассмотренных ситуациях). Из рис. 4, *б* видно, что для $\lambda > 0,7$ мкм наименьшее ослабление сигнала реализуется при $S_M = 1$ км, для $\lambda = 0,4–0,55$ мкм — при $S_M = 10$ км, а для $\lambda = 0,2$ мкм — при $S_M = 50$ км. Это также связано с тем, что, с одной стороны, рост коэффициента рассеяния увеличивает полезный сигнал, так как он формируется рассеянным

излучением, но, с другой стороны, растет ослабление излучения, что уменьшает полезный сигнал.

Следующая серия численных экспериментов проводилась, чтобы проанализировать влияние длины волны и базового расстояния Y_N на $Q_{0, \min}$, η и v_{\max} . Расчеты выполнялись для следующих оптико-геометрических условий: $\lambda = 0,2–0,71$ мкм с шагом 0,01 мкм; $v_d = 1^\circ$; $\theta_d = 90^\circ$; $Y_N = 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5$ и 1 км. Результаты расчетов приведены на рис. 5 (цв. вкладка) и в табл. 3. Средняя погрешность расчета импульсных реакций не превышала 2,0%. Доля многократно рассеянного излучения в значениях импульсной реакции для временных интервалов центральной временной зоны лежала в пределах 2–75% для $S_M = 1$ км, 1–11% для $S_M = 10$ км и $< 3\%$ для $S_M = 50$ км.

В табл. 3 в качестве $\lambda_{\text{opt}1}$ обозначена длина волны, для которой величина η минимальна; η_{\min}/η_{\max} обозначает диапазон, в котором η меняется с изменением длины волны; $\lambda_{\text{opt}2}$ — длина волны, при которой $Q_{0\min}$ принимает наименьшее значение; $Q_{0\min, 1}/Q_{0\min, 2}$ — диапазон, в котором меняется $Q_{0\min}$ с изменением длины волны. В диапазоне значений v_1/v_2 варьируется предельное количество импульсов, которое можно передавать по каналу связи, при длительности импульса источника $\Delta t_0 = 10$ нс.

Анализ результатов, приведенных на рис. 5, *а–в*, показывает, что с ростом Y_N значение S_M , при котором наблюдается наименьшее η , постепенно растет от 1 (при $Y_N = 0,01$ км) до 10 и 50 км (при $Y_N = 1$ км) в силу роста ослабления излучения в канале связи с увеличением Y_N . Поведение η в зависимости от λ для всех рассмотренных Y_N при $S_M = 10$ и 50 км немонотонно, что связано, с одной стороны, с высоким поглощением на $\lambda = 0,2–0,23$ мкм, а с другой — с меньшим рассеянием в видимом диапазоне по сравнению с УФ-диапазоном. Что касается $S_M = 1$ км, при $Y_N \leq 0,1$ км η в зависимости от λ меняется незначительно и немонотонно, но при больших Y_N наблюдается уменьшение η с ростом λ .

Из результатов, приведенных на рис. 5, *г–е*, следует, что $Q_{0\min}$ с ростом λ меняется немонотонно. При $S_M = 1$ и 10 км наблюдается минимум $Q_{0\min}$ при $\lambda = 0,285$ мкм. При $S_M = 50$ км длина волны, соответствующая минимуму $Q_{0\min}$, изменяется от 0,235 до 0,285 мкм с ростом Y_N .

Данные на рис. 5, *ж–и* позволяют утверждать, что v_{\max} при $Y_N = 0,01$ км почти не меняется с изменением S_M и λ . При больших Y_N для $S_M = 10$ и 50 км v_{\max} почти одинаковы, но при $S_M = 1$ км v_{\max} заметно меньше, чем при больших S_M . При $S_M = 1$ км для $Y_N \geq 0,05$ км с ростом λ наблюдается рост v_{\max} , но для $S_M = 10$ и 50 км изменения v_{\max} в зависимости от λ незначительны.

Из табл. 3 видно, что для рассматриваемого ФЭУ для дневных условий наилучшей длиной волны при $Y_N = 0,2–1$ км с точки зрения максимального значения отношения SNR является $\lambda = 0,285$ мкм. Однако η на этой длине волны

Величины, характеризующих качество канала оптической связи с БПЛА

Y_N , км	S_M , км	λ_{opt1} , мкм	η_{min}/η_{max} , дБ	λ_{opt2} , мкм	$Q_{0min, 1}/Q_{0min, 2}$, Дж	v_1/v_2 , 10^6 имп./с
0,01	1	0,355	113/117	0,285	1,82E-11/5,47E-07	22/23
0,05		0,435	115/120	0,285	3,12E-11/7,45E-07	17/19
0,10		0,525	117/125	0,285	6,04E-11/1,13E-06	14/17
0,20		0,565	122/134	0,285	2,81E-10/3,31E-06	8,8/12
0,50		0,675	132/160	0,285	9,45E-09/3,20E-05	2,8/6,3
1,00		0,705	143/194	0,285	9,26E-07/5,38E-03	0,5/3,0
0,01	10	0,225	117/123	0,285	5,70E-11/3,42E-06	22/23
0,05		0,225	118/124	0,285	7,14E-11/4,29E-06	20/21
0,10		0,235	119/125	0,285	9,42E-11/5,42E-06	18/19
0,20		0,235	124/129	0,285	2,38E-10/1,31E-05	13/14
0,50		0,295	132/145	0,285	1,37E-09/6,06E-05	7,3/7,6
1,00		0,305	138/166	0,285	6,84E-09/2,17E-04	4,6/4,8
0,01	50	0,225	117/131	0,235	8,19E-11/1,78E-05	22/23
0,05		0,225	118/131	0,245	1,04E-10/2,19E-05	20/21
0,10		0,235	120/132	0,245	1,40E-10/2,65E-05	18/19
0,20		0,235	124/136	0,285	3,56E-10/6,46E-05	14/15
0,50		0,245	133/144	0,285	1,79E-09/2,80E-04	7,5/7,6
1,00		0,295	139/164	0,285	6,94E-09/8,88E-04	4,8/4,9

не всегда наименьшая. Это вызвано тем, что на SNR кроме полезного сигнала влияет фоновое излучение Солнца. Кроме того, для $\lambda = 0,285$ мкм максимальная скорость передачи информации будет ниже, чем для больших длин волн. Тем не менее наиболее важной характеристикой качества сигнала остается именно SNR.

В [14] для наземной схемы связи на рассеянном излучении рассматривалась приемная система, содержащая ФЭУ УФК-4Г-4. Было получено, что при $Y_N \geq 0,5$ км наилучшая наземная связь (SNR максимален) в дневное время реализуется при $\lambda = 0,295$ мкм. Причина отличий результатов, полученных в настоящей работе, от [14] состоит в том, что схема связи несколько другая. Что касается безопасности связи, в [28] указывался безопасный для здоровья человека уровень излучения в зависимости от длины волны в дальнем УФ-диапазоне. Под безопасным уровнем излучения понимается предельно допустимая энергия на единицу площади поверхности, которая безопасна для глаз и кожи человека. Наиболее опасным считается излучение на $\lambda = 0,27$ мкм, на которой эта энергия равна 30 Дж/м^2 [28]. Следовательно, если безопасный уровень излучения превышен, необходимо прекращение сеанса связи. Время, за которое приходящая на единицу площади поверхности энергия достигает предельного безопасного значения, далее называется безопасным временем связи. В [14] для наземной схемы нами оценивалось безопасное время связи. Оценки показывают, что при использовании источника с энергией в одном импульсе $0,3 \text{ мДж}$ для $\theta_s = 85^\circ$ в условиях высокой мутности атмосферы ($S_M = 1$ км) безопасное время наземной связи составляет не менее 14 мин на расстоянии в 2 м от источника, а при $S_M = 10$ км — уже порядка 3 ч. Следует ожидать, что для рассматриваемой в настоящей работе схемы связи даже при использова-

нии аналогичного источника безопасное время связи будет существенно больше. Детально проанализировать безопасный уровень связи планируется в дальнейших исследованиях. Также можно использовать источники в ближнем УФ-диапазоне ($\lambda \geq 0,35$ мкм) и коротковолновой части видимого диапазона ($\lambda \leq 0,5$ мкм), так как излучение этих длин волн представляет гораздо меньшую опасность для человека.

Заключение

Выполненные расчеты позволили получить следующие важные результаты.

1. С убыванием $\mu_d = \cos\theta_d$ величина η убывает почти линейно. Поэтому наилучшая связь реализуется при $\theta_d = 94,5^\circ$.

2. С ростом v_d , с одной стороны, увеличивается мощность полезного сигнала (η убывает), а с другой — существенно увеличивается длительность принимаемого импульса Δt (от 1,5 до 4 раз в рассмотренных ситуациях).

3. При $\theta_d = 90^\circ$, $Y_N = 1$ км для $\lambda > 0,7$ мкм наименьшее ослабление полезного сигнала η следует ожидать при $S_M = 1$ км, для $\lambda = 0,4-0,55$ мкм — при $S_M = 10$ км, а для $\lambda = 0,2$ мкм — при $S_M = 50$ км.

4. Для рассмотренных в работе характеристик приемо-передающей системы в дневных условиях наилучшей длиной волны при $Y_N = 0,2-1$ км с точки зрения максимального значения SNR является $0,285$ мкм. Однако при $S_M = 1$ км η не всегда будет наименьшей на этой длине волны. Это вызвано тем, что на SNR кроме полезного сигнала влияет фоновое излучение Солнца. Кроме того, для $\lambda = 0,285$ мкм максимальная скорость передачи информации будет меньше, чем для больших длин волн.

В работе разобран один вариант концентрации атмосферных газов, так как рассматривались небольшие расстояния от источника до приемной системы (не превышавшие 1,005 км). Поэтому поглощение не так сильно влияет на принимаемый полезный сигнал, как рассеяние. Как показали оценки, увеличение коэффициентов поглощения в два раза для ситуации $Y_N = 1$ км и $\lambda \geq 0,225$ мкм изменяет ослабление на величину не более 6 дБ. Поэтому все полученные в настоящей работе результаты остаются справедливыми и при больших концентрациях поглощающих газов.

Можно сформулировать следующие рекомендации к построению системы оптической связи на трассах «земная поверхность – БПЛА».

1. Чем выше значение θ_d , тем лучше связь. Однако если конструировать системы с большими базовыми расстояниями, то возникают ограничения, связанные с препятствиями и тем, что предельный угол θ_d с ростом базового расстояния уменьшается. Альтернативным решением может быть использование $\theta_d = 90^\circ$. Уровень полезного сигнала при этом не будет самым высоким, но это упростит процедуру ориентации приемной системы в направлении источника.

2. Поле зрения приемной системы, если необходима высокая скорость передачи информации, следует выбирать как можно меньше, но если требуется высокая мощность полезного сигнала, то поле зрения лучше увеличить.

3. Следует выбирать длины волн приемо-передающей системы в дальнем УФ-диапазоне, если соблюдаются условия безопасного использования системы связи, либо в диапазоне $\lambda = 0,35$ – $0,5$ мкм для системы без ограничений по безопасности.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-22-00830).

Список литературы

- Zhanwei Liu, Yiwen Huang, Haigang Liu, Xianfeng Chen. Non-line-of-sight optical communication based on orbital angular momentum // *Opt. Lett.* 2021. V. 46. P. 5112–5115.
- Hamza A., Deogun J.S., Alexander D. Classification framework for free space optical communication links and systems // *IEEE Commun. Sur. & Tutorials.* 2019. V. 21, N 2. P. 1346–1382. DOI: 10.1109/COMST.2018.2876805.
- Arya S., Chung Y.H. Novel Optical scattering-based V2V communications with experimental analysis // *IEEE Trans. Intell. Transportation Syst.* 2022. P. 1–15. DOI: 10.1109/TITS.2022.3145437.
- Drost R.J., Sadler B.M. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications // *Semicond. Sci. Technol.* 2014. V. 29, N 8. 11 p. DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/084006.
- Dautov K., Kalikulov N., Kizilirmak R.C. The impact of various weather conditions on vertical FSO links // 2017 IEEE 11th Intern. Conf. “Application of Information and Communication Technologies” (AICT), 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICAICT.2017.8687029.
- Fawaz W., Abou-Rjeily C., Assi C. UAV-Aided Cooperation for FSO communication systems // *IEEE Commun. Magazine.* 2018. V. 56, N 1. P. 70–75. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700320.
- Mondal A., Hossain A. Channel characterization and performance analysis of unmanned aerial vehicle-operated communication system with multihop radio frequency–free-space optical link in dynamic environment // *Int. J. Commun. Syst.* 2020. V. 33, N 8. P. e4568. DOI: 10.1002/dac.4568.
- Dabiri M.T., Sadough S.M.S., Ansari I.S. Tractable optical channel modeling between UAVs // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019. V. 68, N 12. P. 11543–11550. DOI: 10.1109/TVT.2019.2940226.
- Li M., Hong Y., Zeng C., Song Y., Zhang X. Investigation on the UAV-to-satellite optical communication systems // *IEEE J. Select. Areas Commun.* 2018. V. 36, N 9. P. 2128–2138. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2864419.
- Mohorcic M., Fortuna C., Vilhar A., Horwath J. Evaluation of wavelength requirements for stratospheric optical transport networks // *J. Commun.* 2009. V. 4. P. 588–596. DOI: 10.4304/jcm.4.8.588-596.
- Абрамочкин В.Н., Белов В.В., Груднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты // *Светотехника.* 2017. № 4. С. 24–30.
- Belov V.V., Juwiler I., Blaunstein N., Tarasenkov M.V., Poznakharev E.S. NLOS communication: Theory and experiments in the atmosphere and underwater // *Atmosphere.* 2020. V. 11. P. 1122. DOI: 10.3390/atmos11101122.
- Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатического зондирования // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403; Belov V.V., Tarasenkov M.V. Three algorithms of statistical modeling in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 5. P. 533–540.
- Tarasenkov M.V., Belov V.V., Poznakharev E.S. Estimation of optimal wavelengths for atmospheric non-line-of-sight optical communication in the UV range of the spectrum in daytime and at night for baseline distances from 50 m to 50 km // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2022. V. 39. P. 177–188.
- Jupeng Ding, Hongye Mei, Chih-Lin I., Hui Zhang, Wenwen Liu. Frontier progress of unmanned aerial vehicles optical wireless technologies // *Sensors.* 2020. V. 20, N 19. P. 5476. DOI: 10.3390/s20195476.
- Tadayyon H., Uysal M. Ultraviolet communications for ground-to-air links // 27th Signal Proc. SIU, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIU.2019.8806490.
- Reilly D.M. Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet. Thesis. M.S. Massachusetts Institute of Technology, 1976. P. 23–31.
- Voigt S., Orphal J., Bogumil K., Burrows J.P. The temperature dependence (203–293 K) of the absorption cross-sections of O₃ in the 230–850 nm region measured by Fourier-transform spectroscopy // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2001. V. 143, N 1. P. 1–9. DOI: 10.1016/S1010-6030(01)00480-4.
- General Information // HITRAN. Cambridge, 2022. URL: hitran.iao.ru (last access: 26.03.2022).
- Kneizys F.X., Robertson D.C., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model. USA: Air Force Geophysics Laboratory, 1996. 261 p.

21. KATOD. Новосибирск, 2022. URL: <https://katodnv.com> (дата обращения: 26.03.2022).
22. Ding H., Chen G., Majumdar A.K., Sadler B.M., Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // IEEE J. Select. Areas Commun. 2009. V. 27, N 9. P. 1535–1544.
23. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974. 376 с.
24. Васильев А.Ф., Чмутин А.М. Фотоэлектрические приемники излучения. В.: ВГУ, 2010. 81 с.
25. Чечик Н.О., Файнштейн С.М., Лифшиц Т.М. Электронные умножители / под ред. Д.В. Зернова. М.: ГИТТЛ, 1957. 576 с.
26. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
27. Yu Sun, Yafeng Zhan. Closed-form impulse response model of non-line-of-sight single-scatter propagation // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V. 33. P. 752–757.
28. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation) // Health Phys. 2004. V. 87. P. 171–186.

M.V. Tarasenkov, V.V. Belov, E.S. Poznakharev. Analysis of characteristics of an optical communication channel on scattered radiation with an unmanned aerial vehicle.

A model of an optical communication atmospheric channel on scattered radiation between the ground surface and an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered. Changes in the useful signal attenuation, the minimum energy per source pulse providing the stable link, and the maximum information transfer rate versus the optical and geometrical conditions of forming the communication channel are estimated. Based on the results, recommendations are formulated for the choice of optimal schemes of optical communication systems on scattered radiation with UAV.

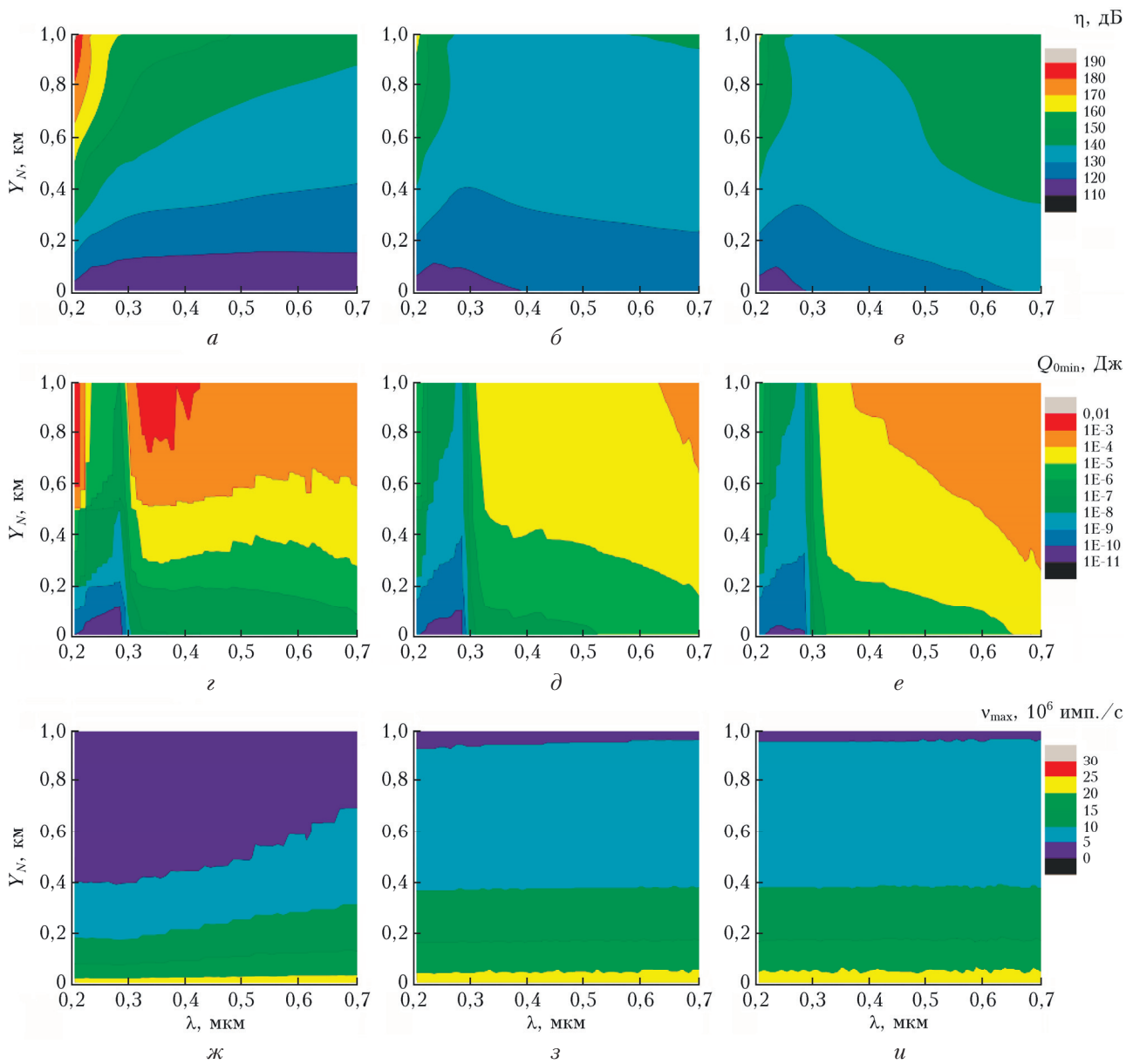


Рис. 5. Значения: $a-e$ – ослабления полезного сигнала η , дБ; $г-e$ – минимальной энергии в импульсе Q_{0min} , Дж; $ж-u$ – предельного количества импульсов, которые можно передавать по каналу связи v_{max} , 10^6 имп./с, для различных длин волн λ и базовых расстояний Y_N ; $S_M = 1$ ($a, г, ж$), 10 ($б, д, з$), 50 км ($в, е, u$)