

## Отклонение света от заданного направления в околоземном космическом пространстве

Игнатенко Ю.В. (1), Тряпицын В.Н. (1),  
Игнатенко И.Ю. ([IgIg@bk.ru](mailto:IgIg@bk.ru)) (2)

(1) Крымская лазерная обсерватория ГАО НАН Украины, АР Крым, пгт. Кацивели, Украина,

(2) Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Московская область, п. Менделеево, Россия

Известно явление отклонения света [1], называемое абберацией. В процессе лазерной локации светоотражателей, установленных на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) это явление обуславливает необходимость, особенно при локации узким пучком с расходимостью в несколько единиц угловых секунд, вводить упреждающий угол в направлении движения спутника в соответствии с формулой

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2v}{c}, \quad (1)$$

где  $v$  – проекция относительной скорости на плоскость изображения (или, иначе,  $v$  – видимая скорость спутника),  $c$  – скорость света в вакууме.

Лазерная локация – это измерение суммарного времени распространения короткого лазерного импульса до отражателя, представляющего собой набор трипель-призм (например, на спутнике), и обратно. Как показали многолетние лазерно-локационные наблюдения, при локации ИСЗ пучком с малой расходимостью, для успешной локации необходимо упреждающее смещение луча от направления на цель. Причем, это смещение, как правило, отличается от величины углового смещения, определенного по формуле (1). Кроме того, направление данного смещения не совпадает с направлением движения спутника. Анализ этих наблюдений позволил сделать вывод, что причиной подобной картины может быть фактор, смещающий локационный луч в направлении, отличном от направления движения спутника.

Сущность экспериментально установленного явления состоит в том, что для успешного попадания лазерного импульса в отражатели ИСЗ необходимо упреждающее отклонение от видимого положения спутника на угол, величина которого отличается от величины скоростной абберации, вычисленной по формуле (1). И, кроме того, направление упреждающего смещения, как правило, отличается от видимого направления движения спутника. Процесс визуального наблюдения аномального отклонения луча происходил непосредственно во время локации. В окуляре телескопа (рис.1) имелись целеуказатель и масштабные метки. Нижний край целеуказателя являлся точкой пересечения главной оптической оси с плоскостью изображения, на которой оператор видит цель – лоцируемый спутник. Телескоп автоматически отслеживал движение спутника по заранее

рассчитанной эфемериде. Таким образом, спутник оставался неподвижным в поле изображения, а попадавшие в поле

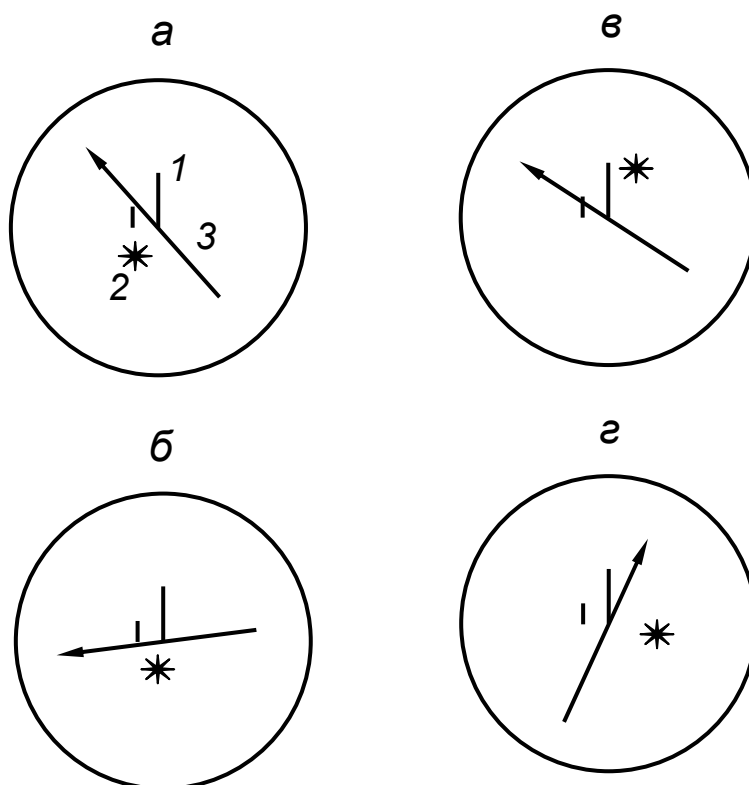


Рис. 1. Схематическое изображение мгновенной картины в поле зрения телескопа во время локации спутника: 1- целеуказатель (оптическая ось телескопа); 2 – спутник; 3 – направление движения звезд; 4 – масштабная метка; а – LAGEOS - 1 24.06.01, время 22:59:01; б – LAGEOS - 1 24.06.01, время 23:03:39; в - Ajisai 05.11.02, время 15:55:02; г - Starlette 18.04.04, время 18:18:00.

зрения звезды, двигались в направлении, противоположном движению спутника. Оператор с помощью пульта ручной коррекции имел возможность корректировать положение спутника в плоскости изображения. Тем самым обеспечивалось попадание лазерного импульса в цель.

В состав установки [2] входил телескоп ТПЛ–1 с диаметром главного зеркала 1 м и альт-азимутальной монтировкой. В качестве источника излучения использовался импульсный лазер с удвоением частоты и длиной волны на выходе  $\lambda = 0,5320$  мкм, длительностью импульса  $\tau = 250$  пс, частотой следования импульсов в режиме локации  $\approx 3$  Гц, системы регистрации и обработки сигнала, устройства автоматического сопровождения и визуального наблюдения с возможностью ручной коррекции. Последняя состоит из специального устройства визуального наблюдения, сопряженного с главной оптической осью телескопа. На выходе этого устройства установлен электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который, во-первых, улучшает видимость слабо светящихся объектов и, во-вторых, запирается с помощью электрического затвора на время вспышки лазера, тем самым, защищая глаза оператора и сам ЭОП от засветки. Конструкция узла предусматривает возможность установки окуляра для

обеспечения возможности непосредственного визуального наблюдения и установку телекамеры с целью передачи изображения на монитор компьютера [3,4].

Точность измерения расходимости стандартным методом фокального пятна подвергалась проверке специально разработанным методом [5]. Пучок лазерного излучения на выходе телескопа пропускаться через транспарант с двумя калиброванными отверстиями, расположенными на расстоянии 0,15 м и направлялся на экран, находящийся на расстоянии 2716 м от телескопа. На экран была нанесена масштабная сетка. Экран фотографировался с длительной экспозицией с близкого расстояния. В результате чего на одном кадре регистрировалось не менее десяти вспышек лазера. Фотометрическая обработка [6] достаточно большого числа фотоснимков позволила оценить величину расходимости, вызванную неточностью согласования мнимого фокуса лазера с фокусом телескопа и, соответственно, величину отклонения направления излучения лазера от оптической оси системы. Эта величина не превысила одной угловой секунды. Длительная экспозиция большого числа вспышек лазера на одном кадре, кроме того, позволила исключить влияние атмосферы на результаты измерений [7], поскольку происходит осреднение изображения отверстий и расстояния между ними и, как следствие, увеличение точности при измерении угловой расходимости лазерного луча.

Существует еще одна возможная причина, способная влиять на величину отклонения пучка от оптической оси и на точность попадания лазерного излучения в цель, обусловленная механическими и температурными деформациями монтировки телескопа. Полностью устранить их невозможно, но оценить их влияние на точность измерений вполне доступно. Для этого воспользовались свойством уголковых отражателей направлять отраженный луч точно в сторону излучателя. На внутренней поверхности купола телескопа на расстоянии 0.15 м были установлены 2 уголковых отражателя. На отражатели направлялось лазерное излучение, сформированное телескопом, а отраженные пучки наблюдались в окуляре устройства визуального наблюдения на перекрестие, совмещенном с осью телескопа. Этот же результат воспроизводился при перемещении пары отражателей в разные точки внутренней поверхности купола, имитируя, таким образом, различные угловые координаты. При этом отраженные пучки сходились в осевой точке фокальной плоскости размером, не превышающим 8". Описанный эксперимент позволил сделать вывод о том, что неизбежные деформации монтировки не оказывают заметного влияния на угловые параметры при лазерной локации. Стабильность угловых настроек обеспечивается тем, что все элементы системы оптического согласования лазер-телескоп функционально связаны только со статическими (неподвижными) элементами телескопа. Это во-первых. И во-вторых этот эксперимент подтверждает то, что свет проходит по одному и том же оптическому пути до отражателей и обратно, независимо от настроек оптической системы и ее термомеханических деформаций.

Методика измерения аберрации непосредственно следует из определения этой величины [8]. Положение спутника относительно визира, совмещенного с оптической осью телескопа в плоскости изображения, фиксировалось в момент регистрации отраженного лазерного излучения, сопровождаемого звуковым сигналом. Следует отметить, что регистрация отраженного сигнала в процессе измерения аберрации является лишь «индикатором» попадания лазерного излучения в отражатели спутника и никак не влияет на параметры измеряемой величины, поскольку (отметим особо) мы измеряем угол между видимым направлением на спутник и сформированным направлением излучения лазерного импульса, которое в поле зрения отображается как расстояние между осью телескопа (визиром) и видимым изображением спутника. Во время наблюдений фиксировались как величина аберрационного смещения, так и направление этого смещения (рис. 1) в системе координат, связанной с плоскостью изображения. Калибровка измерительной шкалы производилась по нескольким парам звезд с известным угловым расстоянием.

Первые регулярные наблюдения аберрационного смещения были проведены с мая 2001 г. по декабрь 2002 г. Эти наблюдения возобновились в апреле 2004 г. Наблюдения проводились как для высокоорбитальных спутников, таких как «Эталон», «ГЛОНАСС» (20000 км), так и для среднеорбитальных – Лагеос-1, Лагеос-2 (6000 км), а также серии низкоорбитальных спутников с высотами орбит от 450 до 1500 км [9].

Как показали регулярные наблюдения, для всех без исключения спутников имело место смещение изображения спутника относительно осевой точки (рис. 1). На рис. 2 и 3 приведены графики по результатам наблюдений, проведенных в июне 2001 г. и в июне 2002 г. Данные результаты приведены как наиболее регулярные для практически одинаковых интервалов времени в разные годы. На графиках по оси ординат отложены величины угла аберрационной поправки, выраженной в угловых секундах в зависимости от координаты вдоль орбиты спутника, вычисленные во 2-й экваториальной системе координат. Такое представление удобно потому, что в течение сравнительно небольшого промежутка времени 2-х...3-х недель положение плоскости орбиты спутника Лагеос-1 мало изменяется. Причиной некоторых качественных различий между графиками рис. 2 и 3 по нашим представлениям является поворот плоскости орбиты спутника на угол около  $80^{\circ}$  в течение года. На рис. 5 и 6 приведены результаты измерений, проведенных 18 и 28 апреля, а также 25 июня 2004 г. при наблюдении спутника Лагеос-1. Как видно из рис. 4 и рис. 2 эти графики качественно и количественно достаточно близки. Однако возможной причиной отличий может быть, как было указано, и вращение плоскости орбиты спутника вокруг апсид-линии, соединяющей точки апогея и перигея. На рис. 5 представлены результаты наблюдений аберрационных поправок, проведенных 18 и 22 апреля 2004 г. Как видно из графика, измеренная величина поправки заметно выше по сравнению с результатами, представленными на рис. 2, 3, 4, что может свидетельствовать о сезонной

зависимости. Результаты наблюдений, сведенные на один график (рис. 6), подтверждают этот вывод. На графике разным точкам соответствуют разные спутники. Причем, каждой отдельной точке соответствует усредненная величина абберационной поправки за один пролет спутника.

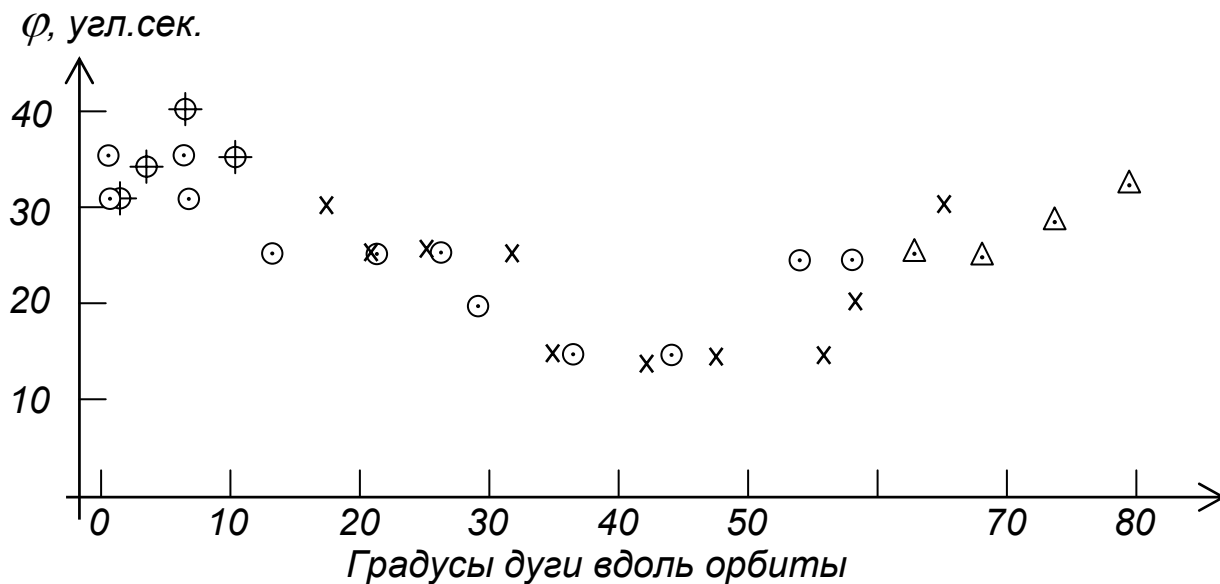


Рис. 2. Абберационная поправка. Июнь 2001 г. Лагеос-1.

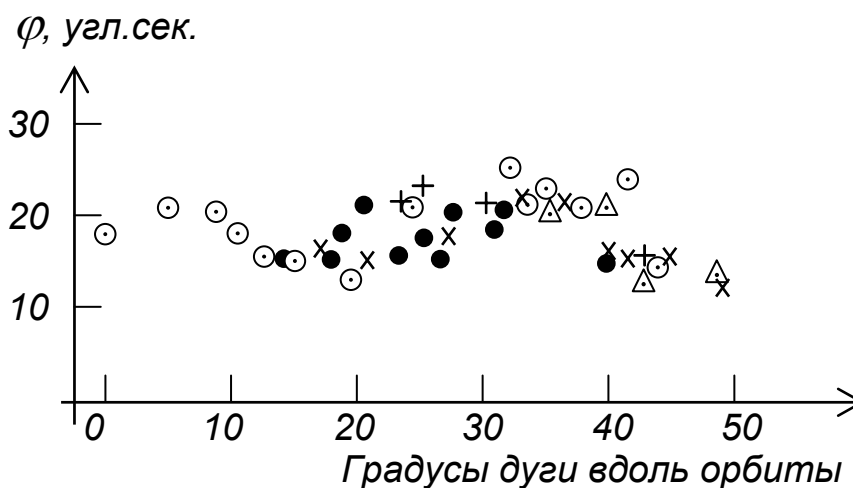


Рис.3. Абберационная поправка. Июнь 2002 г. Лагеос-1.

Анализируя результаты наблюдений, приведенных на рис. 3, 4, 5, 6, 7 можно констатировать следующее: во-первых, что измеряемые величины

абберационной поправки не являются результатом некорректно проведенных экспериментов на некачественной измерительной системе. Такой вывод следует, прежде всего, из описания методик калибровочных процедур и методики измерений. Во-вторых, приведенные величины значительно превосходят величину абберационного смещения луча, зависящую от относительной скорости спутника и станции наблюдения. Для примера отметим, что максимально возможная проекция скорости на плоскость изображения для спутника Лагос-1 в момент кульминации составляет величину 5,704 км/с, а угол скоростной абберации, вычисленный по формуле (1) равен 7,84". Как видно из графиков, величина абберационной поправки имеет значение заметно большее, чем указанное для скоростной абберации. Более того, во всех случаях наблюдается отклонение в направлении этой поправки от направления движения спутника.

Из анализа приведенных результатов настоящей работы напрашивается вывод о том, что причиной столь значительного угла отклонения лазерного луча при наличии сезонной зависимости является то, что в космическом пространстве существует среда влияющая на направление распространения света и находящаяся в сложном относительном движении. Этот вывод согласуется с результатами работ, проведенными в начале XX в. некоторыми авторами, среди которых выделяются работы Д.К.Миллера [10].

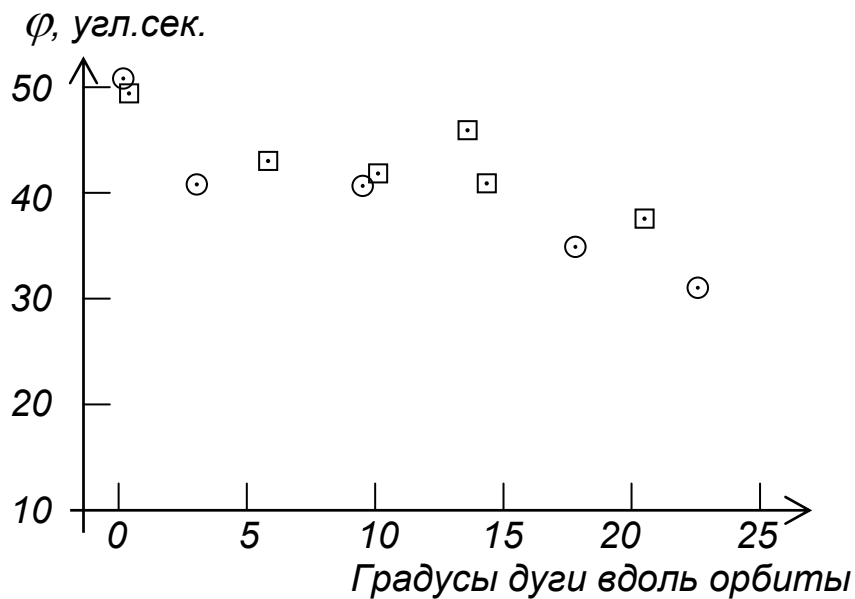


Рис. 4. Абберационная поправка. Апрель 2004 г.

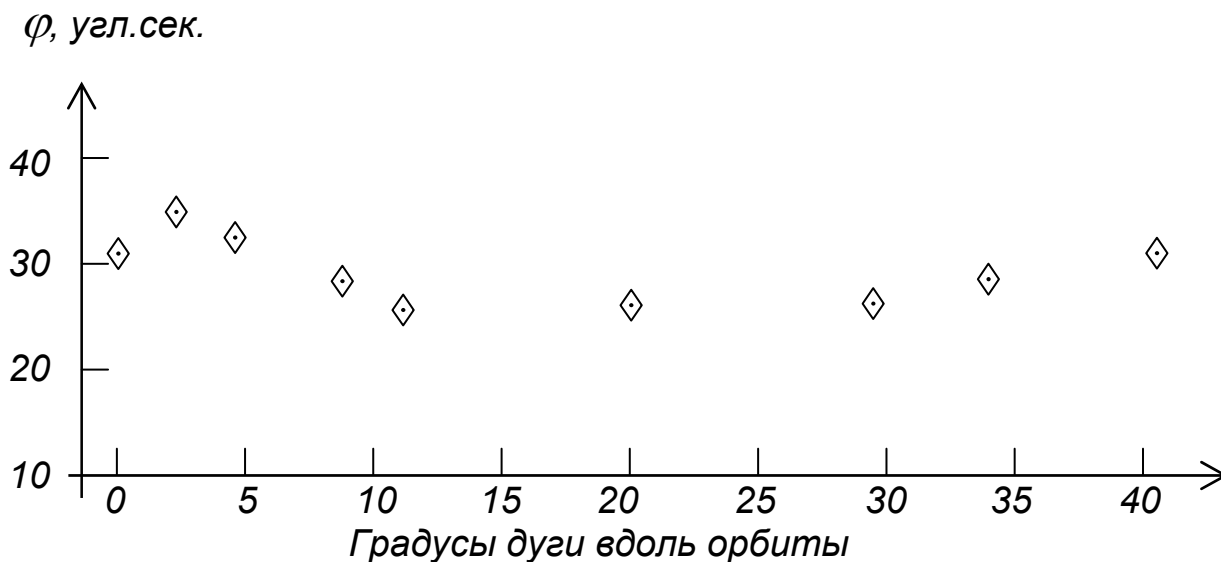


Рис. 5. Аберрационная поправка. Июнь 2004 г.

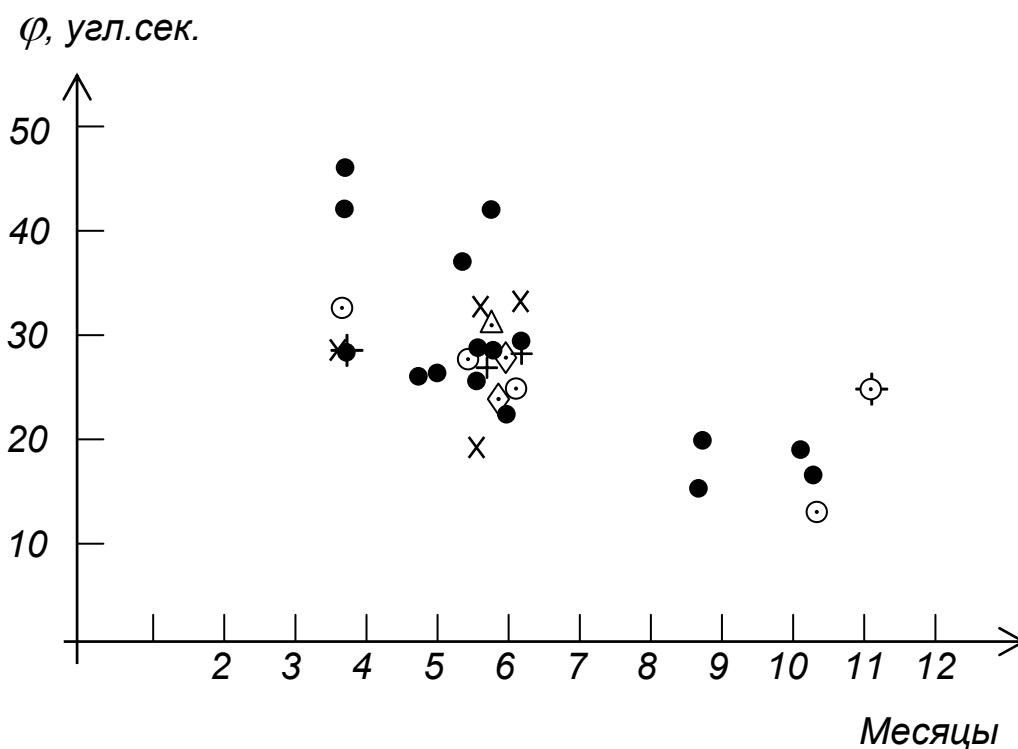


Рис. 6. Зависимость осредненной аберрационной поправки от времени. (2001, 2002, 2004 гг.)

Для дальнейшего изучения обнаруженного явления и получения его состоятельных количественных оценок была разработана система автоматической регистрации изображений.

В составе лазерно-локационной установки в 2007 г. вместо окуляра была установлена видеокамера, изображение с которой передавалось на монитор компьютера, соединённого с приёмной частью лазерно-локационной системы. Это позволило регистрировать только те кадры, которые были в момент приёма отражённого от спутника сигнала на экране монитора. Такое усовершенствование позволило регистрировать, по сравнению с десятком, при регистрации «вручную», до нескольких сот за один наблюдаемый пролёт спутника. Отметим, что для всех спутников, кроме высокоорбитальных типа

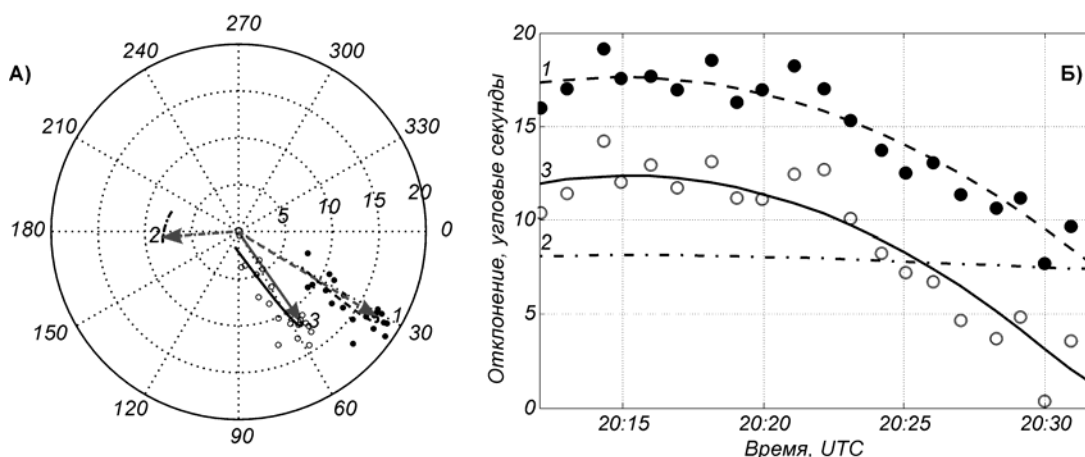


Рис. 7. Спутник LAGEOS-1 20 марта 2007 г.

А) – На диаграмме показаны величины (в угловых секундах) и направления (в градусах) проекций на плоскость изображения телескопа наблюдаемого отклонения изображения спутника 1, скоростной абберации 2 (с обратным знаком) и аномального отклонения луча 3. Стрелки указывают начало пролёта.

Б) – На графике показаны абсолютные величины (в угловых секундах) проекций на плоскость изображения видимого отклонения 1, вычисленных скоростной абберации 2 и аномального отклонения луча 3 в зависимости от текущего времени.

ГЛОНАСС, время одного локационного цикла (распространение лазерного импульса до спутника и обратно) происходило за время одного телевизионного кадра, который длится 40 мс при частоте 25 кадров в секунду. Калибровка тракта принципиально не отличается от той, которая проводилась при ручной регистрации изучаемого явления, с некоторыми дополнениями, связанными со спецификой работы автоматической системы [11]. Ведение телескопа осуществлялось автоматически по эфемериде, рассчитанной по известным элементам орбиты спутника. Во время локации с клавиатуры компьютера изображение спутника устанавливалось в том месте по отношению к перекрестию, где регистрировался отражённый сигнал.



С марта по ноябрь 2007 г. было проведено несколько десятков зарегистрированных наблюдений различных спутников. В отличие от визуальной регистрации, в этом случае фиксировалось от нескольких сот до тысячи и более точек за один наблюдаемый пролёт спутника. Обработке

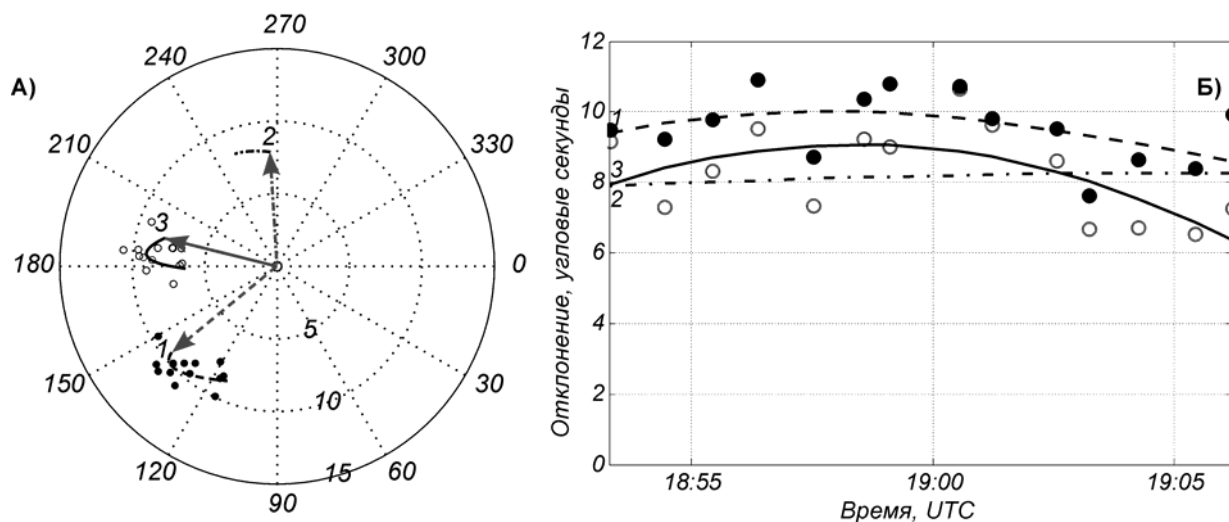


Рис. 8. Спутник LAGEOS-1 28 июля 2007 г.

подвергались лишь те пролёты спутников, в которых количество точек превышало сто, а размер изображения спутника не превосходил  $7'' \dots 8''$ , что сводило до минимума ошибку измерений. Кроме того, обрабатывались результаты локации, когда спутник наблюдался практически на всей видимой части орбиты. Для низких спутников начало и конец наблюдения происходил на высоте  $16^\circ \dots 17^\circ$  над горизонтом, для Лагеоса –  $25^\circ \dots 35^\circ$  и, кроме того, при благоприятных условиях регистрировался достаточно равномерный ряд сигнальных точек. Для примера приведем результаты для спутника LAGEOS-1, полученные в разное время.

Благодаря использованию видеокамеры и специального программного обеспечения удалось значительно улучшить качество и увеличить количество наблюдений. Результаты этих наблюдений в целом подтверждают полученные ранее.

## Литература

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. - М.: Наука 1967.
2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации станций лазерно-локационных «Крым». – М.: ФИАН им. П.Н.Лебедева, 1989.
3. V.K.Abalakin, M.K.Abele, Yu.N.Artyukh, N.G.Basov, V.N.Bronnikov, Yu.V.Ignatenko, Yu.L.Kokurin, V.V.Kurbasov, K.K.Lapushka, V.F.Lobanov, A.G.Masevich, A.N.Sukhanovsky, Yu.P.Shilokhvost, S.G.Shubin, Ya.S.Yatskiv. Laser Network Designed For the Moon and Artificial Earth Satellite Ranging. Proceedings of the International Conference on Earth Rotation and the Terrestrial Reference Frame. July 31 - August 2, 1985, Columbus, Ohio. Vol.1. P. 246 – 256.

4. Yu.V.Ignatenko, Yu.L.Kokurin, V.V.Kurbasov, V.F.Lobanov, A.N.Sukhanovsky, V.N.Triaptsin. Upgrading the SLR Station Katsiveli. X International Workshop On Laser Ranging Instrumentation. Shanghai. 1996.
5. Игнатенко Ю.В. Методика оценки качества согласования лазера с телескопом и расходимости лазерного пучка на станции КЛО ГАО НАНУ. Сборник тезисов. III Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Кацивели, Крым, 2003.
6. А.А. Шишловский. Прикладная физическая оптика, М.:Физматгиз, 1961.
7. И.Л.Кузнецов, Ю.В.Игнатенко. Фотометрический анализ и расчет плоского турбулентного пламени. Физика горения и взрыва, 1967, 1, с.157.
8. Игнатенко Ю.В., Тряпицин В.Н., Игнатенко И.Ю. Измерение скоростной аберрации при локации искусственных спутников Земли. «Проблемы управления и информатики», №2, 2004, с. 103 – 106.
9. Игнатенко Ю.В., Тряпицин В.Н., Игнатенко И.Ю. Аномальное отклонение лазерного луча при лазерно-локационных измерениях. Сборник тезисов. VI Украинская конференция по космическим исследованиям, 3 – 10 сентября 2006 г. НЦУИКС, Евпатория.
10. Миллер Д.К. Эксперименты по эфирному ветру и определение абсолютного движения Земли.//Эфирный ветер. Сб. ст. под ред. д.т.н. В.А. Ацюковского – М.:Энергоатомиздат, 1993.
- 11.Игнатенко И.Ю., Савостин Ю.М. Использование цифрового квадратурного демодулятора при измерении отношения двух величин.//Проблемы развития средств гидроакустических измерений и методов обработки информации: Сб.научн.тр./ГП «ВНИИФТРИ».-М.-2000.