

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ
о проведении XXXII ВСЕРОССИЙСКОГО СИМПОЗИУМА
«РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СРЕД»

Уважаемые коллеги!

В период с 13 по 14 апреля 2021 г. в Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского состоится XXXII Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред».

Будут организованы 4 секции симпозиума:

секция № 1 «Радиолокационный обзор земной и водной поверхности»,
руководитель секции – д.т.н., профессор САХНО И.В.;

секция № 2 «Теоретические и прикладные вопросы рассеяния радиоволн, обработки радиолокационных сигналов, сверхширокополосной локации», руководитель секции – д.т.н., профессор САРЫЧЕВ В.А.
(по согласованию);

секция № 3 «Теоретические и прикладные вопросы распространения радиоволн. Радиолокационные исследования атмосферы. Радиолокационная метеорология», руководитель секции – ЗДН РФ, д.ф.-м.н., профессор ЩУКИН Г.Г.;

секция № 4 «Получение, обработка и применение фоноцелевой информации в радиолокационных и оптико-электронных комплексах специального назначения» (закрытая секция) – руководитель секции, д.т.н., профессор КЛЕЙМЁНОВ В.В.

Программный комитет симпозиума:

Председатель:

САХНО И.В.	Д.т.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
------------	-------------------	---

Сопредседатель:

ЩУКИН Г.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
------------	----------------------	---

Заместители

председателя:

ШАЛДАЕВ С.Е.	Д.т.н., доцент	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
--------------	----------------	---

КЛЕЙМЁНОВ В.В.	Д.т.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
----------------	-------------------	---

Учёный секретарь:

САВОЧКИН П.В.	К.т.н., доцент	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
---------------	----------------	---

Члены программного
комитета:

БЕККИЕВ М.Ю.	Д.т.н., профессор	ВГИ, г. Нальчик
БИСЯРИН М.А.	Д.ф.-м.н., профессор	СПбГУ, г. Санкт-Петербург
БОЕВ С.Ф.	Д.т.н., профессор	ПАО «МАК «Вымпел», г. Москва
ЕРОХИН В.И.	Д.ф.-м.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
ЖЕРЕБЦОВ Г.А.	Академик РАН	ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск
ЗЕЛЁНЫЙ Л.М.	Академик РАН	ИКИ РАН, г. Москва
ЗЕРНОВ Н.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	СПбГУ, г. Санкт-Петербург
ИВАНОВ Д.В.	Член-корреспондент РАН	Поволжский ГТУ, г. Йошкар-Ола
КАКАЕВ В.В.	Д.в.н., доцент	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
КОПЫТЕНКО Ю.А.	Д.ф.-м.н., профессор	ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург
КРУЧЕНИЦКИЙ Г.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	ЦАО, г. Москва
КРЮКОВСКИЙ А.С.	Д.ф.-м.н., профессор	РоСНОУ, г. Москва
КУТУЗА Б.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	ИРЭ РАН, г. Москва
ЛУКИН Д.С.	Д.ф.-м.н., профессор	МФТИ, г. Долгопрудный
МАЛЬЦЕВ Г.Н.	Д.т.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
МАТВИЕНКО Г.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	ИОА СО РАН, г. Томск
МЕДВЕДЕВ А.В.	Член-корреспондент РАН	ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск
НЕРОНСКИЙ Л.Б.	Д.т.н., профессор	ОАО Концерн «Вега», г. Москва
НЕСТЕРОВ С.М.	Д.т.н., профессор	НИЦ ПВО ЦНИИ ВКС МО РФ, г. Тверь
ПЕРЕСЛЕГИН С.В.	Д.ф.-м.н., профессор	ИО РАН, г. Москва
РАСТЯГАЕВ Д.В.	Д.ф.-м.н., доцент	РоСНОУ, г. Москва
САМОХВАЛОВ И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	НИИ ТГУ, г. Томск
САРЫЧЕВ В.А.	Д.т.н., профессор	ОАО «РАДАР ммс», г. Санкт-Петербург
СОЗИНОВ П.А.	Д.т.н., профессор	ОАО «Концерн ВКО «Алмаз- Антей», г. Москва
ТЕСТОЕДОВ Н.А.	Член-корреспондент РАН	ИСС имени академика М.Ф.Решетнёва, г. Железногорск
ФРОЛОВ В.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	НГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород
ЧЕРЕПЕНИН В.А.	Член-корреспондент РАН	ИРЭ РАН, г. Москва

Формы представления докладов на симпозиуме – устная и стендовая. В рамках работы 1–3 секции планируется проведение онлайн-трансляции выступлений (при наличии технической возможности). Для участия в работе секции 4 участникам симпозиума необходимо иметь справку о допуске к сведениям, составляющим государственную тайну, и предписание на выполнение задания.

Основные даты:

30 ноября 2020 г. – предварительная регистрация заявки на участие в симпозиуме, которая должна включать в себя:

- название доклада;
- сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество участника, его должность, ученую степень и ученое звание (при наличии);
- контактный телефон, электронный адрес, полное наименование организации-представителя, ее почтовый и электронный адреса.

30 января 2021 г. – регистрация заявки на участие в симпозиуме, которая должна включать в себя:

- материалы докладов (Microsoft Word, объем доклада до 5 страниц формата А4, шрифт 12pt, межстрочный интервал 1,12, выравнивание по ширине);
- заключение о возможности открытого опубликования доклада;
- материалы в секцию 4 (гриф не выше «секретно») представлять через фельдъегерскую почтовую службу.

15 марта 2021 г. – извещение авторов о включении докладов в сборники трудов и программу симпозиума (по результатам экспертизы их содержания), рассылка приглашений и рабочей программы симпозиума.

По итогам симпозиума планируется издание открытого (в двух частях) и закрытого сборников симпозиума. Часть 1 открытого сборника симпозиума будет издана в специальном выпуске журнала «Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского», входящем в список изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (далее ВАК). Часть 2 открытого сборника будет издана в материалах симпозиума, с присвоением ISBN и включением в Российский индекс научного цитирования. Программным комитетом и председателями секций будут отобраны доклады для издания в части 1 сборника симпозиума.

Для публикации представляемых докладов в материалах симпозиума необходимо представить статьи по форме, рекомендованной для оформления статей в журналах ВАК, с указанием сведений об авторах, аннотацией на русском и английском языках, с приложением экспертных заключений о возможности опубликования в открытом и закрытом изданиях.

При направлении докладов целесообразно указать желаемую форму представления – устную или стендовую, название секции.

Демонстрационные материалы к устным докладам следует иметь при себе на CD-диске или USB-носителе. Для стендового доклада выделяется площадь 60*90 см.

Организационный взнос не требуется.

ЗАЯВКА
на участие в XXXII ВСЕРОССИЙСКОМ СИМПОЗИУМЕ
«РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СРЕД»

ДАННЫЕ ОБ УЧАСТНИКЕ	
Фамилия, имя, отчество	
Должность	
Ученая степень, ученое звание, воинское звание, прочие звания	
Контактный телефон	
Электронная почта	
ДАННЫЕ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ	
Полное раскрытое название организации	
Сокращенное название организации	
Телефон/факс	
ДАННЫЕ О ВЫСТУПЛЕНИИ	
Название доклада	
Номер секции	

Адрес для отправки заявки и материалов докладов: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, заместителю начальника Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского по учебной и научной работе Кулешову Юрию Владимировичу.

Электронный адрес для отправки заявки и материалов открытых докладов: vka@mil.ru (с пометкой РЛИПС 2021).

Получить более полную информацию о симпозиуме, требования к материалам докладов, представляемым для публикации, Вы можете на сайте vka@mil.ru

ПЛАН
подготовки и проведения
XXXII Всероссийского симпозиума
«Радиолокационное исследование природных сред»

Время проведения: 13–14 апреля 2021 г.

Место проведения: Военно-космическая академия имени
А.Ф.Можайского

Секции симпозиума

Секция № 1 «Радиолокационный обзор земной и водной поверхности», руководитель секции – д.т.н., профессор САХНО И.В. Место работы секции – здание корпуса научно-образовательного центра (ул. Ждановская, д.13, литера Д).

Секция № 2 «Теоретические и прикладные вопросы рассеяния радиоволн, обработки радиолокационных сигналов, сверхширокополосной локации», руководитель секции – д.т.н., профессор САРЫЧЕВ В.А. (по согласованию). Место работы секции – здание корпуса научно-образовательного центра (ул. Ждановская, д.13, литера Д).

Секция № 3 «Теоретические и прикладные вопросы распространения радиоволн. Радиолокационные исследования атмосферы. Радиолокационная метеорология», руководитель секции – д.ф.-м.н., профессор ЩУКИН Г.Г. Место работы секции – здание корпуса научно-образовательного центра (ул. Ждановская, д.13, литера Д).

Секция № 4 «Получение, обработка и применение фоноцелевой информации в радиолокационных и оптико-электронных комплексах специального назначения» (закрытая секция, гриф не выше «секретно»), руководитель секции – д.т.н., профессор КЛЕЙМЁНОВ В.В. Место работы секции – аудитория № 427 учебного корпуса 6 факультета.

Программный комитет симпозиума:

Председатель:

САХНО И.В.	Д.т.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
------------	-------------------	---

Сопредседатель:

ЩУКИН Г.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
------------	----------------------	---

Заместители

председателя:

ШАЛДАЕВ С.Е.	Д.т.н., доцент	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
--------------	----------------	---

КЛЕЙМЁНОВ В.В.	Д.т.н., профессор	ВКА имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург
----------------	-------------------	---

Учёный секретарь:

САВОЧКИН П.В.

К.т.н., доцент

ВКА имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

Члены программного
комитета:

БЕККИЕВ М.Ю.

Д.т.н., профессор

ВГИ, г. Нальчик

БИСЯРИН М.А.

Д.ф.-м.н., профессор

СПбГУ, г. Санкт-Петербург

БОЕВ С.Ф.

Д.т.н., профессор

ПАО «МАК «Вымпел»,
г. Москва

ЕРОХИН В.И.

Д.ф.-м.н., профессор

ВКА имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

ЖЕРЕБЦОВ Г.А.

Академик РАН

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск

ЗЕЛЁНЫЙ Л.М.

Академик РАН

ИКИ РАН, г. Москва

ЗЕРНОВ Н.Н.

Д.ф.-м.н., профессор

СПбГУ, г. Санкт-Петербург

ИВАНОВ Д.В.

Член-корреспондент
РАН

Поволжский ГТУ,
г. Йошкар-Ола

КАКАЕВ В.В.

Д.в.н., доцент

ВКА имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

КОПЫТЕНКО Ю.А.

Д.ф.-м.н., профессор

ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург

КРУЧЕНИЦКИЙ Г.Н.

Д.ф.-м.н., профессор

ЦАО, г. Москва

КРЮКОВСКИЙ А.С.

Д.ф.-м.н., профессор

РоСНОУ, г. Москва

КУТУЗА Б.Г.

Д.ф.-м.н., профессор

ИРЭ РАН, г. Москва

ЛУКИН Д.С.

Д.ф.-м.н., профессор

МФТИ, г. Долгопрудный

МАЛЫЦЕВ Г.Н.

Д.т.н., профессор

ВКА имени А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

МАТВИЕНКО Г.Г.

Д.ф.-м.н., профессор

ИОА СО РАН, г. Томск

МЕДВЕДЕВ А.В.

Член-корреспондент
РАН

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск

НЕРОНСКИЙ Л.Б.

Д.т.н., профессор

ОАО Концерн «Вега», г. Москва

НЕСТЕРОВ С.М.

Д.т.н., профессор

НИЦ ПВО ЦНИИ ВКС МО РФ,
г. Тверь

ПЕРЕСЛЕГИН С.В.

Д.ф.-м.н., профессор

ИО РАН, г. Москва

РАСТЯГАЕВ Д.В.

Д.ф.-м.н., доцент

РоСНОУ, г. Москва

САМОХВАЛОВ И.В.

Д.ф.-м.н., профессор

НИИ ТГУ, г. Томск

САРЫЧЕВ В.А.

Д.т.н., профессор

ОАО «РАДАР ммс»,
г. Санкт-Петербург

СОЗИНОВ П.А.

Д.т.н., профессор

ОАО «Концерн ВКО «Алмаз-
Антей», г. Москва

ТЕСТОЕДОВ Н.А.

Член-корреспондент
РАН

ИСС имени академика
М.Ф.Решетнёва,
г. Железнодорожск

ФРОЛОВ В.Л.

Д.ф-м.н., профессор НГУ им. Н.И.Лобачевского,
г. Нижний Новгород

ЧЕРЕПЕНИН В.А.

Член-корреспондент ИРЭ РАН, г. Москва
РАН

Основные мероприятия подготовки и проведения симпозиума

№ п/п	Наименование мероприятия	Дата (время) проведения	Ответственный за проведение	Состав участников
Подготовка проведения симпозиума				
1.	Рассылка информационного сообщения	До 13.11.2020	Ответственный секретарь организационного комитета	Рабочая группа
2.	Обобщение поступивших от организаций заявок на участие в симпозиуме	До 30.01.2021	Руководители секций	Организационный комитет
3.	Анализ поступивших материалов для включения докладов в программу симпозиума	До 30.01.2021	Руководители секций	Программный комитет
4.	Определение перечня организаций, планирующих участие в симпозиуме, списков участников	До 05.02.2021	Руководители секций	Организационный комитет
5.	Определение тем планируемых докладов и выступлений	До 05.02.2021	Руководители секций	Программный комитет
6.	Извещение авторов о включении докладов в программу симпозиума	До 15.03.2021	Ответственный секретарь организационного комитета	Рабочая группа
7.	Утверждение программы симпозиума председателем программного комитета	До 15.03.2021	Ученый секретарь программного комитета	Руководители и секретари секций
8.	Рассылка приглашений и рабочей программы симпозиума	До 20.03.2021	Ответственный секретарь организационного комитета	Рабочая группа
9.	Разработка плана проведения фото и видеосъемок мероприятий симпозиума	До 02.04.2021	Ответственный секретарь организационного комитета	О(ТСО)
10.	Выпуск сборников трудов симпозиума	До 28.12.2021	Ученый секретарь программного комитета	Секретари секций, РИО

№ п/п	Наименование мероприятия	Дата (время) проведения	Ответственный за проведение	Состав участников
11.	Разработка плана мероприятий по защите государственной тайны при проведении симпозиума в закрытой секции	До 04.04.2021	СЗГТ	Ответственный секретарь организационного комитета
12.	Представление в службу защиты государственной тайны академии тезисов докладов и экспертных заключений о возможности их открытого опубликования	До 04.03.2021	Ученый секретарь программного комитета	Программный комитет, руководители секций
13.	Установка телевизионных панелей, подключение аудиоаппаратуры	12.04.2021	Руководители секций	О(ТСО), рабочая группа
14.	Оборудование рабочих мест организационного комитета симпозиума	12.04.2021	Старший рабочей группы	Рабочая группа
15.	Контрольный осмотр мест проведения симпозиума	12.04.2021	Председатель организационного комитета	Заместители председателя организационного комитета, руководители секций, О(ТСО)
16.	Представление доклада начальнику академии о готовности к проведению симпозиума	12.04.2021	ЗНА по УНР	Программный комитет
Проведение симпозиума				
13 апреля 2021 г.				
17.	Организация контрольно-пропускного пункта для участников симпозиума	08:00–09:00	СЗГТ	Рабочая группа
18.	Регистрация участников симпозиума	09:00–10:00	Ответственный секретарь организационного комитета	Рабочая группа
19.	Торжественное открытие симпозиума	10:00–10:30	Председатель организационного комитета	Программный комитет, члены симпозиума
20.	Пленарное заседание. Заслушивание докладов участников симпозиума (клуб академии)	10:30–12:00	Председатель программного комитета	Программный комитет, члены симпозиума

№ п/п	Наименование мероприятия	Дата (время) проведения	Ответственный за проведение	Состав участников
21.	Фотографирование участников симпозиума	12:00–13:00	Руководители секций	Организационный комитет, участники симпозиума, О(ТСО)
22.	Работа секций, заслушивание докладов и стендовых сообщений симпозиума: секция № 1 секция № 2 секция № 3 секция № 4	14:00–17:00	Руководители секций	Программный комитет, участники симпозиума
23.	Экскурсия в музей академии, лабораторию космической техники	17:00–18:00	Руководители секций	Организационный комитет, участники симпозиума
14 апреля 2021 г.				
24.	Работа секций, заслушивание докладов и стендовых сообщений симпозиума: секция № 1 секция № 2 секция № 3	09:00–13:00, 14:00–16:30	Руководители секций	Программный комитет, участники симпозиума
25.	Пленарное заседание. Принятие решения по результатам работы симпозиума.	16:30–17:15	Председатель программного комитета	Программный комитет, члены симпозиума
26.	Подведение итогов симпозиума	17:15–18:00	Председатель программного комитета	Руководители секций, участники симпозиума
27.	Демонтаж оборудования симпозиума	18:00–19:00	Секретари секций	О(ТСО), рабочая группа
Подведение итогов проведения симпозиума				
28.	Подготовка фотоотчета о проведении симпозиума	До 25.04.2021	О(ТСО)	Организационный комитет
29.	Подготовка статьи в газету «Вестник академии»	До 25.04.2021	Ученый секретарь программного комитета	Руководители секций
30.	Подготовка проекта приказа начальника академии по результатам проведения симпозиума	До 25.04.2021	Заместитель председателя организационного комитета	Ответственный секретарь организационного комитета
31.	Представление отчета о результатах проведения симпозиума в штаб Космических войск	До 31.05.2021	Ученый секретарь программного комитета	Сопредседатель и заместители председателя программного комитета

Афонин Глеб Игоревич, преподаватель 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-61, e-mail: vka@mil.ru

Кошкарров Александр Сергеевич, докторант 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-97-32, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-97-32, e-mail: vka@mil.ru

Afonin G.I., Koshkarov A.S., Maltsev G.N. Comparative analysis of the isoplanatism angle estimates at the observation of space and astronomical objects by ground-based optical systems for different atmospheric models // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 11–16.

A comparative analysis of the isoplanatism angle estimates at the observation of space and astronomical objects by ground-based optical systems for different atmospheric models is carried out. The results of calculations of the isoplanatism angle are presented, which are compared with the values of the isoplanatism angle in accordance with empirical models and standard models of the atmosphere. The fulfillment of the isoplanatism condition during the implementation of adaptive phase correction of atmospheric distortions with adaptation by the «laser star» is analyzed. It is shown that in conditions of good astroclimate in ground-based optical systems with adaptive phase correction of atmospheric distortions it is possible adaptation by the «laser star» and obtaining images of space and astronomical objects with high resolution exceeding the atmospheric limit of resolution

Key words: optical system, observation of space and astronomical objects, adaptive phase correction, «laser star», isoplanatism angle.

Г.И. Афонин,
кандидат технических наук (ученая степень, ученое звание);
А.С. Кошкарров,
кандидат технических наук, доцент;
Г.Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК УГЛА ИЗОПЛАНАТИЗМА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НАЗЕМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ КОСМИЧЕСКИХ И АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

Проведен сравнительный анализ оценок угла изопланатизма при наблюдении наземными оптическими системами космических и астрономических объектов для различных моделей атмосферы. Представлены результаты расчетов угла изопланатизма, которые сравниваются со значениями угла изопланатизма в соответствии с эмпирическими моделями и стандартными моделями атмосферы. Анализируется выполнение условия изопланатизма при реализации адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений с адаптацией по «лазерной звезде». Показано, что в условиях хорошего астроклимата в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений возможны адаптация по «лазерной звезде» и получение изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением, превышающим атмосферный предел разрешающей способности.

Ключевые слова: оптическая система, наблюдение космических и астрономических объектов, адаптивная фазовая коррекция, «лазерная звезда», угол изопланатизма.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является анализ условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений, которая позволяет преодолеть атмосферный предел разрешающей способности и приблизиться к инструментальному разрешению наземных оптических систем в реальных условиях их применения [1–4].

В качестве одной из наиболее перспективных технологий адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений в наземных оптических системах в настоящее время рассматривается адаптация по искусственной «лазерной звезде» (*LGSAO – Laser Guide Star Adaptive Optics*) [5–7]. «Лазерная звезда» формируется при распространении лазерного излучения

в атмосфере по вертикальным и наклонным трассам снизу вверх. На определенных длинах волн в некоторых слоях атмосферы происходит интенсивное рассеяние и переизлучение лазерного излучения. Это имеет место, например, при резонансном рассеянии лазерного излучения на длине волны 0,589 мкм в слое паров натрия на высоте 90–100 км в ионосфере. Переизлученное излучение может приниматься наземной оптической системой как излучение опорного источника для измерения и коррекции атмосферных фазовых искажений методом фазового сопряжения.

Принципиальное значение для реализации адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений имеет выполнение условия изопланатизма. В соответствии с этим условием «лазерная звезда» и наблюдаемый объект должны располагаться на угловом расстоянии, не превышающем угла изопланатизма, в пределах которого фазовые искажения, измеренные по «лазерной звезде», соответствуют фазовым искажениям при формировании изображения объекта. Таким образом, угол изопланатизма является одним из ключевых условий для осуществления возможности наблюдения космических и астрономических объектов наземными оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений. Его величина зависит от характеристик атмосферы на трассе распространения оптического излучения и определяется экспериментально или аналитически с использованием различных моделей атмосферы. В настоящей статье проведен сравнительный анализ оценок угла изопланатизма для различных моделей атмосферы и сделаны выводы о выполнении условия изопланатизма при наблюдении космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами.

РАСЧЕТ УГЛОВ ИЗОПЛАНАТИЗМА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ И АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Реализация технологии *LGSAO* на ряде крупных наземных телескопов позволила получить изображения астрономических объектов с угловым разрешением, близким к инструментальному [7–10]. Вместе с тем, несмотря на имеющиеся теоретическое обоснование и экспериментальные данные, в настоящее время отсутствует единое мнение о значениях угла изопланатизма при наблюдении космических и астрономических объектов наземными оптическими системами. Полученные экспериментальные и аналитические оценки угла изопланатизма для различных моделей атмосферы в ряде случаев отличаются друг от друга [7–9]. Одной из причин этого является то, что условия адаптации по «лазерной звезде» при наблюдении астрономических и космических объектов могут существенно отличаться. Астрономические наблюдения не связаны с высокой динамикой наблюдаемых объектов, а наблюдение за космическими объектами, находящимися на околоземных

орбитах, происходит в процессе их углового сопровождения в зоне видимости наземной оптической системы.

Общепринятой характеристикой атмосферных фазовых искажений является радиус когерентности (радиус Фрида) r_0 , связанный со структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения оптического излучения. Величина радиуса когерентности (в метрах) аналитически определяется в соответствии с выражением [11]

$$r_0 = 0,185 \left[\lambda^{-2} \int_{(R)} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

где $C_n^2(z)$ – структурная характеристика флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения,

λ – длина волны оптического излучения, на которой происходят измерение и компенсация атмосферных фазовых искажений.

Интегрирование структурной характеристики $C_n^2(z)$ в выражении (1) осуществляется по трассе распространения оптического излучения L , при наблюдении космических и астрономических объектов наземной оптической системой – по линии визирования на наблюдаемый объект.

Зависимость радиуса когерентности r_0 от зенитного угла линии визирования на наблюдаемый объект β определяется выражением

$$r_0(\beta) = 0,185 \left[\lambda^{-2} \sec \beta \int_{(R)} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (2)$$

где $C_n^2(h)$ – высотный профиль структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы.

Интегрирование в выражении (2) осуществляется по высоте H . Здесь и далее для определения характера изменения условий наблюдения космических и астрономических объектов наземной оптической системой используется плоская модель атмосферы, не учитывающая сферичность Земли. Если обозначить радиус когерентности для вертикальной трассы (при $\beta=0$) при зенитном положении наблюдаемого объекта, то зависимость радиуса когерентности от зенитного угла имеет следующий вид:

$$r_0(\beta) = r_0(0) \cdot \cos^{3/5} \beta. \quad (3)$$

Величиной r_0 определяется атмосферный предел разрешающей способности наземных оптических систем. Если диаметр телескопа наземной оптической системы D превышает величину радиуса когерентности r_0 , то для преодоления атмосферного предела разрешающей способности и приближения к инструментальному разрешению наземной оптической системы в ней необходима адаптивная фазовая коррекция атмосферных искажений. В реальных условиях применения наземных оптических систем величина радиуса когерентности в большинстве случаев составляет единицы – десятки сантиметров, причем для малых зенитных углов. Поэтому для средних и крупных оптических телескопов диаметром десятки сантиметров – единицы метров имеет место соотношение $D > r_0$, и для приближения к их инструментальной разрешающей способности необходима адаптивная фазовая коррекция атмосферных искажений.

В соответствии с условием изопланатизма «лазерная звезда» и наблюдаемый объект должны располагаться на угловом расстоянии, не превышающем угла изопланатизма θ_0 , в пределах которого фазовые искажения, измеренные по «лазерной звезде», соответствуют фазовым искажениям при формировании изображения наблюдаемого объекта. При получении изображений наблюдаемого объекта это условие относится к любой точке объекта в пределах его углового размера $\Delta\theta$. Величина угла изопланатизма (в радианах) аналитически определяется в соответствии с выражением [11]

$$\theta_0 = 5,81 \cdot 10^{-2} \left[\lambda^{-2} \int_{(L)} z^{5/3} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) величина угла изопланатизма θ_0 , как и величина радиуса когерентности r_0 , определяемая выражением (1), зависит от структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения $C_n^2(z)$ и длины волны оптического излучения λ . С увеличением степени атмосферных искажений величина θ_0 , как и величина r_0 , уменьшается, но характер этой зависимости отличается. Это обусловлено тем, что интегрирование структурной характеристики $C_n^2(z)$ по трассе распространения оптического излучения L в выражении (3) является взвешенным и величина θ_0 оказывается более критична к виду зависимости $C_n^2(z)$, задаваемой используемой моделью атмосферы.

Зависимость угла изопланатизма θ_0 от зенитного угла линии визирования на наблюдаемый объект β определяется выражением:

$$\theta_0(\beta) = 5,81 \cdot 10^{-2} \left[\lambda^{-2} \sec^{8/3} \beta \int_{(H)} h^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}. \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (2) и (5) зависимости $\theta_0(\beta)$ и $r_0(\beta)$ определяются высотным профилем структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$, который интегрируется по высоте H . При этом интегрирование структурной характеристики $C_n^2(h)$ по высоте H как и по трассе распространения L в выражении (4), является взвешенным и сохраняется критичность величины θ_0 к виду зависимости $C_n^2(h)$, которая

и задается используемой моделью атмосферы. Если обозначить угол изопланатизма для вертикальной трассы (при $\beta=0$) при зенитном положении наблюдаемого объекта $\theta_0(0)$, то зависимость угла изопланатизма от зенитного угла имеет следующий вид:

$$q_0(\beta) = q_0(0) \cdot \cos^{8/5} \beta. \quad (6)$$

При анализе условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными оптическими системами используются различные модели атмосферы и эмпирические соотношения между углом изопланатизма θ_0 и радиусом когерентности атмосферных искажений r_0 , например, $\theta_0 = 3,978 \cdot 10^{-5} r_0$ или $\theta_0 = r_0 / (3h_0)$, где h_0 – высота турбулентного слоя. При $h_0 = 10$ км оба приближенных соотношения дают близкие значения θ_0 , различающиеся на 16%.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости отношения $\theta_0(\beta)/\theta_0(0)$, полученные в соответствии с выражением (6) для $\theta_0(\beta)$ (кривая 1) и в соответствии с выражением (3) для $r_0(\beta)$

с учетом эмпирического соотношения между r_0 и $\theta_{из}$ (кривая 2). Из графика видно, что для наклонных трасс эмпирические соотношения дают более оптимистические значения углов изопланатизма.

В табл. 1 приведены значения r_0 и θ_0 , соответствующие трем стандартным моделям атмосферы – *SLC*, *HV*, *MHV* [12]. Модель *SLC* является стандартной моделью атмосферы для континентальных районов и дневного времени суток. Модели *HV* и *MHV* являются модификациями модели атмосферы Хафнагеля для различных типов астроклимата. Модель *HV* соответствует среднему астроклимату, модель *MHV* соответствует хорошему астроклимату. Можно полагать, что при выборе пунктов расположения наземных высокоразрешающих оптических систем, предназначенных для наблюдения астрономических и космических объектов, в районах с хорошим астроклиматом [13–15], условиям наблюдения будет соответствовать модель *MHV*. Все три модели соответствуют зависимости $\theta_0(\beta)$ вида (6). В соответствии с приведенными данными в пунктах с хорошим астроклиматом в ночное время суток в диапазоне изменения зенитных углов $-45^\circ < \beta < 45^\circ$

можно ожидать значений угла изопланатизма до нескольких десятков микро радиан. Такой же порядок величины угла изопланатизма $\theta_0 \approx 5'' = 25$ мкрад приводится в работе [16].

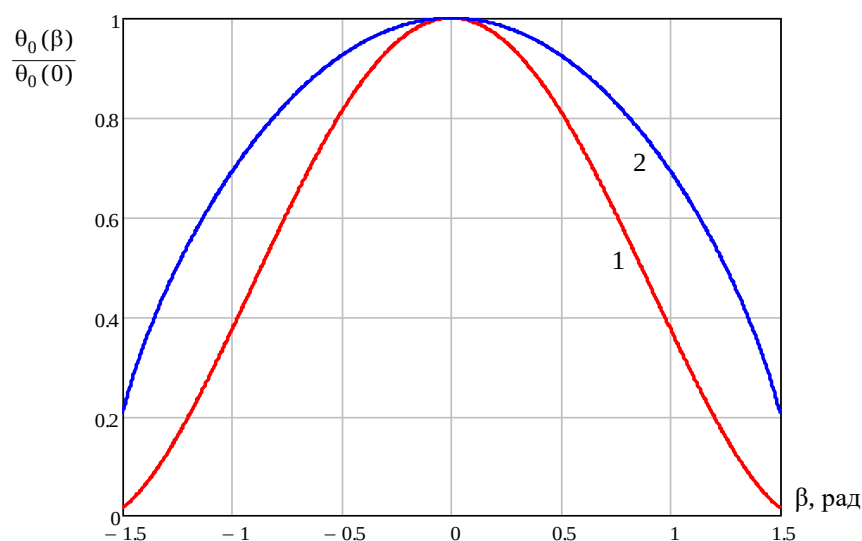


Рис. 1. Расчетные зависимости угла изопланатизма от зенитного угла, нормированного к величине угла изопланатизма для вертикальной трассы

Таблица 1

**Радиус когерентности и угол изопланатизма
атмосферных искажений для различных моделей атмосферы**

Модель атмосферы	r_0 , см		θ_0 , мкрад	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$
<i>SLC</i>	5,7	4,6	13,8	8,0
<i>HV</i>	5,6	4,5	7,8	4,5
<i>MHV</i>	20,0	16,2	20,0	11,2

Полученные зависимости $\theta_0(\beta)$ позволяют анализировать возможности наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений и адаптацией по «лазерной звезде». Например, при сопровождении космического объекта с линейным размером

5

м

на орбите высотой 250 км и с линейным размером 10 м на орбите высотой 500 км, размер изображения при углах наблюдения $\beta=0$ и $\beta=45^\circ$ составляет соответственно $\Delta\theta=20$ мкрад и $\Delta\theta=14$ мкрад. Таким образом, при наблюдении космических объектов с линейными размерами до 5–10 м на высотах более 250–500 км условие изопланатизма $\Delta\theta < \theta_0$ выполняется,

и могут быть получены их изображения с разрешением, превышающим атмосферный предел. При наблюдении астрономических объектов величина $\Delta\theta$ соответствует угловому полю, в пределах которого возможно получение изображений звездного неба с разрешением, превышающим атмосферный предел. Дополнительным условием реализации технологии *LGSAO* при наблюдении космических объектов является необходимость формирования «лазерной звезды» с некоторым упреждением, поскольку при угловом сопровождении космического объекта она должна двигаться с такой же угловой скоростью. Однако расчеты показывают, что при $\theta_0=25$ мкрад и адаптации по натриевым «лазерным звездам» требуемый угол упреждения оказывается значительно меньше угла изопланатизма для всех представляющих интерес высот орбит наблюдаемых космических объектов.

Таким образом, в условиях хорошего астроклимата в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений возможны реализация адаптации по «лазерной звезде» и получение изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением. При этом выполнение условия изопланатизма определяет

возможность адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений, а достижимое угловое разрешение определяется параметрами адаптивной системы [1, 2]. Следует отметить, что в случае невыполнения условия изопланатизма для одной «лазерной звезды» принципиально возможна реализация адаптации по нескольким формируемым в угловом поле $\Delta\theta$ «лазерным звездам» [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Угол изопланатизма является одной из важнейших характеристик условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений на основе технологии *LGSAO*.

2. Аналитические модели атмосферы и экспериментальные данные дают значения угла изопланатизма, лежащие в достаточно широких пределах как для вертикальных трасс при зенитном положении наблюдаемого объекта, так и для наклонных трасс в зависимости от зенитного угла линии визирования. При этом для наклонных трасс эмпирические соотношения дают завышенные значения углов изопланатизма по сравнению с аналитическими моделями, на основе использования высотного профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы.

3. Для условий хорошего астроклимата имеет место хорошая сходимость результатов расчета угла изопланатизма с использованием аналитических моделей и представленных в стандартных моделях атмосферы. В соответствии с приведенными данными для пунктов с хорошим астроклиматом в ночное время суток в диапазоне изменения зенитных углов $45^\circ < \beta < 45^\circ$ угла изопланатизма может достигать значений до нескольких десятков микро радиан.

4. В условиях хорошего астроклимата при типичном значении угла изопланатизма для этих условий $\theta_0 = 25$ мкрад в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений возможно использование технологии *LGSAO* для получения изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением, превышающим атмосферный предел разрешающей способности.

Список используемых источников

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 336 с.
2. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
3. Свиридов К.Н. Атмосферная оптика высокого разрешения. – М.: Знание, 2007. – Т. 1: Квазиоптимальные технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. – 200 с.
4. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
5. Больбасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М.: Физматлит, 2012. – 125 с.
6. Малашко Я.И., Наумов М.Б. Системы формирования мощных лазерных пучков. – М.: Радиотехника, 2013. – 328 с.
7. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 6. – С. 599–640.

8. *Welsh B.M., Gardner C.S., Thompson L.A.* Design and Performance Analysis of Adaptive-Optical Systems using Laser Guide Stars // *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 78. – P. 1721–1743.
9. *Fugate R.Q., Ellerbroek B.L., Higgins C.H.* Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the Starfire Optical Range // *Journal Optical Society of America A*. – 1994. – Vol. 11. – P. 310–324.
10. *Leverington D.* Observatories and Telescopes of Modern Times. – Cambridge University Press, 2017. – P. 501.
11. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск: Наука, 1986. – 248 с.
12. *Parenti R.R., Sasiela R.J.* Laser-guide-star systems for astronomical applications // *Journal Optical Society of America A*. – 1994. – Vol. 11. – P. 288–309.
13. *Дятлов В.* Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // *Зарубежное военное обозрение*. – 2006. – № 1. – С. 50–55.
14. *Дятлов В.* Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // *Зарубежное военное обозрение*. – 2006. – № 2. – С. 30–35.
15. Получение изображений космических аппаратов телескопом Алтайского оптико-лазерного центра с использованием адаптивной оптики / В.Д. Шаргородский, А.А. Галкин, Е.А. Гришин и др. // *Космические исследования*. – 2008. – Т. 46, № 3. – С. 201–205.
16. *Welsh B.M., Gardner C.S.* Effects of turbulence induced anisoplanatism on image performance of adaptive astronomical telescopes using LGS // *Journal Optical Society of America A*. – 1990. – Vol. 7. – P. 1237–1242.