

Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Оптическая связь на рассеянном излучении

В.В. Белов¹, М.В. Тарасенков¹, М.В. Энгель¹,
Ю.В. Гриднев¹, А.В. Зимовая¹, В.Н. Абрамочкин²,
Е.С. Познахарев¹, А.В. Федосов¹, А.Н. Кудрявцев^{1*}

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

²Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Сибирское отделение
630090, г. Новосибирск, ул. Терешковой, 30

Поступила в редакцию 2.04.2019 г.

В работе дан краткий обзор результатов, полученных в ИОА СО РАН с 2010 по 2019 г., по проблемам атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности и оптической связи на рассеянном лазерном излучении в оптическом диапазоне длин волн в атмосфере и под водой.

Ключевые слова: оптическая связь на рассеянном лазерном излучении, метод Монте-Карло, полевые эксперименты; optical communication based on scattered laser radiation, Monte Carlo method, field experiments.

Введение

В статье представлены результаты исследований за последние пять лет по двум научным направлениям в ИОА СО РАН. Первое связано с применением спутниковых средств пассивного зондирования земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Его цели были сформулированы академиком В.Е. Зуевым при определении тематики фундаментальных исследований ИОА СО РАН.

Второе направление — оптическая связь на рассеянном лазерном излучении в атмосфере и водной среде. Теоретические и экспериментальные работы в этом направлении были начаты по нашей инициативе в лаборатории распространения оптических сигналов и в настоящее время входит в Программу фундаментальных исследований Института проектом № 0368-2016-0003 «Прямые и обратные задачи зондирования атмосферы и земной поверхности, атмосферная коррекция и коммуникационные опто-электронные системы на рассеянном лазерном излучении».

* Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Марина Владимировна Энгель (angel@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yuri@iao.ru); Анна Викторовна Зимовая (avk@iao.ru); Владимир Николаевич Абрамочкин (ya.wna@yandex.ru); Егор Сергеевич Познахарев (724_pes1992@iao.ru); Андрей Васильевич Федосов (Fea.2010@yandex.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев (zoxu1@iao.ru).

Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн

В [1, 2] рассмотрены основные результаты, полученные в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН в этом направлении до 2009 г. Акцент в работах сделан на результатах исследований, связанных с созданием программно-информационных средств, которые позволяют учесть влияние атмосферы на характеристики световых потоков, измеряемые с помощью опто-электронных приборов космического или авиационного базирования.

Атмосферная компонента изображения может рассматриваться как полезный сигнал, если речь идет о восстановлении из спутниковых измерений состава и характеристик атмосферы, или как искажающий фактор, если целью пассивного зондирования являются характеристики земной поверхности или объектов, находящихся на ней или в атмосфере. Здесь и далее под атмосферной коррекцией понимается технология устранения из изображений радиационного «следа» атмосферы.

В 2010–2018 гг. исследования были направлены на создание алгоритмов восстановления спектральных коэффициентов отражения земной поверхности по данным ее спутникового пассивного зондирования в видимом и УФ-диапазонах длин волн с учетом сферичности и неоднородности системы «атмосфера–земная поверхность». Были предложены критерии разбиения изображений на изопланарные

области, исследовано влияние поляризации рассеянного солнечного излучения на точность восстановления коэффициентов отражения. Рассматривались не только горизонтально однородная и вертикально стратифицированная неоднородная аэрозольно-газовая атмосфера, но и случай горизонтально-неоднородной (разорванной) облачности в аэрозольно-газовой атмосфере. До 2017 г. эти работы проводились только на примерах обработки спутниковых изображений, получаемых зарубежными системами дистанционного зондирования Земли. С 2010 по 2015 г. в рамках программы совершенствования приборной базы институтов СО РАН была закуплена в США и передана ИОА наземная станция 2.4 XLB (Orbital Systems, LTD) для приема информации с некоторых из этих спутников.

Проблема атмосферной коррекции спутниковых изображений остается актуальной и в настоящее время. Только за последние 5 лет ей посвящены десятки публикаций.

С 2015 г. наши исследования были связаны с решением задачи раннего обнаружения малоразмерных тепловых аномалий на основе анализа спутниковых ИК-изображений земной поверхности (в частности, лесных пожаров). В авторитетных научных публикациях, в докладах на международных конференциях было показано, что созданные нами программно-информационные средства для раннего обнаружения малоразмерных тепловых аномалий не уступают используемым, например, в NASA.

В последние годы мы рассматривали более сложную обратную задачу пассивного зондирования – восстановление в видимом диапазоне длин волн коэффициентов отражения земной поверхности, под которыми понимаем здесь и далее их средние значения в пределах мгновенного угла поля зрения приемной системы, или, иначе, в пределах пикселя изображения.

В наших работах [3, 4] предложен новый алгоритм обращения в распределение коэффициентов отражения яркостной структуры световых потоков, формирующих спутниковые изображения земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах длин волн. Алгоритм создан для решения задачи в следующей постановке. На высоте h_d от сферической земной поверхности располагается пассивная спутниковая оптико-электронная система, ориентированная в направлении ω_d и ведущая наблюдение за участком земной поверхности. Земная поверхность – ламбертовская с неизвестным распределением коэффициента отражения. Пространственное разрешение оптического приемника считается постоянным в пределах наблюдаемой области. На верхнюю границу атмосферы падает поток солнечного излучения в направлении ω_{sun} . Требуется, зная оптические параметры атмосферы и значения интенсивности, измеренные спутниковой системой, восстановить коэффициент отражения r_{surf} .

Решение задачи строится следующим образом [3–5]. Интенсивность принимаемого спутниковой системой излучения I_{sum} состоит из интенсивностей

солнечной дымки I_{sun} – излучения Солнца, рассеянного в атмосфере и не отраженного земной поверхностью; I_0 – нерассеянного излучения, отраженного наблюдаемым участком земной поверхности; поверхностной дымки I_{surf} – рассеянного излучения, отраженного от земной поверхности и являющегося дополнительным источником ее освещения. Если считать, что в пределах пикселя поверхность однородна, а компоненты излучения меняются незначительно, и учитывать только дополнительную освещенность земной поверхности 1-й кратности, то для поиска r_{surf} необходимо решить нелинейную систему уравнений.

Решение системы распадается на два этапа. На первом этапе определяется величина $Q = r_{\text{surf}}E_{\text{sun}}$ из системы уравнений:

$$\begin{cases} I_{\text{sum}}(x_{w,1}, y_{w,1}) - I_{\text{sun}}(x_{w,1}, y_{w,1}) = \\ = \frac{Q_1 \mu_1}{\pi} \exp(-\tau_1) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,1}, \\ \dots \\ I_{\text{sum}}(x_{w,N}, y_{w,N}) - I_{\text{sun}}(x_{w,N}, y_{w,N}) = \\ = \frac{Q_N \mu_N}{\pi} \exp(-\tau_N) + \sum_{k=1}^N Q_k H_{k,N}; \\ H_{k,i} = \iint_{S_k} h_i(x'_w - x_{w,i}, y'_w - y_{w,i}) dx'_w dy'_w, \end{cases} \quad (1)$$

где μ – косинус угла между направлением на приемную систему и вертикалью в наблюдаемой точке поверхности; τ – оптическая длина трассы; h_i – функция размытия точки (ФРТ) канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -й точки; $H_{k,i}$ – интеграл по поверхности k -го пикселя от ФРТ канала формирования бокового подсвета при наблюдении i -го пикселя; E_{sun} – освещенность земной поверхности.

На втором этапе определяется коэффициент отражения из нелинейной системы:

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{E_0} = r_{\text{surf},1} \left(1 + \sum_{k=1}^N r_{\text{surf},k} \cdot H_k^{(1)} \right), \\ \dots \\ \frac{Q_N}{E_0} = r_{\text{surf},N} \left(1 + \sum_{k=1}^N r_{\text{surf},k} \cdot H_k^{(1)} \right); \\ H_l^{(1)} = \iint_{S_l} h_1(x'_w - x_w, y'_w - y_w) dx'_w dy'_w, \end{cases} \quad (3)$$

где $r_{\text{surf},i}$ – искомое значение коэффициента отражения в i -м пикселе изображения; h_1 – ФРТ канала формирования дополнительной освещенности; $H_l^{(1)}$ – интеграл по поверхности l -го пикселя от ФРТ канала формирования дополнительной освещенности.

Реализация подобного подхода требует существенных затрат машинного времени. Для ускорения расчетов мы предложили использовать ряд следующих приемов [6–9]. Первый – разбиение изображений на изопланарные зоны [6, 7], второй – ограничение размеров учитываемой области формирования бокового подсвета и области формирования дополнительной освещенности, создаваемой самой поверхностью [8], третий – аппроксимация некоторых составляющих интенсивностей излучения, приходящих на входной зрачок приемной системы из направления на наблюдаемую точку поверхности [9].

В [3, 4] нами показана эффективность алгоритмов, реализующих эти приемы, в сравнении с конкурирующими.

Следующий этап решения обратных задач пассивного спутникового зондирования земной поверхности был связан с исследованием возможности зондирования в просветах разорванной облачности. Некоторые результаты этих исследований упомянуты в работах [10, 11]. В [10] приведены результаты сравнения двух подходов при решении стохастического уравнения переноса: метода непосредственного моделирования траекторий фотонов в стохастической среде и предложенного Г.А. Титовым [12] метода замкнутых уравнений. Сравнение показало, что различие результатов вычислений может достигать 20–30%, однако в ряде случаев (при некоторых наборах начальных данных) отличие при всех баллах облачности ограничивается 5%.

В [10, 11] выполнен анализ зависимости интенсивности излучения, принимаемого спутниковой системой, от радиуса просвета в сплошном облачном поле. Расчеты методом Монте-Карло показали, что радиус просвета, при котором влияние облачности меньше 10%, меняется в зависимости от схемы наблюдения от 4 до 15 км.

Возможность использования параллельных вычислений методом Монте-Карло при атмосферной коррекции рассмотрена в [13] при моделировании восходящих световых потоков на верхней границе атмосферы. Показано, что затраты времени на проведение численных экспериментов сокращаются в число раз, почти равное количеству процессоров, производящих вычисления.

Влияние учета поляризации на точность восстановления отражательных свойств при пассивном спутниковом зондировании земной поверхности рассмотрено нами в [14, 15] при статистическом моделировании процесса формирования спутниковых изображений земной поверхности. Показано, что учет поляризации излучения при восстановлении коэффициентов отражения слабоотражающих поверхностей (например, растительность или водная поверхность) в коротковолновой части видимого диапазона может привести к значительным погрешностям и даже к отрицательным значениям коэффициентов отражения. То есть существуют ситуации, когда эффективная атмосферная коррекция невозможна без учета поляризации оптического излучения.

Наконец, важным отличием наших исследований и разработок от проводимых в предыдущие десятилетия является то, что мы первыми в России

(и в мире) приступили к созданию программно-информационных средств атмосферной коррекции изображений земной поверхности, полученных отечественными приборами «Сангур» и ГСА (спутник «Ресурс-П») и КМСС (спутник «Метеор-М»).

Оптическая связь на рассеянном или отраженном лазерном излучении

В последние десятилетия в мире стали развиваться оптические коммуникационные системы, основанные на использовании открытых каналов связи в безвоздушном пространстве, в атмосфере и водной среде, позволяющих передавать и принимать информационные потоки в пределах прямой видимости. За рубежом системы связи этого типа чаще называют системами LOS (Line of Sight). Полезный сигнал в них – нерассеянное оптическое излучение. Существуют коммерческие образцы таких оптико-электронных систем связи (ОЭСС), например модем PAVLight ET-4000.

Основное достоинство LOS-связи – высокоскоростная передача данных. Однако возможны ее прерывания, связанные с возникновением препятствий на линии распространения излучения и с «беганием пучка» по плоскости апертуры приемника, вызванным турбулентными пульсациями оптических характеристик в открытых каналах связи. Этих недостатков почти лишена оптическая связь вне прямой видимости. Системы такой связи за рубежом чаще называют системами NLOS, в отечественной литературе – бистатистическими или загоризонтными. Несмотря на то, что о возможности реализации такой связи сообщалось в научных публикациях еще в XX в. (например, [16]), теоретические и экспериментальные исследования продолжают в настоящее время.

Изучение оптической связи на рассеянном лазерном излучении в нашем институте началось по инициативе Б.Д. Борисова [17]. Перечислим некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований ОЭСС, полученные в ИОА СО РАН с 2015 г.

В [18] предложена новая эффективная версия алгоритма двойной локальной оценки в методе Монте-Карло. На основе этого алгоритма осуществлено статистическое моделирование передаточных свойств внешних бистатистических каналов ОЭСС с учетом оптической модели атмосферной (водной) среды и характеристик приемного блока оптического излучения [19, 20]. Данные статистических численных экспериментов позволили сделать вывод о том, что дальность действия бистатистических ОЭСС в атмосфере в видимом диапазоне длин волн может достигать сотен, в УФ-диапазоне – десятков километров. Скорость передачи данных составляет от $4 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$ Гц. В водной среде дальность действия бистатистических ОЭСС может достигать 100 м со скоростью передачи данных, лежащей в том же интервале частот, и зависит от геометрических характеристик и оптических свойств внешнего коммуникационного канала.

Для экспериментальных исследований мы создали лабораторные макеты бистатистических ОЭСС. Основные результаты этих экспериментов опубликованы в [21, 22] и сводятся к следующему. Базовая (расстояние источник – приемник) дальность действия макетов на длине волны излучения импульсного лазерного источника $\lambda = 510,6$ нм составила 70 км, в темное время суток при средней мощности излучения 12 Вт. В УФ-диапазоне при $\lambda = 255,3$ нм достигнута базовая дальность действия до 1 км в любое время суток; средняя мощность УФ-источника на два порядка меньше, чем в видимом диапазоне длин волн.

Полевые эксперименты в водной среде проведены на одном из озер Томской обл. Испытаны два лабораторных макета с источниками на $\lambda = 510,6$ и 445,0 нм. Средняя мощность излучения в начальной точке формирования бистатистических коммуникационных каналов при $\lambda = 510,6$ нм достигала 2,0–3,0 Вт, при $\lambda = 445,0$ нм – 13–20 мВт. Для оперативного контроля оптического состояния водной среды был создан и испытан в лабораторных и полевых условиях измеритель коэффициентов ее ослабления β_{ext} . В подводных экспериментах достигнута базовая дальность действия макетов ОЭСС на рассеянном лазерном излучении от 20 до 50 м.

В макетах бистатистических ОЭСС при экспериментах в атмосфере и в водной среде использованы фильтры Semrock FF01-442/42-25, FF01-257/12-25, LL01-514-12.5 и фотоэлектронные умножители ФЭУ-142, ФЭУ-84, УФК-4Г-2, УФК-4Г-4.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований соответствуют мировому уровню.

Заключение

В дальнейшем мы предполагаем направить основные усилия в исследованиях, связанных с проблемами атмосферной коррекции, на развитие программно-информационных средств с целью учета неламбертовости отражения (излучения) и рельефа земной поверхности, горизонтальной неоднородности оптических свойств атмосферы. Основным источником спутниковых данных для их тематической обработки будут отечественные системы ДЗЗ.

Планируется выявить общие закономерности в зависимостях характеристик качества коммуникационных каналов от оптико-геометрических условий функционирования бистатистических ОЭСС. С этой целью при интерпретации экспериментальных данных будут использоваться результаты оперативного контроля оптического состояния атмосферы, некоторые аспекты которого изложены в работах [23–25].

Особое внимание будет уделено теоретическому и экспериментальному изучению подводной беспроводной бистатистической связи в водных средах с различными оптическими свойствами.

Авторы благодарны директорам ИОА СО РАН Г.Г. Матвиенко и И.В. Пташнику за поддержку (в том числе финансовую) наших исследований и, прежде всего, полевых экспериментов. Благода-

рим В.В. Иванова за активное творческое участие на первом этапе создания лабораторных макетов бистатистических ОЭСС и проведения экспериментов в атмосфере и в водной среде [21, 22].

1. *Афонин С.В., Белов В.В.* Направления развития и результаты пассивного спутникового зондирования системы «атмосфера – земная поверхность» в Институте оптики атмосферы СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1031–1041.
2. *Белов В.В., Афонин С.В., Гриднев Ю.В., Протасов К.Т.* Пассивное спутниковое зондирование земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 945–949.
3. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 622–627; *Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Software package for reconstructing reflective properties of the Earth's surface in the visible and UV ranges // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.
4. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* О точности и быстродействию RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 564–571; *Belov V.V., Tarasenkov M.V.* On the accuracy and operation speed of RTM algorithms for atmospheric correction of satellite images in the visible and UV ranges // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 1. P. 54–61.
5. *Belov V.V., Tarasenkov M.V.* Estimation of the error of the algorithm for reconstructing the reflection coefficient of the Earth surface on the example of images with the low atmospheric turbidity // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. CID: 9680 1Q. [9680-157-185].
6. *Белов В.В.* Передаточные свойства внешних каналов и изопланарность изображений в системах видения. // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 12. С. 1101–1107; *Belov V.V.* Optical transfer properties of external channels and image isoplanarity in vision systems // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 81–87.
7. *Belov V.V., Blaunshstein N., Kopeika N., Matvienko G.G., Nosov V.V., Sukhanov A.Ya., Tarasenkov M.V., Zemlyanov A.A.* Optical waves and laser beams in the irregular atmosphere / N. Blaunshstein, N. Kopeika (eds.). BocaRaton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2017. 334 p.
8. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 371–377; *Belov V.V., Tarasenkov M.V.* Statistical modeling of the point spread function in the spherical atmosphere and a criterion for detecting image isoplanarity zones // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 441–447.
9. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П.* Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 294–297.
10. *Кирнос И.В., Тарасенков М.В., Белов В.В.* Сравнение двух статистических подходов к решению стохастического уравнения переноса излучения // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 12. С. 89–92.
11. *Belov V.V., Kirnos I.V., Tarasenkov M.V.* Estimation of the influence of cloudiness on the Earth observation from space through a gap in a cloudy field // Proc. SPIE. 2015. V. 9680, N 96801V. DOI: 10.1117/12.2205761.

12. Titov G.A., Zhuravleva T.B., Zuev V.E. Mean radiation fluxes in the near-ir spectral range: algorithms for calculation // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102, N 2. P. 1819–1832.
13. Кожевникова А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В. Параллельные вычисления при решении задач восстановления коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 172–174; Kozhevnikova A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V. Parallel computations for solving problems of the reconstruction of the reflection coefficient of the Earth's surface by satellite data // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 326–328.
14. Zimovaya A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V. Estimate of the effect of polarization account on the reflection coefficient of the earth's surface for atmospheric correction of satellite data // Proc. SPIE. 2016. V. 10035, N 1003521. DOI: 10.1117/12.2249281.
15. Зимовая А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В. Влияние поляризации излучения на восстановление коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным в видимом диапазоне длин волн // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 927–932; Zimovaya A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V. Radiation Polarization Effect on the Retrieval of the Earth's Surface Reflection Coefficient from Satellite Data in the Visible Wavelength Range // Atmos. Ocean. Opt. 2018, V. 31, N 2. P. 131–136.
16. Пожидаев В.Н. Осуществимость линий связи ультрафиолетового диапазона, основанных на эффекте молекулярного и аэрозольного рассеяния в атмосфере // Радиотех. и электрон. 1977. Т. 22, № 10. С. 2190–2192.
17. Борисов Б.Д., Белов В.В. Влияние погодных условий на параметры короткого лазерного импульса, отраженного атмосферой // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 263–268; Borisov B.D., Belov V.V. Effect of Weather on the Parameters of Short Laser Pulses Reflected from the Atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 5. P. 411–416.
18. Белов В.В., Тарасенков М.В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования // Оптика атмосф. 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.
19. Тарасенков М.В., Познахареv Е.С., Белов В.В. Статистические оценки передаточных характеристик, предельных дальностей и скоростей передачи информации по импульсным атмосферным бистатистическим оптическим каналам связи // Светотехника. 2018. № 4. С. 37–42.
20. Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахареv Е.С. Статистическое моделирование характеристик подводной оптической связи на рассеянном излучении // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 4. С. 273–278.
21. Белов В.В. Оптическая связь на рассеянном или отраженном лазерном излучении // Светотехника. 2018. № 6. С. 6–12.
22. Абрамочкин В.Н., Белов В.В., Гриднеv 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.
23. Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Makeev A.П., Романовский О.А., Харченко О.В. Лидарный комплекс для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – стратосфере // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 764–770; Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Makeev A.P., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar Complex for Measurement of Vertical Ozone Distribution in the Upper Troposphere–Stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 702–708.
24. Гришин А.И., Крючков А.В. Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическим методами // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 156–159.
25. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Некоторые результаты натурных испытаний оптического измерителя осадков // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 330–334; Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Results of Optical Precipitation Gage Field Tests // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 545–547.

V.V. Belov, M.V. Tarasenkov, M.V. Engel, Yu.V. Gridnev, A.V. Zimovaya, V.N. Abramochkin, E.S. Poznakharev, A.V. Fedosov, A.N. Kudryavtsev. **Atmospheric correction of satellite images of the Earth surface in the optical wave length range. Optical communication based on scattered radiation.**

The results obtained at IAO SB RAS in 2010–2019 on problems of atmospheric correction of satellite images of the Earth surface and of optical communication based on scattered laser radiation in the optical wavelength range in the atmosphere and under water are briefly reviewed.