



ОБЪЕКТИВЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ

А.В.Медведев, ОАО "РОМЗ" *design@romz.ru*,
Ростов;
А.В.Гринкевич, ЗАО "ЭВС", *lyu1455@yandex.ru*,
Москва;
С.Н.Князева, ОКБ ОАО "РОМЗ", *ksn-61@yandex.ru*,
Ростов

Технические решения при создании объективов для дистанционного космического зондирования Земли определяют качество передаваемой геоинформации. В статье рассмотрены идеологические подходы к конструкциям оптических схем объективов гиперспектральной съёмочной аппаратуры наблюдения и регистрации. Описаны условия применения объективов различных классов в аппаратуре спутниковых систем.

Основным источником данных для геоинформационных систем служат результаты дистанционного космического зондирования. Орбитальные космические спутники на основе гарантированных контрактов обеспечивают информацией государственные структуры. Бурное развитие вычислительной техники привело к высокому спросу на космическую информацию [1]. При этом компании-операторы в коммерческих целях используют часть ресурса (около 50%) для формирования космических изображений сверхвысокого разрешения. Точность географической привязки и детальность получаемых изображений позволяют формировать на их основе карты и планы крупного масштаба. Хотя ранее это можно было осуществить только с использованием аэрофотосъёмки.

Сегодня с помощью российских космических аппаратов "Ресурс-П" № 1 и № 2 впервые осуществляется детальное широкополосное гиперспектральное оптико-электронное наблюдение земной поверхности [2].

Дешифрирование и определение, например вида и состояния растительности, иденти-

LENSES OF HYPERSPECTRAL VIDEO RECORDING INSTRUMENTS OF SATELLITE SURVEILLANCE AND RECORD SYSTEMS

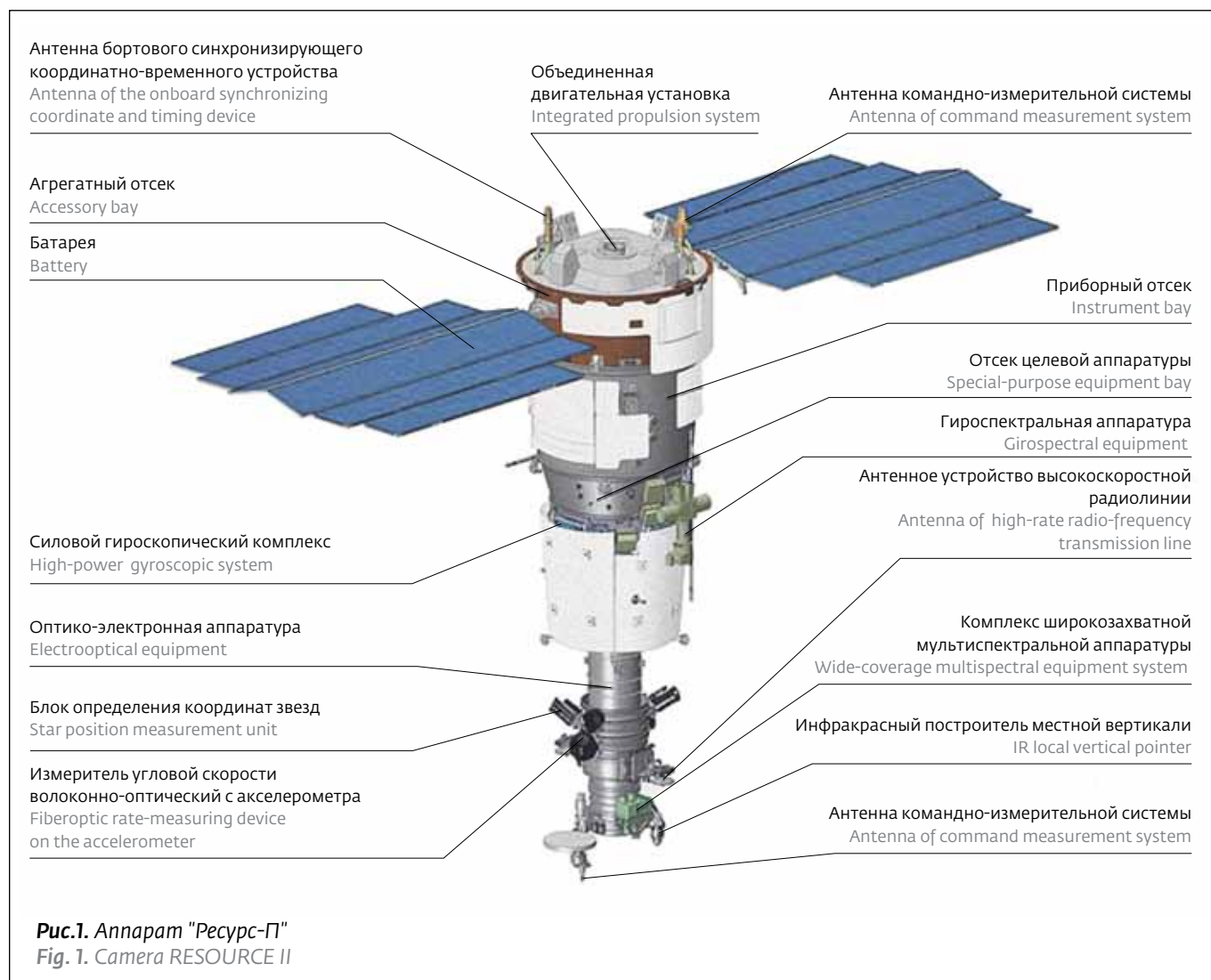
A.V. Medvedev, OJSC "ROMZ", *design@romz.ru*,
Rostov;
A.V. Grinkevich, CJSC "EVS", *lyu1455@yandex.ru*,
Moscow;
S.N. Knyazeva, Experimental Design Bureau of OJSC
"ROMZ", *ksn-61@yandex.ru*, Rostov

During the development of lenses for remote space sensing of Earth, the technical solutions determine the quality of transmitted geo-information. Ideological approaches to the constructions of optical arrangement of lenses of hyperspectral surveying instruments for surveillance and recording are considered in the article. Conditions of use of the lenses of difference categories in the equipment of satellite systems are described.

Results of remote space sensing serve as the main source of data for geo-information systems. Orbital space satellites on the basis of guaranteed contracts provide information to the state agencies. Rapid development of computer engineering resulted in high demand for the space information [1]. At the same time, the companies-operators use part of the resource (about 50%) for commercial purposes in order to generate the space images with ultrahigh resolution. Accuracy of geographic reference and degree of detail of obtained images allow forming the map and plans with large scale on their basis. However, previously it was possible only with the use of aerophotography.

Nowadays, using the Russian spacecrafts "Resurs-P" No. 1 and No. 2 the detailed broad-band hyperspectral electrooptical observation of earth surface is performed for the first time [2].

For example, deciphering and determination of type and state of vegetation, soil identification, structure of contamination film on the surface of water refer to the short list of activities, which can be performed by hyperspectral space photographs. The peculiarity of hyperspectral video recording equipment of the spacecrafts "Resurs-P" consists



фикация почвы, состава пленки загрязнения на поверхности воды – вот лишь небольшой перечень задач, которые позволяют выполнить гиперспектральные космические снимки. Особенность гиперспектрального съемочного оборудования аппаратов "Ресурс-П" заключается в возможности проведения одновременной съемки одного и того же участка земной поверхности в нескольких узких спектральных диапазонах от 0,4 до 1,1 мкм. Это позволяет получать высокоинформативные изображения земной поверхности для решения задач заказчиков – Минприроды России, МЧС России, Россельхоза, Росрыболовства, Росгидромета и др. (рис.1).

Аппараты "Ресурс-П" не уступают по качеству информации, получаемой с аналогичной аппаратуры Ikonos 2 (США) и Pleiades (Франция). Сравнительная оценка панхроматических снимков, полученных с этих аппаратов, подтверж-

in the capability of simultaneous surveying of the same section of earth surface within several narrow spectral ranges from 0.4 to 1.1 μm . It allows obtaining the high-informative images of earth surface for the solution of the tasks of customers: Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal Agency for Fishery, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia etc. (Fig. 1).

The spacecrafts "Resurs-P" are not inferior with respect to the information received from the analogous spacecrafts Ikonos 2 (USA) and Pleiades (France). The comparative evaluation of panchromatic photographs taken from these spacecrafts proves the absence of significant differences in their graphic and informative properties (Fig. 2).



Рис.2. Сидней, Австралия, фото с аппарата "Ресурс-П" № 2

Fig. 2. Sydney, Australia a photo made with camera RESOURCE No.2

дает отсутствие существенных различий в их изобразительных и информативных свойствах (рис.2).

Космические аппараты весьма эффективно решают следующие задачи:

- составление и обновление общегеографических, тематических и топографических карт;
- контроль загрязнения окружающей среды, экологический контроль в районах геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых, контроль водоохранных и заповедных районов;
- инвентаризация природных ресурсов (сельскохозяйственных и лесных угодий, пастбищ, районов морских промыслов), создание земельного кадастра и контроль хозяйственных процессов для обеспечения рациональной деятельности в различных отраслях хозяйства;
- информационное обеспечение поиска запасов нефти, природного газа, рудных и других месторождений полезных ископаемых;
- контроль застройки территорий, получение данных для инженерной оценки местности в интересах хозяйственной деятельности;
- информационное обеспечение для прокладки магистралей и крупных сооружений, автомобильных, железных дорог, нефте- и газопроводов, систем связи;
- оценка ледовой обстановки;
- наблюдение районов чрезвычайных ситуаций с целью мониторинга стихийных бедствий, аварий, катастроф, а также оценки их послед-

Spacecrafts solve the following tasks in very effective manner:

- compilation and update of general geographical, thematic and topographic maps;
- control of environmental contamination, ecological control in the regions of geological exploration works and mineral resources mining, control of water conservation and protected areas;
- inventory of natural resources (agricultural and forest lands, pastures, offshore operation areas), compilation of land cadastre and control of economical processes in order to ensure the rational activities in various sectors of economy;
- information provision of the search activities with respect to oil, natural gas resources, ore and other deposits of mineral resources;
- control of building development, obtainment of data for engineering evaluation of the area for the benefit of economic activities;
- information support for laying the mainlines and large-size buildings, motor roads, oil and gas pipelines, communication systems;
- evaluation of ice situation;
- surveillance of emergency areas for the purpose of monitoring of natural disasters, accidents, catastrophes and evaluation of their consequences and planning of remediation activities.

It is obvious that the number of tasks for future spacecrafts will be expanded. The technical solutions of optical schemes of the lenses intended for use in the systems of space surveillance have the crucial importance in ensuring the quality of information received from satellite systems [3]. In particular, they will allow maintaining the competitiveness of electrooptical instruments of the Russian spacecrafts in future, which are planned for launching in the years to come. Let us consider four types of optical schemes, application of which significantly expands the number of tasks made with respect to the satellites of remote Earth sensing.

One of these tasks consists in the study of lightning, specifically one of its new types, which was recorded for the first time entirely by accident in 1989 and received the name "sprite". Sprite refers to the rare type of lightning discharges, a certain likeness of lightning striking in mesosphere and thermosphere. It is difficult to distinguish between different sprites but it is well known that they occur during the period of heavy thunderstorm at the height of 50-130 kilometers (at the same time,

ствий и планирования восстановительных мероприятий.

Очевидно, что круг задач для будущих космических аппаратов будет расширяться. Определяющее значение в обеспечении качества информации, получаемой со спутниковых систем, приобретают технические решения оптических схем объективов, предназначенных для использования в системах космического наблюдения [3]. Именно они позволят в будущем сохранить конкурентоспособность оптико-электронной аппаратуры российских космических аппаратов, планируемых к запуску в ближайшие годы. Рассмотрим четыре типа оптических схем, применение которых значительно расширяет круг задач, возлагаемых на спутники дистанционного зондирования Земли.

Одна из таких задач – изучение молний, а конкретнее – одного из новых видов молний, впервые совершенно случайно зафиксированного в 1989 году и получившего название "спрайт". Спрайт – редкий вид грозовых разрядов, некое подобие молнии, бьющей в мезосфере и термосфере. Спрайты трудно различимы, но известно, что они появляются в сильную грозу на высоте от 50 до 130 км (при том, что высота образования "обычных" молний не более 16 км) и достигают до 60 км в длину и до 100 км в диаметре. Спрайты появляются через десятые доли секунды после удара очень сильной молнии и длятся менее 100 мс и чаще всего распространяются одновременно вверх и вниз, причем распространение вниз заметно больше и быстрее.

Спрайты многоцветны. Разница цветов объясняется различным давлением и составом атмосферы на разных высотах. На высоте 70 км азот дает красное свечение, а чем ближе к земле, тем больше давление и количество кислорода, и цвет спрайта меняется на синий, голубой и белый. До сих пор о физической природе спрайтов известно крайне мало. Фото, представленное на рис.3, показывает, как высоко могут подняться спрайты, и создается впечатление, что они, наряду с полярными сияниями, метеорами и серебристыми облаками, как бы прикасаются к краю околоземного пространства.

Учитывая наличие цветности у спрайтов, оптическая система, позволяющая проводить их регистрацию, должна иметь узкий рабочий спектральный диапазон. Из габаритных соображений его ширину целесообразно обеспечить встроенным интерференционным фильтром.



Рис.3. Спрайты над Бельгией (фото с МКС 14.08.2015)
Fig. 3. Sprites over Belgium. Photo made from International Space Station on Aug. 14th, 2015

the height of formation of "standard" lightning is not more than 16 kilometers) and reach up to 60 km in length and 100 km in diameter. Sprites occur in tenth fractions of second after the strike of very severe lightning and last for the period of less than 100 milliseconds; most often they propagate simultaneously upwards and downwards, and the propagation downwards is noticeably larger and faster.

Sprites are polychromatic. The difference between colors can be explained by the various pressure and composition of atmosphere at different heights. At the height of 70 km the nitrogen gives red luminescence, and the closer to earth the greater pressure and amount of oxygen are, and the color of sprite changes to blue, light blue and white. Up until now, we have very little information about the physical nature of sprites. The photograph given in Fig. 3 shows how high the sprites can rise, and

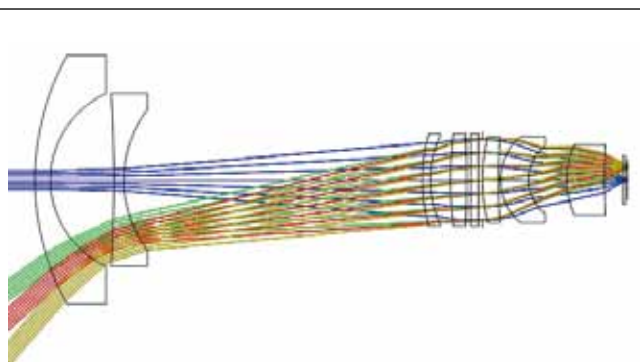


Рис.4. Схема широкоугольного объектива $F=9$ мм
Fig. 4. Layout of wide-angle lens, $F=9$ mm

Для решения этой задачи был рассчитан светосильный широкоугольный объектив (рис.4) со встроенным интерференционным фильтром, обеспечивающим рабочий спектральный диапазон от 0,7769 до 0,7779 мкм. Объектив имел фокусное расстояние $F=9$ мм, относительное отверстие 1:1 и угловое поле зрения 98° . Высокая светосила и необходимое качество изображения в представленном семилинзовом объективе достигаются применением способа чередования высоких и низких показателей преломления стекол. Конструктивные данные объектива приведены в таблице. Полученная схема с приведенными техническими характеристиками реализована с весовыми показателями в пределах 1070 г. Расчетные значения размеров кружков рассеяния и графики частотно-контрастных характеристик объектива приведены на рис.5 и 6.

Так как данный объектив относится к классу широкоугольных систем, весьма интересными с точки зрения обеспечения достоверности получаемой конечной картинки являются значения дисторсии. График дисторсии и кривизны поля показан на рис.7. Согласно полученным результатам, при расчете удалось достичь дисторсии, величина которой не превышает 27,9%. Что в принципе является классической величиной дисторсии для стоградусного объектива. Влияние такой дисторсии достаточно наглядно демонстрируют искажения, возникающие при передаче изображения квадрата (рис.8).

Не менее активно при ведении наблюдений с космических аппаратов используется

Конструктивные данные широкоугольного объектива
Constructive data of wide-angle objective

R, мм	D, мм	Марка стекла $N_{\lambda=0,7774 \text{ мкм}}$	Диаметр линз, мм
128,23	7,0	ЛК5 1,47305270	124
47,21			86
–	31,7	1,0	–
–651,6	5,0	ЛФ5 1,56603702	86
58,21			70
–	149,1	1,0	–
86,3	4,0	ТФ10 1,78686388	46
51,4			43
–	10	1,0	–
181,13	8	ZnS 2,31607373	46
–608,1			46
–	2	1,0	–
Плоскость	4	К8 1,51080178	46
Плоскость			46
–	2	1,0	–
96,36	8	ZnS 2,31607373	43
312,6			43
–	8	1,0	–
28,25	14	ЛК5 1,47305270	43
21,48			34
–	19	1,0	–
41,69	18,9	ZnS 2,31607373	35
312,6			35
–	9,04	–	–
Плоскость	1,5	К8 1,51080178 (защитное стекло) (Protective glass)	24
Плоскость			24
–	1,0	1,0	–
Плоскость	–	Плоскость изображения Image plane	–
$f' = 9,00$ мм	$2w = 100^\circ$	$D_{\text{вх.зр}} = 9,0$ мм	$\Delta\lambda = 0,7769 - 0,7779$ мкм

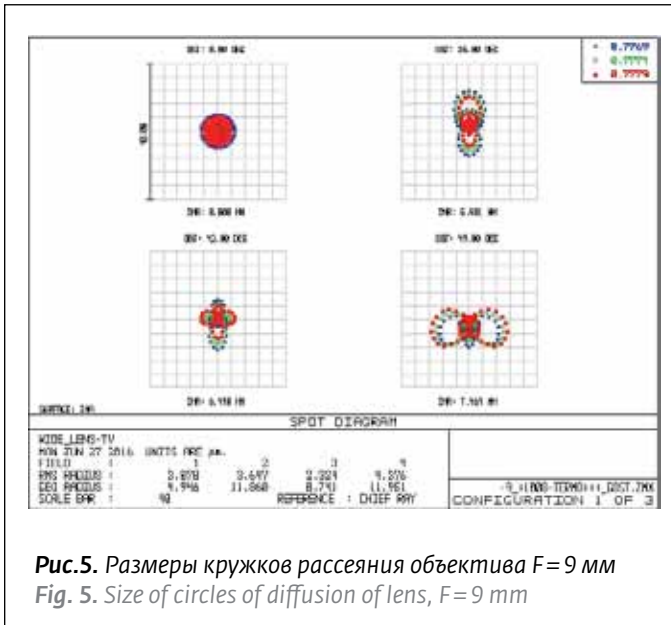


Рис.5. Размеры кружков рассеяния объектива F=9 мм
 Fig. 5. Size of circles of diffusion of lens, F=9 mm

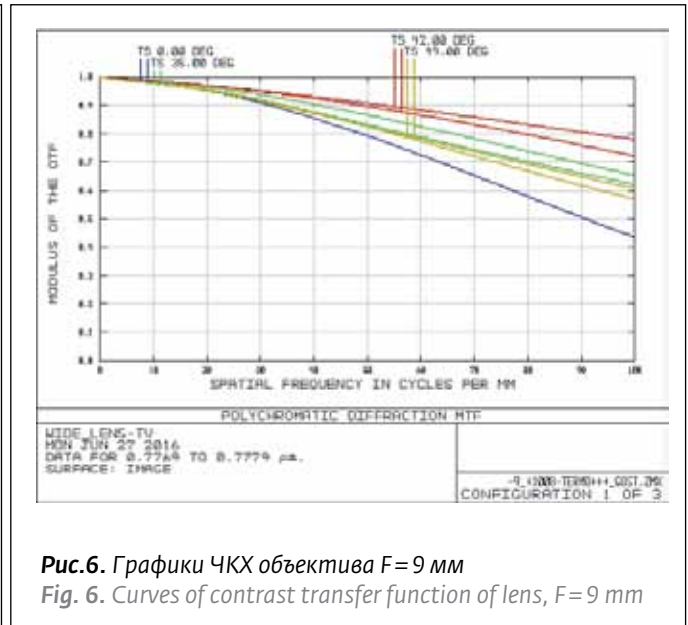


Рис.6. Графики ЧКХ объектива F=9 мм
 Fig. 6. Curves of contrast transfer function of lens, F=9 mm

средний и ИК-диапазоны длин волн, позволяющие проводить съемку сквозь дымку, туман, смог, пыль, дым и облака. Учитывая, что орбитальный аппарат может произвести повторную съемку одного и того же участка земной поверхности только с интервалом в три дня, актуальность такой задачи становится очевидной.

Для получения оперативной информации в неблагоприятных условиях космические аппараты оснащаются оптическими системами, работающими в различных спектральных диапазонах. Естественным стремлением при решении

it appears that together with aurora, meteors and noctilucent clouds they seem to touch the space edge.

Taking into account the presence of chromaticity in sprites, the optical system, which allows recording them, must have the narrow operating spectral range. Due to dimensions, it is reasonable to provide its width with built-in interference filter.

In order to solve this task, the high-aperture wide-angle lens (Fig. 4) with built-in interference filter, which provides the operating spectral range

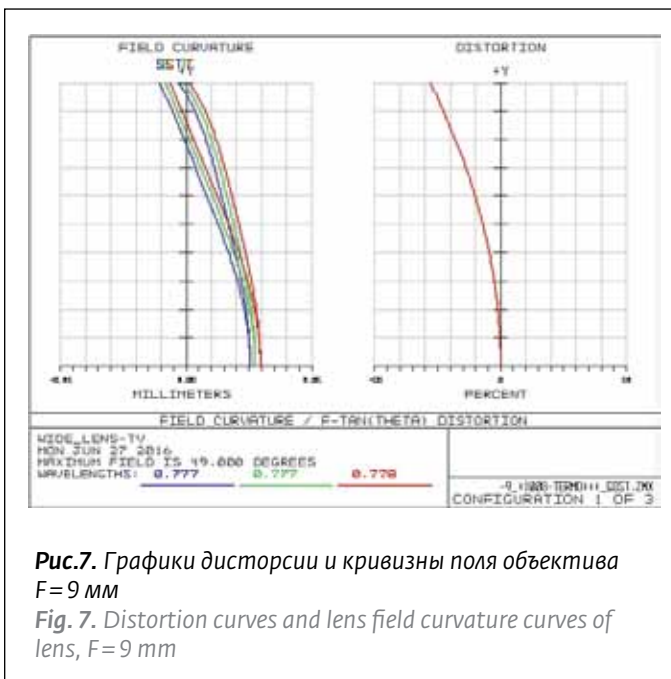


Рис.7. Графики дисторсии и кривизны поля объектива F=9 мм
 Fig. 7. Distortion curves and lens field curvature curves of lens, F=9 mm

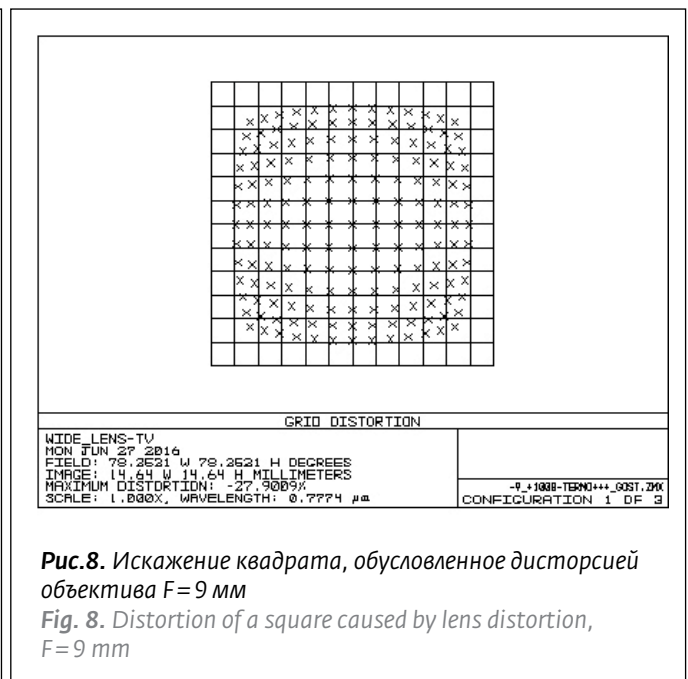


Рис.8. Искажение квадрата, обусловленное дисторсией объектива F=9 мм
 Fig. 8. Distortion of a square caused by lens distortion, F=9 mm

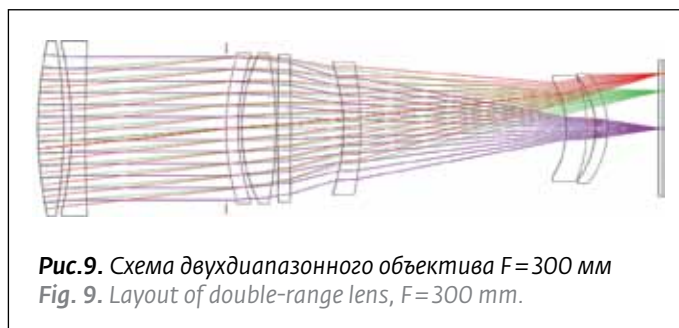


Рис.9. Схема двухдиапазонного объектива $F=300$ мм
Fig. 9. Layout of double-range lens, $F=300$ mm.

таких задач стало оснащение систем наблюдения не множеством объективов для работы в отдельных диапазонах спектра (видимом, ближнем, среднем или дальнем ИК-диапазоне), а объективами, способными работать в нескольких диапазонах.

Специально для этой цели был рассчитан двухдиапазонный 300-мм объектив (рис.9) с относительным отверстием 1:3,5 и рабочими спектрами $\Delta\lambda_1=(0,4-0,9)$ мкм и $\Delta\lambda_2=(1,5-1,7)$ мкм. Полученная схема с приведенными техническими характеристиками реализована с массовыми показателями в пределах 1680 грамм. Качественные характеристики двухдиапазонного объектива в каждом рабочем диапазоне представлены на рис.10-11. Следует отметить, что при расчете ЧКХ объектива приняты следующие весовые коэффициенты для различных длин волн рабочих диапазонов. В диапазоне $\Delta\lambda_1$: 0,4 мкм - 0,4; 0,5 мкм - 0,6; 0,6 мкм - 1; 0,7 мкм - 1; 0,8 мкм - 0,6; 0,9 мкм - 0,3. В диапа-

from 0.7769 to 0.7779 μm , was estimated. The lens had the focal distance $F=9$ mm, relative aperture 1:1 and angular field of view 98° . High light intensity and required quality of image in the suggested seven-lens objective are reached using the method of alternation of high and low refractive indices of glasses. Constructive data of the objective is given in table. Obtained scheme with specified technical characteristics is implemented with weight indices within the limits of 1070 g. Calculated values of sizes of confusions circles and graphs of frequency-contrast characteristics of the objective are given in Fig. 5 and 6.

Since this objective refers to the category of wide-angle systems, the distortion values are very interesting from the point of view of reliability of obtained final image. Graph of field distortion and curvature is shown in Fig. 7. According to the data obtained during calculations, it was managed to achieve the distortion, value of which does not exceed 27.9%. And in general this value is the classical distortion value for hundred-degree objective. Influence of such distortion can be demonstrated in quite graphic manner by the distortions, which occur during the transmission of square image (Fig. 8).

During the surveillance from spacecrafts, the medium and IR range of wavelengths is also actively used; it allows performing the recording through the haze, mist, smog, dust, smoke and clouds. Taking into account the fact that orbital spacecraft can perform the repeated recording of the same area

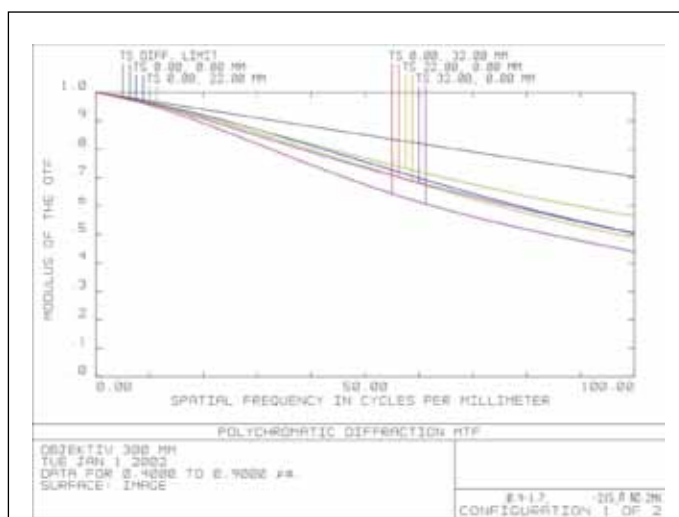


Рис.10. Графики ЧКХ объектива $F=300$ мм, $\Delta\lambda_1=(0,4-0,9)$ мкм
Fig. 10. Curves of contrast transfer function of lens, $F=300$ mm, $\Delta\lambda_1=(0,4-0,9)$ μm .

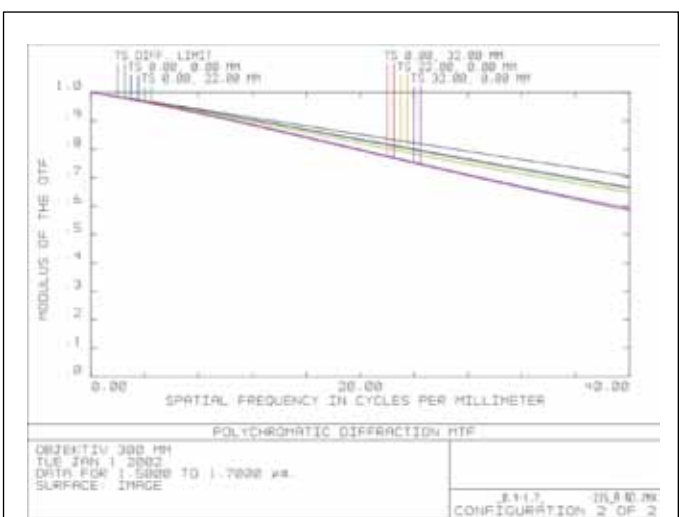


Рис.11. Графики ЧКХ объектива $F=300$ мм, $\Delta\lambda_2=(1,5-1,7)$ мкм
Fig. 11. Curves of contrast transfer function of lens, $F=300$ mm, $\Delta\lambda_2=(1,5-1,7)$ μm

зоне $\Delta\lambda_2$: 1,5 мкм - 0,5; 1,55 мкм - 0,7; 1,6 мкм - 1; 1,65 мкм - 0,7; 1,7 мкм - 0,5.

Главной особенностью такого объектива, работающего в спектральном диапазоне 400-1700 нм, является возможность определения состояния атмосферы, идентификации и фиксирования особых состояний земной поверхности, отдельные составляющие которых могут значительно влиять на качество изображения. Например, анализируя снимки, полученные с помощью такого объектива, можно белые облака отличить от снега и льда, а разные виды пыли и дыма в воздухе - от водяного пара.

Однако для более точной и эффективной коррекции снимков используют оптические системы другого класса - это длиннофокусные объективы малого поля зрения, предназначенные, как правило, для работы в одном из спектральных диапазонов.

Для решения таких задач в уже рассмотренных спектральных диапазонах $\Delta\lambda_1=(0,4-0,9)$ мкм и $\Delta\lambda_2=(1,5-1,7)$ мкм можно применить представленные ниже длиннофокусные объективы с фокусным расстоянием $F=440$ мм, относительным отверстием 1:3,28 и тем же линейным полем 64 мм. На рис.12 изображена оптическая схема варианта такого длиннофокусного объектива для спектра $\Delta\lambda=(0,4-0,9)$ мкм. Расчет сделан для комбинации марок стекол CaF_2 , СТК19, ЛК5 и ТФ10. Общая масса оптических деталей в полученной схеме не превышает 2960 г. Качественные характеристики длиннофокусного объектива при работе в спектральном диапазоне от 0,4 до 0,9 мкм представлены на рис.13. При расчете ЧКХ объектива для различных длин волн принимались следующие весовые коэффициенты: 0,4 мкм - 0,4; 0,5 мкм - 0,6; 0,6 мкм - 1; 0,7 мкм - 1; 0,8 мкм - 0,6; 0,9 мкм - 0,3.

Оптическая система длиннофокусного узкопольного объектива с аналогичными техниче-

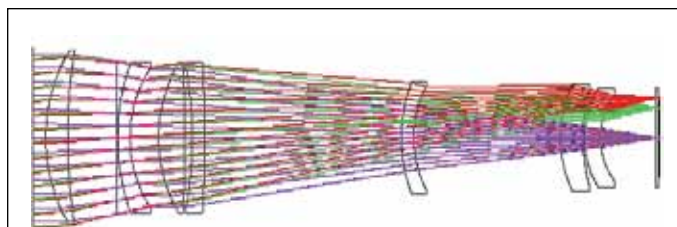


Рис.12. Схема длиннофокусного объектива $F=440$ мм, $\Delta\lambda=(0,4-0,9)$ мкм

Fig. 12. Layout of long-focus lens, $F=440$ mm, $\Delta\lambda=(0,4\div 0,9)$ μm

of earth surface only with the interval of three days, the topicality of this task becomes obvious.

In order to obtain the operative information under adverse conditions, the spacecrafts are equipped with the optical systems operating within different spectral ranges. Equipment of surveillance systems not with multiple objectives for the operation within individual spectral ranges (visible, near, medium or far IR range) but with the objectives, which are able to operate within several ranges, became the obvious aspiration when solving such tasks.

Specifically for this purpose, two-range 300 mm objective (Fig. 9) with the relative aperture 1:3.5 and operating spectrums $\Delta\lambda_1=(0,4-0,9)$ μm and $\Delta\lambda_2=(1,5-1,7)$ μm was estimated. Obtained scheme with specified technical characteristics is implemented with mass parameters within the limits of 1680 g. Qualitative characteristics of two-range objective within every operating range are given in Fig. 10-11. It should be noted that during the calculation of frequency-contrast characteristic of the objective the following weight coefficients for different wavelengths of operating ranges are applied. Within the range $\Delta\lambda_1$: 0.4 μm - 0.4; 0.5 μm - 0.6; 0.6 μm - 1; 0.7 μm - 1; 0.8 μm - 0.6; 0.9 μm - 0.3. Within the range $\Delta\lambda_2$: 1.5 μm - 0.5; 1.55 μm - 0.7; 1.6 μm - 1; 1.65 μm - 0.7; 1.7 μm - 0.5.

The main peculiarity of such objective operating within the spectral range of 400-1700 nm consists in the capability of determination of atmosphere state and identification and recording of the special

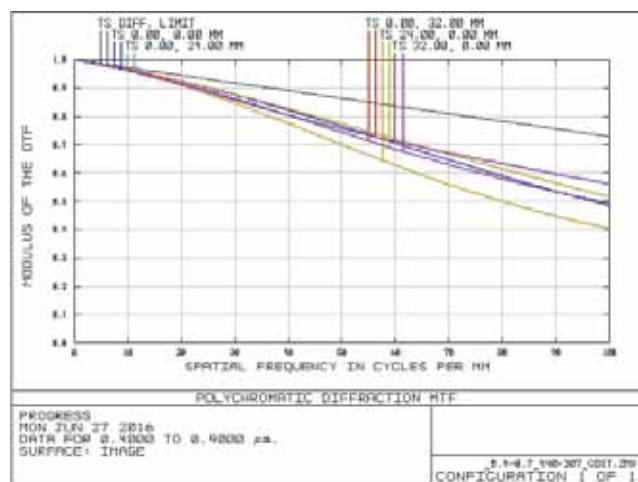


Рис.13. Графики ЧКХ объектива $F=440$ мм, $\Delta\lambda=(0,4-0,9)$ мкм

Fig. 13. Curves of contrast transfer function of lens, $F=440$ mm, $\Delta\lambda=(0,4\div 0,9)$ μm .



Рис.14. Схема длиннофокусного объектива $F=440$ мм, $\Delta\lambda=(1,5-1,7)$ мкм
Fig. 14. Layout of long-focus lens, $F=440$ mm, $\Delta\lambda=(1,5-1,7)$ μ m

скими параметрами (фокусом, линейным полем зрения и относительным отверстием) для рабочего спектрального диапазона от 1,5 до 1,7 мкм имеет другой вид и отличается уменьшенным количеством оптических компонентов (рис.14). Расчет сделан для комбинации марок стекол СТКЗ, CaF₂, BK8, ЛК5 и К8. Общая масса оптических деталей в полученной схеме составляет 2360 г. Следует отметить, что уменьшение массы данного варианта длиннофокусного объектива по сравнению с предыдущим обусловлено именно уменьшением числа деталей, хотя длина объектива увеличилась более чем на 70 мм. Качественные характеристики длиннофокусного объектива при работе в спектральном диапазоне от 1,5 до 1,7 мкм представлены на рис.15. При расчете ЧКХ объектива для различных длин волн принимались следующие весовые коэффициенты: 1,5 мкм - 0,7; 1,55 мкм - 0,9; 1,6 мкм - 1; 1,65 мкм - 0,9; 1,7 мкм - 0,7.

Учитывая характер задач, решаемых спутниковыми и иными космическими системами наблюдения, весьма важным параметром установленных в них объективов является постоянство положения плоскости изображения при изменении температуры окружающей среды или термостабильность объектива. Все рассмотренные объективы были оценены по величине сдвига плоскости изображения в диапазоне положительных температур 5-35°C.

При изготовлении механических деталей объективов из алюминиевого сплава Д16, который имеет коэффициент температурного расширения $\alpha_{Д16Т}=0,000238$ (1/мм·°C), расчетный сдвиг плоскости наилучшей установки на $\pm 15^\circ\text{C}$ от расчетной температуры 20°C у данного класса объективов не превышает 0,3 мм.

Оптические расчеты показывают, что такие величины можно компенсировать осевым смещением одной из линз, т.е. изменением соответствующих воздушных промежутков. Это дает основание использовать единый корпус с неподвижной

state of earth surface, individual components of which can significantly influence on image quality. For example, when analyzing the photographs obtained due to the use of such objective, white clouds can be distinguished from snow and ice, and different types of dust and smoke in the air can be distinguished from water steam.

However, for more accurate and efficient correction of photographs, the optical systems of other category are used - long-focus objectives with small field of view, which are intended for the operation within one spectral range, as a rule.

The long-focus objectives with the focal distance $F=440$ mm, relative aperture 1:3.28 and the same linear field 64 mm, which are given below, can be applied in order to solve such tasks, within the spectral ranges, which have been already considered, $\Delta\lambda_1 = (0.4-0.9)$ μ m and $\Delta\lambda_2 = (1.5-1.7)$ μ m. The optical scheme of the variant of such long-focus objective for the spectrum $\Delta\lambda = (0.4-0.9)$ μ m is shown in Fig. 12. The calculation is made for the combination of glass grades CaF₂, STK19, LK5 and TF10. The total weight of optical components in obtained scheme does not exceed 2960 g. The qualitative characteristics of long-focus objective when operating within the spectral range from 0.4 to 0.9 μ m are given in Fig. 13. When calculating the frequency-contrast characteristics of the objective for different wavelengths the following weight coefficients were applied: 0.4 μ m - 0.4; 0.5 μ m - 0.6; 0.6 μ m - 1; 0.7 μ m - 1; 0.8 μ m - 0.6; 0.9 μ m - 0.3.

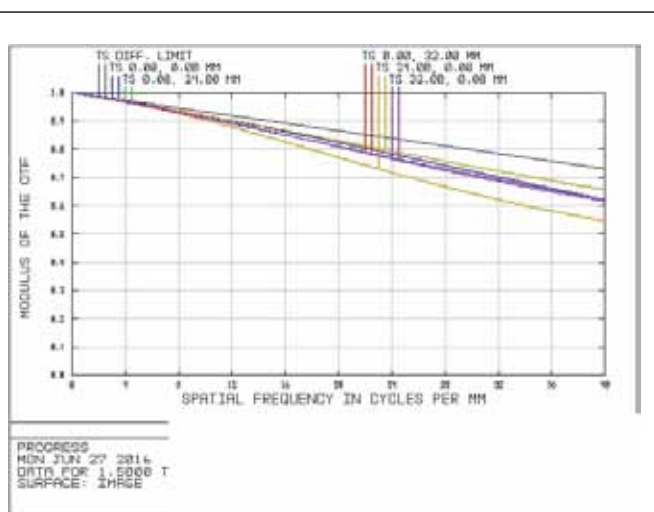


Рис.15. Графики ЧКХ объектива $F=440$ мм, $\Delta\lambda=(1,5-1,7)$ мкм
Fig. 15. Curves of contrast transfer function of lens, $F=440$ mm, $\Delta\lambda=(1,5-1,7)$ μ m

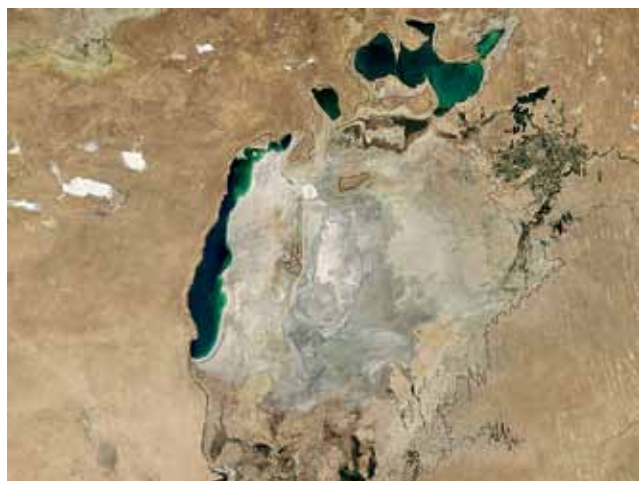


Рис.16. Аральское море
Fig. 16. Remains of the Aral Sea

установкой основных компонентов и фотоприемника и применять одно компенсирующее кольцо подвижной линзы, а поджатие линзы к компенсирующему кольцу осуществлять обычно применяемым в оптике пружинным стальным кольцом, компенсирующим температурные деформации (в нашем случае менее $\pm 0,4$ мм). Конструктивно такое "плавающее" положение линзы предлагается осуществлять применением кольца из материала с высоким значением коэффициента температурного расширения - например, материала ПА ТУ6-05-988-87. Для компенсации неточностей, возникающих из-за достаточно большой длины компенсационного кольца, при необходимости можно применить конструкцию "двойного" компенсационного кольца. При этом имеет смысл предусмотреть возможность компенсации разброса коэффициента линейного расширения фторопласта Ф4 соответствующей конструкцией крепления колец [4].

Применение рассмотренных объективов позволяет более детально по полученным снимкам анализировать состояние растительности, береговой линии и прибрежной акватории, более достоверно находить и определять заданные объекты. Они позволяют спутниковым оптическим системам делать четкие снимки поверхности, несмотря на пыль, сажу и другие помехи, присутствующие в атмосфере Земли.

Кроме того, в коротковолновом инфракрасном участке спектра становятся хорошо заметны различия между материалами, что представляет безусловный интерес при разведке полезных

The optical scheme of long-focus narrow-field objective with analogous technical parameters (focus, linear field of view and relative aperture) for operating spectral range from 1.5 to $1.7 \mu\text{m}$ has different form and is distinguished by the lower number of optical components (Fig. 14). The calculation is made for the combination of glass grades STK3, CaF_2 , BK8, LK5 and K8. The total weight of optical components in obtained scheme is 2360 g. It should be noted that the weight decrease of this variant of long-focus objective in comparison with the previous one is stipulated by the decrease of number of components, although the objective length increased by more than 70 mm. Qualitative characteristics of long-focus objective during the operation within the spectral range from 1.5 to $1.7 \mu\text{m}$ are given in Fig. 15. When calculating the frequency-contrast characteristics of objective for different wavelengths the following weight coefficients were applied: $1.5 \mu\text{m} - 0.7$; $1.55 \mu\text{m} - 0.9$; $1.6 \mu\text{m} - 1$; $1.65 \mu\text{m} - 0.9$; $1.7 \mu\text{m} - 0.7$.

Taking into account the character of the tasks solved by satellite and other space surveillance systems, very important parameter of objectives installed in them consists in the consistency of image plane position in case of ambient temperature variation or thermal stability of objective. All considered objectives were evaluated by the value of image plane shift within the range of positive temperatures $5-35 \text{ }^\circ\text{C}$.

When making the mechanical components of objectives from aluminum alloy D16, which has the coefficient of temperature expansion $\alpha_{\text{D16T}} = 0.000238$ ($1/\text{mm}\cdot^\circ\text{C}$), the calculated shift of the plane of the best device by $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ from the specified temperature $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in this category of objectives does not exceed 0.3 mm.

Optical calculations demonstrate that such values can be compensated by axial displacement of one of the lenses, in other words, by variation of the relevant air gaps. It gives grounds for the use of common body with fixed mounting of the main components and photodetector and application of one compensating ring of movable lens, and the lens clamping to compensating ring can be performed with the help of commonly used spring steel ring, which compensates the temperature deformations (in our case, less than ± 0.4 mm). Constructively such "floating" lens position is suggested to be arranged on the basis of use of the ring made of material with high value of temperature expansion coefficient, for example, material ПА ТУ6-05-988-87. In order to compensate the inaccuracies occurring due to

ископаемых, в управлении водными ресурсами (рис.16) и во многих других применениях.

При комплектовании аппаратов, предназначенных для целей мониторинга лесных массивов, предпочтение должно быть отдано много-спектральным объективам, формирующим многозональные фотографические изображения лесов и позволяющим получать снимки высокого дешифровочного качества при съемке в течение почти всего съемочного периода – как летом, так и ранней осенью.

В заключении необходимо отметить, что результаты космической съемки востребованы и в военной области при обнаружении и классификации объектов. Так что использование спутников дистанционного зондирования Земли в равной степени обусловлено потребностями как военных, так и гражданских пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воробьева А.А.** Дистанционное зондирование Земли. – С-Пб: Санкт-Петербургский исследовательский университет информационных технологий, 2012.
2. **Федосеев В.И., Колосов М.П.** Оптико-электронные приборы ориентации и навигации оптических аппаратов. – Москва: Логос, 2007.
3. **Веселков С.А.** Оптическая система высокого разрешения для получения снимков Земли из космоса. – Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева, 2009, № 3, с. 49–52.
4. **Панов В.А. и др.** Справочник конструктора оптико-механических приборов. – Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980.

quite large length of compensating ring, if needed, the construction of "double" compensating ring can be used. In such case, it is important to provide the opportunity of compensation of coefficient of linear expansion of teflon F4 with the relevant construction of ring mounting [4].

Application of considered objectives allows analyzing the state of vegetation, coastline and offshore strip in details on the basis of obtained photographs, finding and identifying the set objects in more accurate manner. They will give opportunity to the satellite optical systems to take distinct photographs of surface despite the dust, soot and other interferences, which are present in the atmosphere of Earth.

Besides, in short-wavelength infrared region of spectrum the differences between materials become well noticeable, and it is of absolute interest during the prospecting of mineral resources, in control of water resources (Fig. 16) and in many other scopes of application.

When completing the instruments intended for the purposes of monitoring of forest areas, the preference should be given to multispectral objectives, which generate the multi-zone photographic images of forests and allow obtaining the photographs with high deciphering quality, in case of surveying during the whole surveying period, in summer and early autumn.

In conclusion it should be noted that the results of space survey are in demand by military industry as well for the cases of detection and classification of objects. Thus, use of satellites of remote sensing of Earth is equally stipulated by the needs of military and civil users.

АЛЬБЕРТ ФЕДОРОВИЧ БЕЛОЗЁРОВ

Альберт Федорович Белозёров – выдающийся ученый в области оптики и оптоэлектроники, автор ярких работ по истории науки и техники. Его путь как ученого связан с развитием Государственного института прикладной оптики (ГИПО). А.Ф. Белозёров, благодаря своей энергии и знаниям, разрабатывал широкий круг научно-технических задач исследования неоднородностей в прозрачных средах. Осуществляя научное руководство ГИПО, он развивал проекты по ИК-технике: от полупроводниковых материалов для приемников ИК-излучения

до производства асферической оптики, от голографической интерферометрии и дифракционной оптики до технологий оптических покрытий всех видов. В сферу влияния ученого входило и производство оптико-электронных тепловизионных приборов первого, второго и третьего поколений, метрология оптико-электронных приборов в ИК-области. Альберт Федорович ушел из жизни в июне 2016 года, но с читателями остаются его замечательные книги по истории оптики.

Редакция журнала "ФОТОНИКА"

