

Reconstruction of the Ground Surface Reflection Coefficients from the Data of Measurements with the “Resurs-P” and “Meteor-M” Satellites

Mikhail V. Tarasenkov, Vladimir V. Belov, Marina V. Engel, Yuriy V. Gridnev, Anna V. Zimovaya
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract: Results of reconstruction of the ground surface reflection coefficients from the data of measurements with “Sangur” and “GSA” devices placed on board the “Resurs-P” and with “MSU-100” device placed onboard the “Meteor-M” satellite are considered with allowance for signal distortion by the atmosphere.

Keywords: atmospheric correction, ground surface reflection coefficient, Monte Carlo method.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ РЕСУРС-П И МЕТЕОР-М

Тарасенков М.В., Белов В.В., Энгель М.В., Гриднев Ю.В., Зимовая А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Рассматриваются результаты восстановления коэффициентов отражения земной поверхности с учетом атмосферных искажений по спутниковым измерениям приборов Сангур и ГСА спутника Ресурс-П и прибора МСУ-100 спутника Метеор-М.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, коэффициент отражения земной поверхности, метод Монте-Карло.

Введение. В настоящий момент на орбите Земли функционирует ряд отечественных спутников дистанционного зондирования земной поверхности. Это Ресурс-П, Метеор-М, Канопус-В и Электро-Л. В своем составе эти спутники имеют разнообразную аппаратуру [1]. В частности на спутнике Ресурс-П размещены гиперспектральная аппаратура (ГСА), оптико-электронная аппаратура высокого разрешения (Геотон-Л1) и широкозахватная мультиспектральная аппаратура (ШМСА). На спутнике Канопус-В установлена панхроматическая съёмочная и многозональная съёмочная системы. Спутник Метеор-М содержит комплексы аппаратуры многозональной спутниковой съёмки (МСУ-50 и МСУ-100) и многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР). На спутниковой системе Электро-Л установлено многозональное сканирующее устройство (МСУ-ГС).

Одной из величин, характеризующей состояние и тип земной поверхности, является коэффициент отражения земной поверхности. Значение коэффициента отражения можно восстановить из спутниковых измерений путем решения обратной задачи. При этом во многих ситуациях решению обратной задачи должна предшествовать атмосферная коррекция – устранение из измерений искажающего влияния атмосферы. Решение этой задачи в комплексе состоит в построении модели атмосферы, решении уравнения переноса излучения относительно интенсивности излучения, формирующего принимаемый сигнал, и решении обратной задачи. По этому принципу построены активно развивающиеся и постоянно обновляющиеся алгоритмы атмосферной коррекции для спутниковых приборов MODIS [2], Polder [3], MISR [4] и др. Разработанный нами алгоритм [5,6] для снимков MODIS, учитывающий влияние неоднородности земной поверхности, также основан на решении обратной задачи.

В настоящий момент для отечественных спутниковых приборов нет стандартных продуктов, содержащих восстановленные коэффициенты отражения земной поверхности после атмосферной коррекции. В рамках настоящей статьи будут кратко рассмотрены результаты нашей работы по созданию алгоритмов и программ атмосферной коррекции данных отечественных спутниковых приборов Геотон-Л1 и ГСА спутника Ресурс-П и МСУ-10 спутника Метеор-М.

Исходные данные алгоритма. В качестве исходных данных использовались откалиброванные интенсивности излучения, регистрируемого от наблюдаемых пикселей, координаты пикселей, а также информация о взаимном расположении Солнца, приемника и наблюдаемого участка. Эти данные для приборов спутников Ресурс-П, Канопус-В и Метеор-М можно заказать через геопортал Роскосмоса [7]. Калибровочные константы и информация о взаимном расположении Солнца, приемника и наблюдаемого участка хранятся в файлах метадан-

ных соответствующего снимка. При работе с метаданными рассматриваемых приборов есть своя специфика. Так, для каждого прибора файл метаданных имеет свой формат и содержит свой набор данных, что требует создания процедур считывания метаданных отдельно для каждого прибора. Вторая особенность – метаданные снимков приборов Геотон-Л1 и ГСА содержат информацию для центра снимка, что допустимо в силу небольших пространственных размеров снимков. Третья особенность – взаимное положение приемника и наблюдаемого участка задается углом крена и азимутом направления движения спутника, а положение Солнца – зенитным углом Солнца и азимутом от направления на север. В отличие от этого, в стандартных продуктах MODIS, например, положение Солнца и спутника относительно каждого пикселя задается зенитным углом и азимутом от направления на север. Четвертой особенностью ряда каналов рассматриваемых приборов является то, что для этих спектральных интервалов существенно поглощение излучения атмосферой. На рисунке 1 приведены аппаратные функции для приборов Геотон и МСУ-100. На рисунке 2 для сопоставления приведено молекулярное пропускание атмосферы из [8]. Каналы ГСА существенно уже, чем каналы Геотона и МСУ-100 (таблица 1), но и среди них есть каналы, содержащие диапазоны длин волн с существенным молекулярным поглощением.

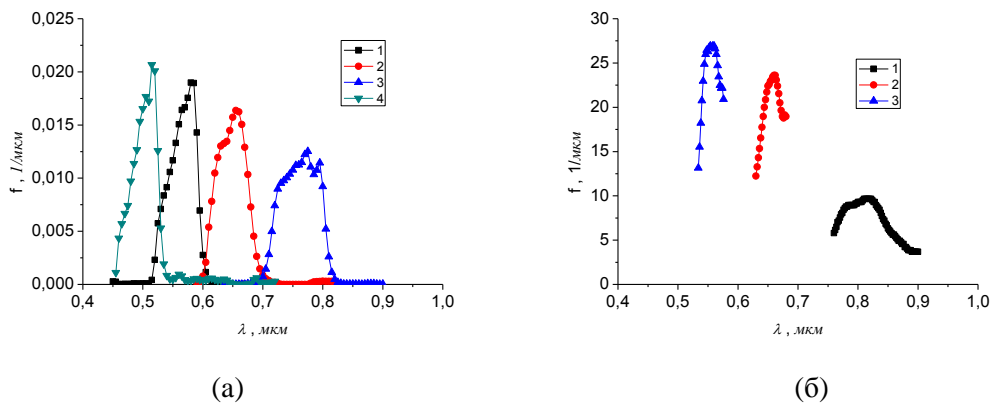


Рис. 1. Аппаратные функции каналов прибора Геотон-Л1 (а) и МСУ-100 (б).

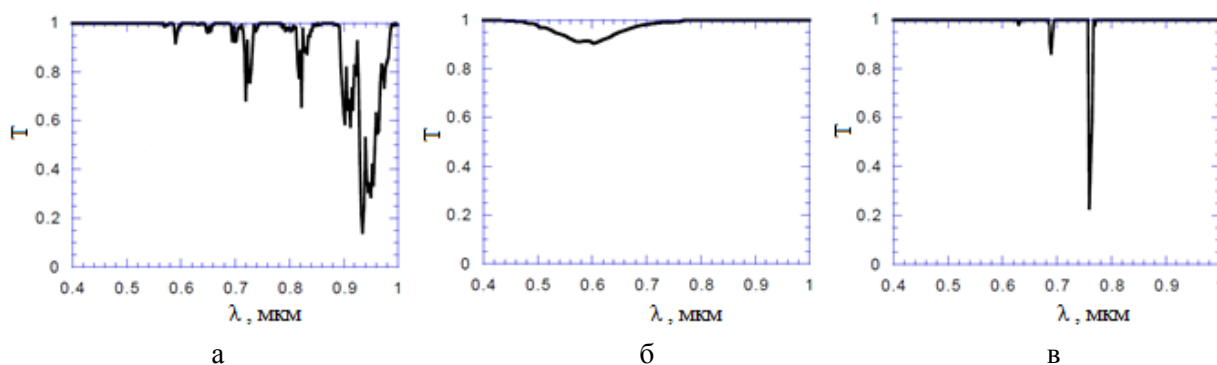


Рис. 2. Молекулярное пропускание $T(\lambda)$ для H_2O (а), O_3 (б) и O_2 (в) из [8].

Таблица 1. Значения центра $\lambda_{0,i}$ и ширин $\Delta\tilde{\lambda}_i$ спектральных диапазонов каналов прибора ГСА.

№ ка-нала	$\lambda_{0,i}, \text{нм}$	$\Delta\tilde{\lambda}_i, \text{нм}$	№ ка-нала	$\lambda_{0,i}, \text{нм}$	$\Delta\tilde{\lambda}_i, \text{нм}$	№ ка-нала	$\lambda_{0,i}, \text{нм}$	$\Delta\tilde{\lambda}_i, \text{нм}$
7	431,63	3,94	46	575,82	4,09	88	771,61	5,79
8	435,62	4,09	47	579,91	4,19	89	777,45	5,99
9	439,75	4,23	48	584,1	4,31	90	783,49	6,19

10	444,02	4,36	49	588,4	4,42	91	789,73	6,41
11	448,43	4,5	50	592,82	4,54	92	796,2	6,64
12	452,98	4,65	51	597,36	4,66	93	802,9	6,88
13	457,68	4,8	52	602,02	4,78	94	809,84	7,14
14	462,54	4,97	53	606,81	4,91	95	817,05	7,41
15	466,71	3,42	54	611,72	5,05	96	822,63	3,81
16	470,15	3,51	55	616,77	5,18	97	826,44	3,89
17	473,68	3,6	56	621,95	5,32	98	830,33	3,96
18	477,31	3,71	57	627,27	5,46	99	834,3	4,04
19	481,05	3,82	59	632,73	5,61	100	838,34	4,12
20	484,9	3,95	61	638,34	5,76	101	842,46	4,2
21	488,89	4,09	63	644,1	5,92	102	846,66	4,29
22	493,01	4,24	64	649,22	6,28	103	850,95	4,37
23	497,29	4,4	65	654,77	4,88	104	855,32	4,46
24	501,73	4,57	66	659,7	5,01	105	859,78	4,55
25	506,35	4,76	67	664,75	5,14	106	864,34	4,64
26	511,16	4,97	68	669,93	5,27	107	868,98	4,74
27	514,9	2,57	69	675,24	5,39	108	873,72	4,84
28	517,46	2,62	70	680,67	5,52	109	878,56	4,94
29	520,09	2,68	71	686,23	5,65	110	883,5	5,04
30	522,77	2,75	72	691,92	5,78	111	888,53	5,14
31	525,52	2,81	73	697,75	5,93	112	893,68	5,25
32	528,33	2,88	74	703,74	6,09	113	898,93	5,36
33	531,2	2,95	75	708,85	4,16	114	904,28	5,47
34	534,15	3,02	76	713,02	4,24	115	909,75	5,58
35	537,16	3,09	77	717,28	4,33	116	915,34	5,7
36	540,26	3,17	78	721,63	4,42	117	921,04	5,82
37	543,42	3,25	79	726,07	4,52	118	926,86	5,94
38	546,67	3,33	80	730,62	4,63	119	932,8	6,07
39	550	3,41	81	735,27	4,74	120	938,87	6,19
40	553,41	3,5	82	740,04	4,86	121	945,06	6,32
41	556,91	3,59	83	744,94	4,99	122	951,38	6,46
42	560,5	3,68	84	749,97	5,13	123	957,84	6,59
43	564,18	3,78	85	755,14	5,28	124	964,43	6,73
44	567,96	3,88	86	760,46	5,44			
45	571,84	3,98	87	765,95	5,61			

Помимо этого, при формировании модели атмосферы, используемой в алгоритме восстановления, использовались спутниковые данные MODIS об аэрозольной оптической толщине атмосферы (АОТ) τ_A на длинах волн $\lambda=0.47, 0.55$ и 0.66 мкм, профили температур T и давления P , значение общего содержания водяного пара W_{H_2O} и общего содержания озона W_{O_3} для участков и времени измерения, максимально близкими к рассматриваемым. При задании профилей молекулярного поглощения использовались также сечения поглощения O_2 , O_3 и H_2O для широкого набора температур и давлений [9,10]. Для задания профилей молекулярного рассеяния использовались данные из [11] о коэффициентах молекулярного рассеяния при нормальных условиях. При задании профилей аэрозольных коэффициентов исполь-

зовались модели аэрозоля LOWTRAN-7 [12]. Значения солнечных постоянных выбирались из работы [13].

Алгоритм восстановления коэффициентов отражения. Алгоритм восстановления коэффициентов отражения состоит из двух этапов: 1) построение модели атмосферы, 2) атмосферная коррекция.

Процедура построения модели атмосферы сводится к следующему:

1) По спутниковым измерениям АОТ при $\lambda=0.47, 0.55$ и 0.66 мкм с помощью метода наименьших квадратов определяется параметр Ангстрема A . Тогда АОТ на длине волны λ приближенно оценивается как:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_A(0.55) \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^A, \quad (1)$$

где $\tau_A(0.55)$ – АОТ при $\lambda=0.55$ мкм.

2) Среди моделей LOWTRAN-7 подбирается модель наиболее близкая по $\tau_A(0.55)$. Исходя из этой модели, находятся профили индикатрис аэрозольного рассеяния и коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния:

$$\sigma_{t,a}(i, l) = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{\sigma}_{t,a}(\lambda_{ij}, l) f_{ij} \Delta \lambda_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_j}, \quad (2)$$

$$\sigma_{s,a}(i, l) = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{\sigma}_{s,a}(\lambda_{ij}, l) f_{ij} \Delta \lambda_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_j}, \quad (3)$$

$$g_a(i, l, \cos \gamma_k) = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{g}_a(\lambda_{ij}, l, \cos \gamma_k) f_{ij} \Delta \lambda_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_j}, \quad (4)$$

где $\sigma_{t,a}(i, l)$, $\sigma_{s,a}(i, l)$, $g_a(i, l, \cos \gamma_k)$ – значение коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния и индикатрисы аэрозольного рассеяния в i -м канале прибора в l -м слое атмосферы; γ_k – k -й угол рассеяния; $\tilde{\sigma}_{t,a}(\lambda_{ij}, l)$, $\tilde{\sigma}_{s,a}(\lambda_{ij}, l)$, $\tilde{g}_a(\lambda_{ij}, l, \cos \gamma_k)$ – значения аэрозольных параметров из модели LOWTRAN-7; $\Delta \lambda_j$ – шаг по длине волны, с которым заданы аппаратные функции; f_{ij} – значение аппаратной функции в i -м канале на j -й длине волны.

3) Исходя из профилей T и P и аппаратной функции канала, определяется профиль коэффициента молекулярного рассеяния:

$$\sigma_{s,m}(i, l) = \frac{\sum_{j=1}^N \tilde{\sigma}_{s,m}(\lambda_{ij}, l) f_{ij} \Delta \lambda_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_j}, \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}_{s,m}(\lambda_{ij}, l) = \sigma_{s,m0}(\lambda_{ij}) \frac{P(l)}{P_0} \frac{T_0}{T(l)}, \quad (6)$$

где $\sigma_{s,m}(i, l)$ – коэффициент молекулярного рассеяния для i -го канала прибора в l -м слое атмосферы; $\tilde{\sigma}_{s,m}(\lambda_{ij}, l)$ – коэффициент молекулярного рассеяния на длине волны λ_{ij} ; $\sigma_{s,m0}(\lambda_{ij})$ – коэффициент молекулярного рассеяния на длине волны λ_{ij} при нормальных условиях ($P_0 = 1013$ ГПа, $T_0 = 273.1$ К); $P(l)$ – давление в l -м слое; $T(l)$ – температура в l -м слое.

4) Исходя из величины W_{O_3} и профиля счетной концентрации молекул озона из моделей LOWTRAN-7, создается профиль счетной концентрации молекул озона:

$$n_{O_3,l} = \tilde{n}_{O_3,l} \frac{N_{O_3}}{N_{O_3}}, \quad (7)$$

$$N_{O_3} = \frac{W_{O_3} \cdot N_A}{V_m}, \quad (8)$$

где $n_{O_3,l}$ – счетная концентрация O_3 в l -м слое атмосферы; $\tilde{n}_{O_3,l}$ – счетная концентрация O_3 в l -м слое атмосферы для модели LOWTRAN-7; \tilde{N}_{O_3} – интегральное по слою атмосферы количество молекул для модели LOWTRAN-7; N_A – число Авогадро, V_m – молярный объем.

5) Создается профиль счетной концентрации молекул кислорода:

$$n_{O_2,l} = \frac{P_l V_{O_2,l} T_0 N_A}{P_0 T_l V_m}, \quad (9)$$

где P_l, T_l – давление и температура в l -м слое; $V_{O_2,l}$ – объемная концентрация O_2 ; T_0 и P_0 – температура и давление при нормальных условиях.

6) По спутниковым измерениям W_{H_2O} создается профиль счетной концентрации водяного пара:

$$n_{H_2O,l} = \begin{cases} \tilde{n}_{H_2O,l} \cdot \frac{N_{H_2O} - \tilde{N}_{H_2O,2}}{\tilde{N}_{H_2O}}, & z \leq 15 \text{ км} \\ \tilde{n}_{H_2O,l}, & z > 15 \text{ км} \end{cases}, \quad (10)$$

$$N_{H_2O} = \frac{W_{H_2O} N_A}{M_{H_2O}}, \quad (11)$$

где $\tilde{n}_{H_2O,l}$ – счетная концентрация H_2O в l -м слое атмосферы для модели LOWTRAN-7; \tilde{N}_{H_2O} – интегральное по слою атмосферы количество молекул для модели LOWTRAN-7; $\tilde{N}_{H_2O,2}$ – интегральное по слою атмосферы выше 15 км количество молекул для модели LOWTRAN-7; N_{H_2O} – интегральное по слою атмосферы количество молекул; M_{H_2O} – молярная масса молекулы воды.

7) Задается профиль молекулярного поглощения с учетом аппаратной функции канала:

$$\sigma_{a,m}(i, l) = \left(n_{O_3,l} \frac{\sum_{j=1}^{N_1} k_{O_3}(P_l, T_l) f_{ij} \Delta \lambda_{ij}}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_{ij}} + n_{O_2,l} \frac{\sum_{j=1}^{N_2} k_{O_2}(P_l, T_l) f_{ij} \Delta \lambda_{ij}}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_{ij}} + n_{H_2O,l} \frac{\sum_{j=1}^{N_3} k_{H_2O}(P_l, T_l) f_{ij} \Delta \lambda_{ij}}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_{ij}} \right), \quad (12)$$

где $k_{O_3}(P_l, T_l)$, $k_{O_2}(P_l, T_l)$, $k_{H_2O}(P_l, T_l)$ – сечения поглощения O_3 , O_2 и H_2O при температуре T_l и давлении P_l соответственно; N_1, N_2, N_3 – количество длин волн сечений O_3 , O_2 и H_2O , для которых аппаратная функция i -го канала не равна 0.

8) Задается солнечная постоянная в канале прибора с учетом аппаратной функции:

$$\pi S_{\lambda,i} = \frac{\sum_{j=1}^N \pi \tilde{S}_{\lambda}(\lambda_{ij}) f_{ij} \Delta \lambda_j}{\sum_{j=1}^N f_{ij} \Delta \lambda_j}, \quad (13)$$

где $\pi S_{\lambda,i}$ – солнечная постоянная i -го канала прибора; N – количество длин волн, для которых аппаратная функция i -го канала не равна 0; $\pi \tilde{S}_{\lambda}$ – солнечная постоянная на длине волны λ_{ij} ; $\Delta \lambda_j$ шаг по длине волны в данных о солнечной постоянной.

Что касается алгоритма атмосферной коррекции, то снимки приборов Геотон, Сангур и МСУ-100 содержат на порядок больше пикселей, чем снимки MODIS. Поэтому выполнить расчет, с помощью алгоритма из [5,6] для снимков этих приборов в настоящем виде не удалось. В качестве альтернативы была использована формула в приближении однородной поверхности вида:

$$r_{surf,n} = \frac{Q_n / E_0}{1 + \gamma_1 Q_n / E_0} \quad (14)$$

$$Q_n = \frac{I_{sum,n} - I_{sun,n}}{\frac{1}{\pi} T_n + I_{dif,n}} \quad (15)$$

где $r_{surf,n}$ – коэффициент отражения n -го наблюдаемого пикселя; E_0 – освещенность земной поверхности без учета вклада отраженного излучения; γ_1 – сферическое альbedo атмосферы; $I_{sum,n}$ – интенсивность суммарного принимаемого излучения; $I_{sun,n}$ – интенсивность излучения, не взаимодействовавшего с земной поверхностью; T_n – прямой коэффициент пропускания от наблюдаемого пикселя до приемной системы; $I_{dif,n}$ – интенсивность рассеянного излучения от поверхности при ее единичной светимости.

Величины E_0 , γ_1 , $I_{sun,n}$, $I_{dif,n}$ определяются разработанными программами метода Монте-Карло для сферической системы атмосфера-земная поверхность. Основные принципы метода Монте-Карло изложены в таких работах как [14].

Пример апробации алгоритма. В качестве примера рассмотрим результаты восстановления коэффициентов отражения земной поверхности для прибора МСУ-100. Для оценки возможностей разработанного комплекса программ рассматривалось 10 снимков, содержащих три тестовых участка, покрытых хвойными лесами: 1) Иркутская область 52.52° с.ш., 105.06° в.д., даты измерений 07.05.2017, 12.06.2017, 22.06.2017 г. (рисунок 3а); 2) Московская область 55.85° с.ш., 37.83° в.д., даты измерений 03.05.2017, 14.05.2017, 25.07.2016, 30.07.2016 г. (рисунок 3б); 3) Томская область 56.5° с.ш., 84.3° в.д., даты измерений 02.08.2017, 13.06.2017, 27.08.2017 г. (рисунок 3в). На рисунке 4 приведен пример полученного распределения коэффициента отражения по земной поверхности.

Для оценки погрешности восстановления коэффициентов отражения на рассматриваемых участках были выбраны 3 тестовые точки (по одной на каждом участке) в центре областей, покрытых хвойными лесами: 1) точка на территории Томского государственного природного заказника 56.2° с.ш., 84.3° в.д., 2) точка в Национальном парке «Лосиный остров» 58.85° с.ш., 37.83° в.д., 3) точка в государственном природном заказнике «Красный Яр» 52.52° с.ш. 105.06° в.д. Погрешность оценивалась как отличие от эталонных наземных измерений. В качестве эталона были взяты измерения из [15]. Значения коэффициентов отражения земной поверхности, с которыми выполнялось сравнение, приведены в таблице 2.

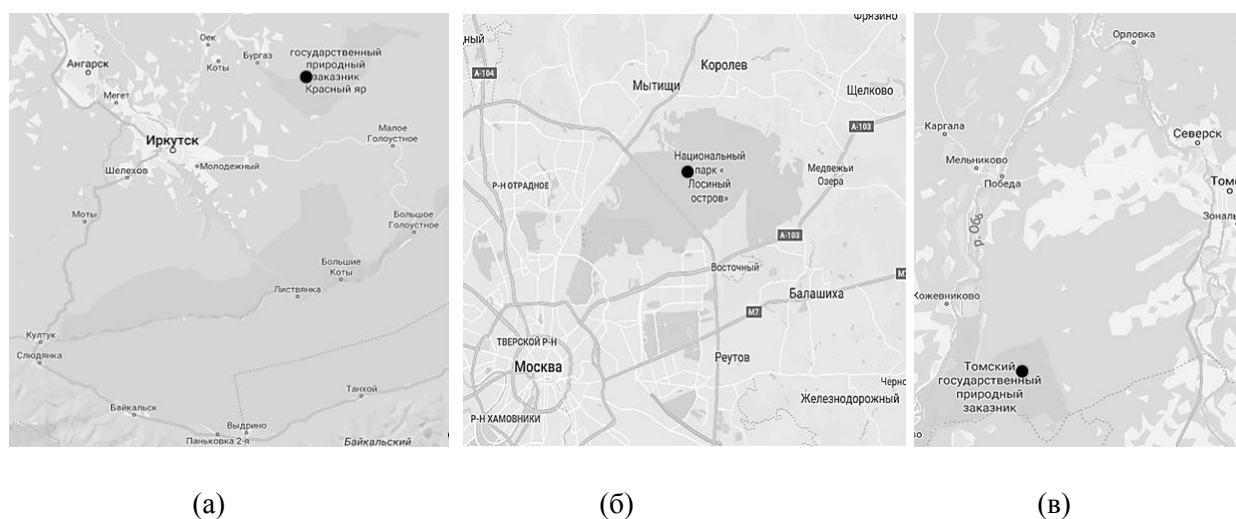


Рис. 3. Расположения тестовых участков для снимков прибора МСУ-100 спутника Метеор-М. (а) – Иркутская область, (б) – Московская область, (в) – Томская область.

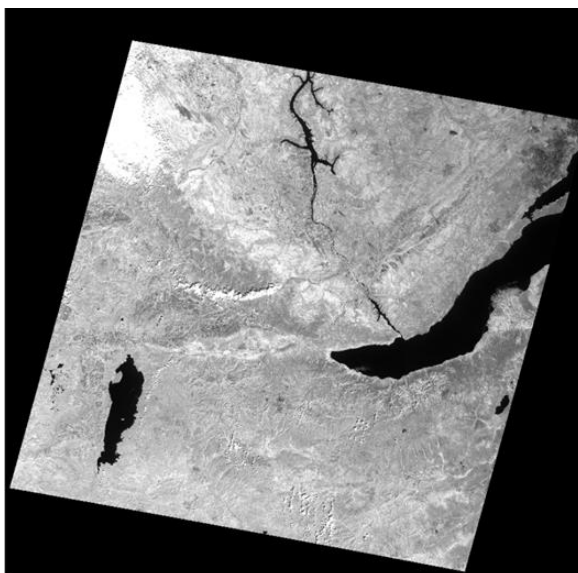


Рис. 4. Восстановленные по данным первого канала МСУ-100 коэффициенты отражения земной поверхности для участка Иркутской области дата измерений 07.05.2017 г.

Таблица 2. Значения коэффициентов отражения r_{surf} для трех каналов МСУ-100, которые использовались как эталонные.

№ канала	r_{surf}
1	0.30487
2	0.04838
3	0.04742

В таблице 3 приведены оценки средних по рассматриваемым снимкам погрешностей восстановления коэффициентов отражения для снимков МСУ-100.

Анализ результатов показывает, что полученные коэффициенты отражения МСУ-100 правдоподобны и могут использоваться для широкого круга задач, где полученная погрешность допустима. Что касается снимков приборов ГСА и Геотон-Л, выполненные оценки также показывают их пригодность для решения широкого круга задач.

Таблица 3. Средние погрешности восстановления коэффициентов отражения земной поверхности $\overline{\Delta r_{surf}}$ относительно эталонных значений [15] для трех тестовых участков для данных прибора МСУ-100.

Тестовый участок	№ канала	$\overline{\Delta r_{surf}}$
Иркутская область	1	0,055
Иркутская область	2	0,012
Иркутская область	3	0,034
г. Москва	1	0,072
г. Москва	2	0,018
г. Москва	3	0,005
Томская область	1	0,100
Томская область	2	0,024
Томская область	3	0,020

Заключение. Разработанный комплекс программ позволяет в рамках приближения однородности земной поверхности по измерениям спутниковых приборов ГСА, Геотон-Л и МСУ-100 с дополнительным привлечением данных MODIS о параметрах атмосферы восстанавливать коэффициенты отражения земной поверхности с учетом атмосферных искажений. Оценка погрешностей показывает приемлемость (в смысле достоверности) результатов обработки с помощью созданного нами программного комплекса данных отечественных спутниковых ДЗЗ и целесообразность его использования для решения практических задач.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] www.ntsomz.ru
- [2] Breon FM., Vermote E. Correction of MODIS surface reflectance time series for BRDF effects // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 125. P. 1-9.
- [3] Leroy M., Deuzé J., Bréon F., Hautecoeur O., Herman M., Buriez J., Tanré D., Bouffies S., Chazette P., Roujean J. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 17023–17037.
- [4] Diner D.J., Martonchik J.V., Borel C., Gerstl S.A.W., Gordon H.R., Knyazikhin Y., Myneni R., Pinty B., Michel V.M. Multi-Angle Imaging Spectro-Radiometer Level 2 Surface Retrieval Algorithm Theoretical Basis; Jet Propulsion Laboratory: La Cañada Flintridge, CA, USA, 2008.
- [5] Тарасенков М.В., Белов В.В. Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 07. С. 622-627.
- [6] Tarasenkova M.V., Belov V.V., Engel M.V. Algorithm for reconstruction of the Earth surface reflectance from Modis satellite measurements in a turbid atmosphere // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10833. CID: 10833 16 [10833-58].
- [7] Геопортал Роскосмоса: <https://gptl.ru/>
- [8] Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. [http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_mod08.pdf].
- [9] hitran.iao.ru
- [10] <http://www.iup.uni-bremen.de/gruppen/molspec/databases/referencespectra/o3spectra2011/index.html>
- [11] Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // Applied optics. 1995. V. 34. № 15. P. 2765-2773.
- [12] Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A. Clough S.A., Gallery W.O. User guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177.ERP 2010 / Hansom AFB. MA 01731. 137 p.
- [13] Gueymard C.A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models // Solar Energy. 2004. No.76. P. 423-453.
- [14] 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, Сибирское отделение. 1976. 284 с.
- [15] Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. Ленинград: Издательство Академии Наук СССР. 1947. 271 с.