

## **Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем**

**О.В. Григорьева<sup>1</sup>, Л.И. Чапурский<sup>2</sup>**

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
197082 Санкт-Петербург, Ждановская ул. 13  
E-mail:<sup>1</sup>alenska12003@mail.ru,<sup>2</sup>chlispb@yandex.ru*

В работе излагаются история и современное состояние исследований коэффициентов спектральной яркости элементов ландшафта в интересах информационного обеспечения космических и авиационных систем дистанционных исследований Земли. Описываются принципы формирования и наполнения соответствующей базы данных, создаваемой с использованием ГИС технологий, для поддержки экспонетрических расчётов при планировании космической гиперспектральной съёмки территорий с различными типами ландшафта в разные фенологические периоды и сезоны года и её актуализации в процессе эксплуатации.

**Ключевые слова:** коэффициент спектральной яркости, ландшафтный комплекс, условия съёмки, база данных, ГИС-технологии.

### **Введение**

Государственной Программой развития орбитальной группировки РФ до 2015 г. предусмотрен запуск на синхронно-солнечную орбиту высотой до 480 км КА Ресурс-Природа. В состав бортовых средств дистанционного исследования Земли (ДИЗ) должен входить призмный гиперспектрометр, оснащённый светосильным объективом. На спектральном интервале от 0,4 до 1,1 мкм число каналов шириной 5-10 см составит не менее 96. При наблюдении в надир с высоты 475 км проекция пикселя будет составлять 25-30м, а ширина полосы захвата не менее 25 км. Съёмка может выполняться при отклонении оси визирования аппаратуры от надира до 30°. Разрабатываемый комплект гиперспектральной аппаратуры включает как оптико-электронные узлы и приборы, так и программные средства, обеспечивающие его эффективную эксплуатацию. Одним из ключевых факторов, обеспечивающих получение высокоинформативных гиперспектральных данных в видимом и ближнем ИК спектральном диапазонах, является определение оптимальных параметров экспонирования аппаратуры. Для выполнения экспонетрических расчётов при планировании гиперспектральных съёмок необходима статистически обеспеченная база данных (БД) по коэффициентам спектральной яркости (КСЯ) элементов ландшафта (ЭЛ), встречающихся в различных географо-климатических зонах в разные сезоны года. Первичное наполнение БД выполнено с использованием открытых отечественных и зарубежных публикаций по КСЯ ЭЛ, полученных в результате наземных и авиационных измерений, данных по физико-географическим, сезонно-климатическим и фенологическим особенностям территорий с различными типами ландшафта.

### **1. Исторические этапы и современное состояние исследований КСЯ ЭЛ в интересах информационного обеспечения систем дистанционного исследования Земли**

В СССР развитие фотографических систем воздушного базирования в 1930 – 1950 годы опиралось на результаты наземных и авиационных исследований КСЯ ЭЛ на спектральном интервале 0,4-0,9 мкм с использованием методов визуальной и фотографической спектрофотометрии (Шаронов, 1934). В монографии Е.Л. Кринова (Кринов, 1947) описаны аппарату-

ра, методики и результаты многолетних исследований КСЯ ЭЛ и разработана спектрофотометрическая классификация природных объектов.

Начиная с 1960-х годов при исследованиях КСЯ ЭЛ начали использоваться приборы с фотоэлектрическими преобразователями оптических сигналов в электрические (фотоэлектронные умножители, фотосопротивления), которые по сравнению с фотографическими спектрографами обеспечивали существенно большее быстродействие и производительность. Тактико-технические характеристики наземных, авиационных и космического приборов, которые использовались в СССР в период 1930-х – 1970-х годов при исследованиях оптических характеристик земной поверхности, облаков и атмосферы приведены в работе (Мелешко, 1976). В приборах в качестве диспергирующих элементов использовались призмы, дифракционные решетки, интерференционные фильтры. Наиболее распространёнными были спектрометры и фотометры, построенные по однолучевой схеме, с помощью которых регистрация сигналов от исследуемой поверхности и эталона отражения выполнялась последовательно. В авиационных и аэростатных измерительных комплексах использовались бортовые эталонные поверхности, работающие на отражение (приборы СП-102, СПИ-2) и на пропускание (К-2, С-9) (Попов и др., 1968; Кондратьев и др., 1971; Чапурский, 1964). В спектрометрах С-8 и С-9 регистрация интенсивности сигналов, воспроизводимых на электронно-лучевых трубках, осуществлялась на киноплёнку. В спектрометре С-8 с частотой до 25 Гц одновременно со спектрограммами регистрировались фотоизображения исследуемых поверхностей. В авиационных измерительных комплексах (СП-102, СПИ-2, К-2, индикаторе ГГО) регистрация сигналов осуществлялась на фотографические ленты с помощью шлейфных осциллографов. Для калибровки бортовой аппаратуры в полёте на тестовых полигонах создавались стационарные радиальные и полосовые миры различной пространственной частоты. При проведении исследований по программам комплексного энергетического эксперимента в качестве тестовых использовались существующие элементы ландшафта, отражательные свойства которых определялись по материалам синхронных наземных измерений и при полётах на минимальных безопасных высотах (Кондратьев и др., 1971).

Необходимо подчеркнуть, что спектральная исследовательская авиационная аппаратура создавалась в макетных мастерских и на опытных производствах, как правило, в одном - двух экземплярах. Это обстоятельство существенно осложняло сопоставление материалов, полученных различными приборами, имеющими разные углы зрения, разрешение по спектру и погрешности измерений. Острая нехватка приборов, отвечающих требованиям спектрофотометрии, и отсутствие стандартизированной методики измерений КСЯ природных объектов тормозили развитие исследований по оптике ландшафта. Серьёзным сдерживающим фактором для получения надёжных исходных данных по КСЯ ЭЛ являлось отставание отечественных исследовательских комплексов от зарубежных по использованию устройств регистрации экспериментальных данных на магнитные носители в цифровой форме, обеспечивающих автоматизированную обработку больших потоков информации. Только в начале 1980-х годов в ГосНИЦПР был создан авиационный спектрометр, построенный по двухлучевой схеме, с диффузным датчиком солнечной освещённости, в котором регистрация сигналов исследуемой поверхности и освещённости сюжета осуществлялась на магнитофон (Кондратьев и др., 1983).

В работах советских учёных по оптике ландшафта представлены основные результаты экспериментальных исследований спектральных и интервальных КСЯ ЭЛ в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм в зависимости от географических, астрономических, метеорологических условий и геометрии наблюдения, а также представлены теоретические модели, описывающие закономерности формирования лучистых потоков от объектов ландшафта и атмосферы. Материалы перечисленных исследований нашли практическое применение в 1960-1980 годы при разработке тактико-технических требований к космическим системам землеобзора «Метеор», «Электро», «Ресурс-О», «Тирилен». Они использовались при определении диа-

пазонов значений энергетической яркости подстилающей поверхности и облачного покрова Земли, при выборе оптимальных спектральных диапазонов для оптико-электронной аппаратуры, при разработке методов обработки многоспектральных данных, а также методик и алгоритмов обнаружения и распознавания антропогенных и природных объектов по спектральным и текстурным признакам.

На рубеже 20-21 веков по известным причинам целенаправленные исследования КСЯ ЭЛ и разработка измерительных приборов в нашей стране не проводились.

В последние годы в РФ для исследований отражательных свойств ландшафта начали создаваться и использоваться авиационные видеоспектрометры (ВС) (приборы ООО «Реагент», «Сокол-ГЦП», НПО «Лептон» с призмным полихроматорами и ВС «Фрегат», в котором для разложения спектра используется дифракционная решетка), работающие на длинах волн от 400...500 до 890...1100 нм. По своим ТТХ характеристикам они уступают выпускаемым серийно зарубежным авиационным ВС (канадским CASI-550, CASI-1500 и финскому AISA EAGLET), которые нашли широкое применение в мировой практике при выполнении научно-прикладных исследований ландшафта в интересах сельского, лесного и водного хозяйства, разведки полезных ископаемых, экологического мониторинга, калибровки и валидации бортовой авиакосмической аппаратуры по наземным тестовым участкам, инженерной разведки местности, поиска мин и др. Несомненным преимуществом указанных зарубежных ВС перед отечественными образцами являются более высокое спектральное разрешение на всём диапазоне чувствительности аппаратуры, возможность одновременной регистрации в полёте спектральной солнечной освещённости сюжета, а также возможность объединения выбранных каналов (при недостаточной освещённости, для использования только информативных каналов при решении определённых задач дистанционных исследований Земли (ДИЗ), для сжатия объема регистрируемой информации). Красноярская организация ЕНИСЕЙЛАБ распространяет спектрометрическое оборудование FieldSpec<sup>R</sup>, предназначенное для наземных измерений спектральной плотности энергетической яркости, освещённости и КСЯ поверхностей в диапазоне от 0,35...0,4 до 1,1...2,5 мкм со спектральным разрешением 1...3 нм. Аналогичные приборы выпускает Институт прикладных физических проблем Белорусского ГУ.

Перечисленные образцы современных авиационных и наземных приборов, в которых используются матричные и линейные приёмники излучений с переносом заряда, следует рассматривать в качестве основных высокопроизводительных инструментов для получения исходных данных в интересах формирования современной статистически обеспеченной базы данных по пространственно-временной изменчивости КСЯ элементов ландшафтных комплексов с пространственным разрешением от 0,5-1 до 4-5 м на спектральном интервале от 0,35 до 2,5 мкм.

В 2011 г. с целью получения дополнительной информации для БД КСЯ ЭЛ были выполнены авиационные съёмки антропогенного ландшафта с использованием ВС НПО «Лептон» и «Фрегат», установленных на самолёте Ан-30. Разрешение ВС изображений, полученных с высоты 2100 м, составляет соответственно 2 и 3 м. Одновременно проводились наземные измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) и КСЯ тестовых участков с использованием спектрометра FieldSpec<sup>R</sup>. Результаты наземных исследований позволили выполнить атмосферную коррекцию ВС данных и привести результаты авиационной ВС съёмки ландшафта к значениям, соответствующим условиям измерения у земной поверхности.

На рис. 1 представлен график распределения СПЭЯ системы «участок лесопаркового массива - атмосфера», полученный ВС НПО «Лептон», и спектр яркости уходящего излучения в значениях интенсивности сигнала, полученный ВС «Фрегат», а также фрагменты изображений этого массива, полученные в результате применения RGB-синтеза сигналов каждого из приборов в каналах 512, 564 и 671 нм. На рис. 2 представлены графики распределения КСЯ объектов антропогенного ландшафта по данным ВС НПО «Лептон», а на рис. 3 – графики распределения экстремальных значений КСЯ антропогенных ландшафтов трёх

типов, рассчитанные по данным ВС НПО «Лептон» для съемочных систем с пространственным разрешением 30 м.

Для уточнения закономерностей изменчивости КСЯ травяного покрова от углов высоты Солнца с помощью ВС «Фрегат», установленного на подвижной платформе, выполнены наземные измерения КСЯ газонной травы высотой 15 см, имеющей проективное покрытие 100%, при значениях  $h_c$  от 19 до 90°. Результаты наших исследований дневного хода КСЯ травы, см. рисунок 4, совпали с результатами измерений КСЯ разнотравно-злаковой группировки при разных  $h_c$ , приведёнными в работе (Юцевич и др., 1970). Результаты описанных выше измерений КСЯ элементов антропогенного ландшафта включены в соответствующие разделы проектируемой БД.

## **2. Содержание БД по КСЯ ЭЛ и спектральная классификация ЭЛ различных ландшафтных комплексов**

Разработка структуры БД и ее наполнение осуществляются с использованием: опубликованных результатов экспериментальных исследований КСЯ и индикатрис яркости ЭЛ по материалам отечественных и зарубежных исследований, картографических данных о ландшафтном районировании территории РФ и сведений о сроках наступления фенологических событий в различных ландшафтных зонах, содержащихся в календарях природы, справочниках и монографиях по сельскохозяйственной метеорологии, фенологии и экологии растений (Чапурский и др, 2005).

Анализ имеющихся в нашей стране и за рубежом соответствующих разработок показал, что отечественные спектральные библиотеки по КСЯ ЭЛ разрознены, не систематизированы и представлены в основном в виде книжных каталогов на бумажных носителях в графической форме. В 2010 г на интернет-сайте <http://gis-lab.info/> появилась электронная БД по КСЯ растительного покрова и других классов природных объектов в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра в различных географо-климатических поясах бывшей территории СССР. Она содержит свыше 1200 значений КСЯ ЭЛ, полученных главным образом в результате электронного сканирования графиков, представленных в известных работах советских специалистов по оптике ландшафта, опубликованных до 1982 г. Степень наполнения содержательной информацией каждого из семи подразделов в 13 разделах базы невелика. До 40% данных по КСЯ растительного покрова (РП) относится к листьям разных пород и видов древесных, кустарниковых, травяных и водно-болотных растений. К сожалению, в этой БД в ряде случаев не представлены сведения по условиям проведения измерений, что затрудняет непосредственное использование этих данных и заставляет пользователя обращаться к литературным первоисточникам.

Нами были проанализированы зарубежные интернет ресурсы по БД КСЯ природных объектов, такие, как ASTER Spectral Library, USGS Digital Spectral Library 06 и Vegetation Spectral Library. Достоинством этих цифровых библиотек является высокое спектральное разрешение данных, относящихся к ультрафиолетовому, видимому и инфракрасным диапазонам спектра до 2,5...12 мкм, строгая геодезическая привязка исследованных поверхностей и результаты фотографического сопровождения спектральных измерений поверхностей. В создаваемой БД были использованы материалы этих интернет ресурсов, относящиеся к ЭЛ, условия наблюдения которых соответствуют условиям космической съёмки.

В основу формирования БД по КСЯ ЭЛ были положены результаты авиационных и наземных измерений КСЯ и индикатрис яркости свыше 350 элементов природного и антропогенного ландшафта на спектральном интервале от 0,4 до 2,5 мкм в различных районах СССР в разное время года, выполненных в ВКА имени А.Ф Можайского с помощью аппаратуры СПИ-2 (Чапурский, 1986), а также аналогичные результаты экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в ГГО им. А.И. Воейкова и в Институте Леса СО АН РФ

по договорам с ВКА им. А.Ф. Можайского. Все эти материалы были получены при строгом соблюдении требований, предъявляемых к методикам проведения измерений оптических характеристик ландшафта. Они представлены в цифровой форме и отличаются наиболее полным описанием условий проведения измерений.

База данных объектов наземных и водных экосистем включает следующую информацию: класс объекта, номер класса, тип объекта, наименование объекта, идентификационный номер объекта, номер модели индикатрисы яркости, значение длины волны, значение КСЯ для указанной длины волны. В БД представлены сведения о КСЯ для 12 классов ландшафта: открытые почвы, леса, кустарники, травянистая растительность (луга и степи), водно-болотные сообщества, тундра, другая растительность и растительные комплексы (гари, вырубки и др.), сельскохозяйственные земли, безрастительные комплексы (обнажения), поверхностные водные объекты, ледовый и снежный покровы, урбанизированные и застроенные территории. Каждый класс ландшафта разбит на несколько типов. Например, построение структуры БД для лесных экосистем выглядит следующим образом: класс «Леса» – тип «Светлохвойные вечнозеленые» – объект «Сосна».

В настоящее время в базе данных содержится до 1500 значений КСЯ различных объектов. Необходимо подчеркнуть, что каждое значение КСЯ объекта, включённое в БД, в соответствии с методиками измерений (Мелешко, 1976), получено как средняя величина из числа измерений от 3-5 до 20 и более (Чапурский, 1986). Для каждого объекта в БД предусмотрено хранение следующей информации: идентификационный номер, физико-географическая зона, дата и время наблюдения, номер фенологического периода (для растительных покровов), съемочный прибор, проективное покрытие, тип подстилающей поверхности, место измерения, высота Солнца, азимутальный и надирный углы измерения, высота измерения, площадь реферируемой поверхности, количество и форма облачности при измерениях, модель индикатрисы, источник данных, опорное значение КСЯ, полученное при измерении в надир при высоте Солнца  $45^\circ$  или приведённое к этой высоте Солнца. В дальнейшем планируется ввод информации о СКО КСЯ объектов. Дополнительно содержатся сведения о свойствах объекта класса (степень влажности и размеры комков для почв и т.п.).

Поиск КСЯ в БД осуществляется с помощью следующих запросов: наименование класса, типа объекта, географические координаты области наблюдения, дата и время планируемой съемки, надирный угол и азимут визирования относительно солнечного вертикала. Последние четыре параметра необходимы расчёта значений КСЯ поверхности для заданных условий наблюдений. Этот расчёт осуществляется с использованием инженерных моделей индикатрис (ИМИ) растительного покрова, обнажений, почв, твердых покрытий и строительных материалов, которые позволяют пересчитывать помещенные в БД опорные значения КСЯ на другие условия наблюдения: углы визирования  $\theta$  в диапазоне от 0 до  $30^\circ$ , высоты Солнца  $h_c$  от  $20^\circ$  до  $90^\circ$  и азимуты визирования относительно солнечного вертикала  $\gamma_c$ .

При разработке ИМИ использовались закономерности, выявленные в процессе анализа экспериментальных данных по угловой структуре яркости искусственных поверхностей, почв и растительности, собранные по материалам более чем 75 источников. Установлено, что при углах визирования от 0 до  $30^\circ$  форма индикатрисы на спектральном интервале 400...1000 нм для всех видов исследуемых поверхностей постоянна в диапазоне  $h_c = 10...80^\circ$ . Это позволило реализовывать модель расчета индикатрисы последовательно: сначала анализировать изменения КСЯ от  $h_c$ , а затем – от углов  $\theta$  и  $\gamma_c$ . Модель формализована в виде восьми типов функциональных зависимостей между КСЯ объекта в надире и высотой Солнца и десяти типов зависимостей между КСЯ объекта и углами и азимутами визирования. В обоих случаях эти зависимости аппроксимированы формулами линейного вида.

Структура и программная реализация БД по КСЯ ЭЛ представлены в статье Саидова А.Г. «Структура реляционной БД КСЯ основных типов ландшафта и ее программное обеспечение на базе ГИС» (см настоящий том).

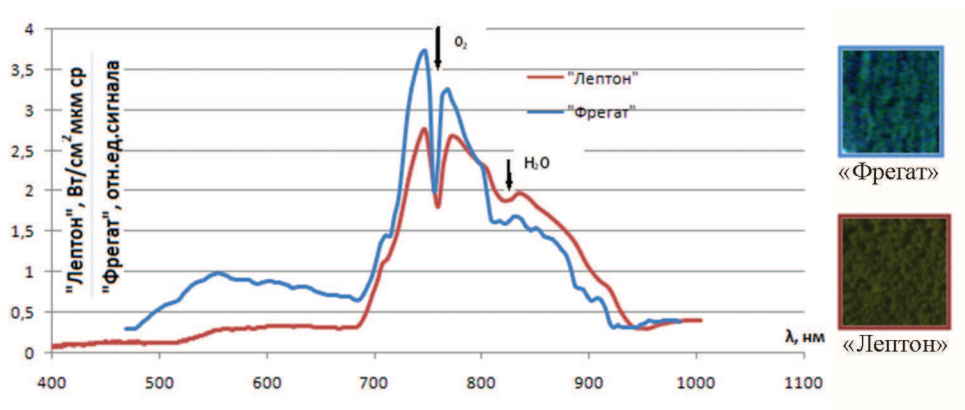


Рис.1. СПЭЯ тестового участка леса по ВС «Лептон» и спектр уходящего излучения этого же объекта по ВС «Фрегат»

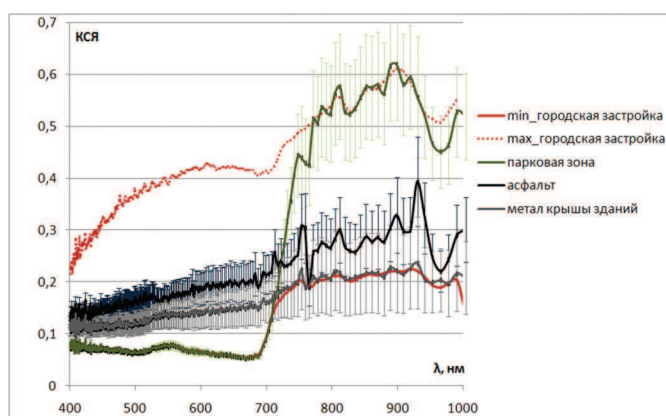


Рис.2. Графики распределения КСЯ объектов, составляющих антропогенный ландшафт по данным ВС НПО «Лептон» с пространственным разрешением 2 м

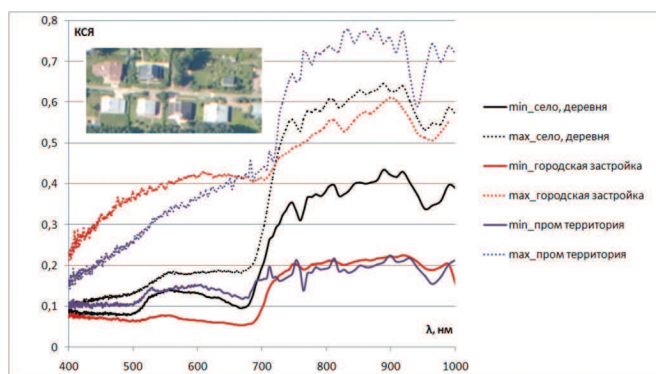


Рис. 3. Графики распределения экстремальных значений КСЯ антропогенных ландшафтов для съемочных систем с пространственным разрешением 30 м

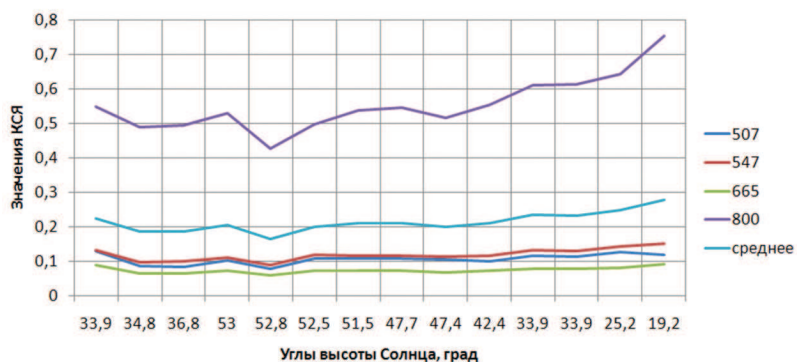


Рис. 4. Дневной ход КСЯ газонной травы высотой 15 см для длин волн 507, 547, 665 и 800 нм (проективное покрытие 100 %, Ленинградская область, начало июня, осреднение серии измерений)

## Выводы

При создании БД собран и выполнен системный анализ накопленных в нашей стране сведений по КСЯ ЭЛ. Необходимость разработки БД обусловлена требованиями совершенствования средств и методов информационного обеспечения систем ДИЗ на всех этапах их жизненного цикла. Дальнейшее увеличение числа объектов и уточнение значений КСЯ и индикатрис ЭЛ, т.е. актуализация БД, должна осуществляться с использованием данных, получаемых в процессе штатной эксплуатации КА «Ресурс-П», материалов авиационных видеоспектральных и наземных спектрофотометрических измерений отражательных свойств поверхностей, и данных, получаемых с помощью моно- и многоспектральных систем землеобзора. Важно отметить, что успешное создание и практическое внедрение подобных БД должно проводиться интегрировано с участием организаций, занимающихся эксплуатацией и обработкой перспективных авиационных и космических систем ДИЗ зондирования. В перспективе материалы этой БД должны стать источником физико-статистической информации о сроках смены фенологических периодов в различных ландшафтных зонах.

## Литература

1. *Кондратьев К.Я., Белов В.Ф., Васильев О.Б. и др.* Предварительные результаты первой экспедиции по программе комплексного энергетического эксперимента // Метеор. и Гидрол. 1971. №6. – С. 48-56.
2. *Кондратьев Ю.М., Доброзраков А.Д., Яковлев С.Г., Воякин С.Н., Ливотов В.Ю.* Спектрометрический комплекс ГосНИЦ ИПР. Вестн. с.-х. науки, 1983, № 2 (317). С. 128–132.
3. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. – М.: Изд. АН СССР, 1947. – 272 с.
4. *Мелешко К.Е.* Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. – Л.: Недра. 1976. – 112 с.
5. *Попов О.И., Федорова Е.О., Решетникова И.С. и др.* Экспериментальные исследования восходящего излучения в свободной атмосфере в диапазоне 2-6 мкм. Актинометрия и оптика атмосферы. Труды Шестого межведомственного совещания по актинометрии и оптике атмосферы. Издательство «Валгус», Таллин, 1968. С. 30.
6. *Чанурский Л.И.* Использование спектрометра С-9 для самолётных исследований радиации протяженных естественных объектов. ЛКВВИА им. А.Ф. Можайского. Информационный сборник НИО № 68. Л., 1964. - С. 22-25.
7. *Чанурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. Часть 1. – Л.: МО СССР, 1986. – 160 с.
8. *Чанурский Л.И., Тимофеев В.И.* Состояние и перспективы использования физико-статистической и оперативной информации для прогнозирования отражательных и излучательных характеристик растительного покрова // Труды 2 НИЦ 4 ЦНИИ МО РФ, Вып. 6, Санкт-Петербург, 2005, - С.100 -113.
9. *Шаронов В.В.* Рассеяние света земными образованиями и аэрофотометрические методы его исследования. В кн.: Исследование отражательной способности. М., 1934. С. 3-38.
10. *Шаронов В.В.* Отражательная способность некоторых природных образований. В кн.: Исследование отражательной способности. М., 1934. С. 53-59.
11. *Юцевич Ю.К., Тихомирова М.В.* Влияние высоты стояния Солнца на коэффициенты яркости земных образований. В кн.: Исследование оптических свойств природных объектов и их аэрофотографического изобращения. Л.: «Наука», ЛО, 1970.

# The problems of creation and content of the database from the coefficients of the spectral brightness of the objects of terrestrial ecosystems

O.V. Grigoreva<sup>1</sup>, L.I. Chapursky<sup>2</sup>

*Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky  
197082 Sankt-Petersburg, Zhdanovskaya str.13  
E-mail:<sup>1</sup>alenska12003@mail.ru,<sup>2</sup>chlispb@yandex.ru*

The work presents the history and the modern state of investigations of the coefficients of the spectral brightness of the elements of the landscape in the interests of information support of aviation and space systems of Earth remote sensing. Describes the principles of formation and filling of a database, created with use of GIS technologies, to support the metering calculations in the planning of the space of hyperspectral shooting areas with different types of landscape in the different phenological times and seasons of the year and its mainstreaming in the process of exploitation.

**Keywords:** coefficient of spectral brightness, landscape complex, shooting conditions, database, GIS-technology.