

## ОТКЛОНЕНИЕ СВЕТА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.

Ю.В. Игнатенко<sup>1</sup>, И.Ю. Игнатенко<sup>2</sup>, В.Н. Тряпицын<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Крымская лазерная обсерватория Главной астрономической обсерватории НАН Украины,  
Ялта, Республика Крым

<sup>2</sup> ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и  
радиотехнических измерений”, Менделеево, Россия

igig@vniiftri.ru

В статье описаны результаты исследования аномального отклонения света, обнаруженного во время лазерно-локационных измерений ИСЗ. Изложена разработанная специальная методика построения трёхмерного вектора смещения лазерного луча по проекциям на плоскость изображения телескопа. Изложена схема вывода соответствующих уравнений. Описана методика и результаты пробных измерений величины отклонения света вблизи поверхности Земли, подтверждающих всеобщий характер этого явления. Из полученных результатов сделан вывод о движении светоносной среды, традиционно называемой светоносным эфиром, со скоростью, по величине и направлению близкой, но не равной скорости Земли. Измеряемое отклонение света от заданного направления является результатом сложения относительной скорости спутника, скорости движения Земли и, наконец, скорости светоносной среды. Это последнее обстоятельство объясняет сезонную зависимость результатов измерений.

**Ключевые слова:** лазерная локация, отклонение света, светоносная среда, светоносный эфир.

### 1 Введение

Задачей лазерной локации является измерение времени распространения короткого лазерного импульса до отражателя и обратно. При проведении лазерной локации искусственных спутников Земли (ИСЗ) с использованием лазерного импульса с малой угловой расходимостью ( $3'' \div 5''$ ) и длительностью порядка 100 пикосекунд, было обнаружено [1], что для успешной локации необходимо упреждающее смещение лазерного луча от видимого направления на цель. Выполнение локации узким лазерным пучком имеет чисто энергетический смысл и не является необходимым условием при решении основной задачи лазерной локации. Попытки устранить это явление путём юстировок и оптических согласований ни к чему не привели. Эффект смещения изображения спутника от осевой точки устойчиво сохранялся. Более того, направление смещения, как правило, не совпадало с видимым направлением движения спутника, при наличии скоростной аберрации. Известное явление скоростной аберрации возникает при движении спутника относительно лазерно-локационной станции. Оно состоит в необходимости упреждающего смещения точки прицеливания относительно видимого положения спутника в момент старта лазерного импульса. Направлено это смещение вдоль орбиты спутника в сторону его видимого движения и определяется по формуле:

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

где  $v$  – проекция относительной скорости ИСЗ на плоскость изображения телескопа (видимая скорость),  $c$  – скорость света,  $\varphi$  – угловое смещение вдоль траектории движения спутника [2].

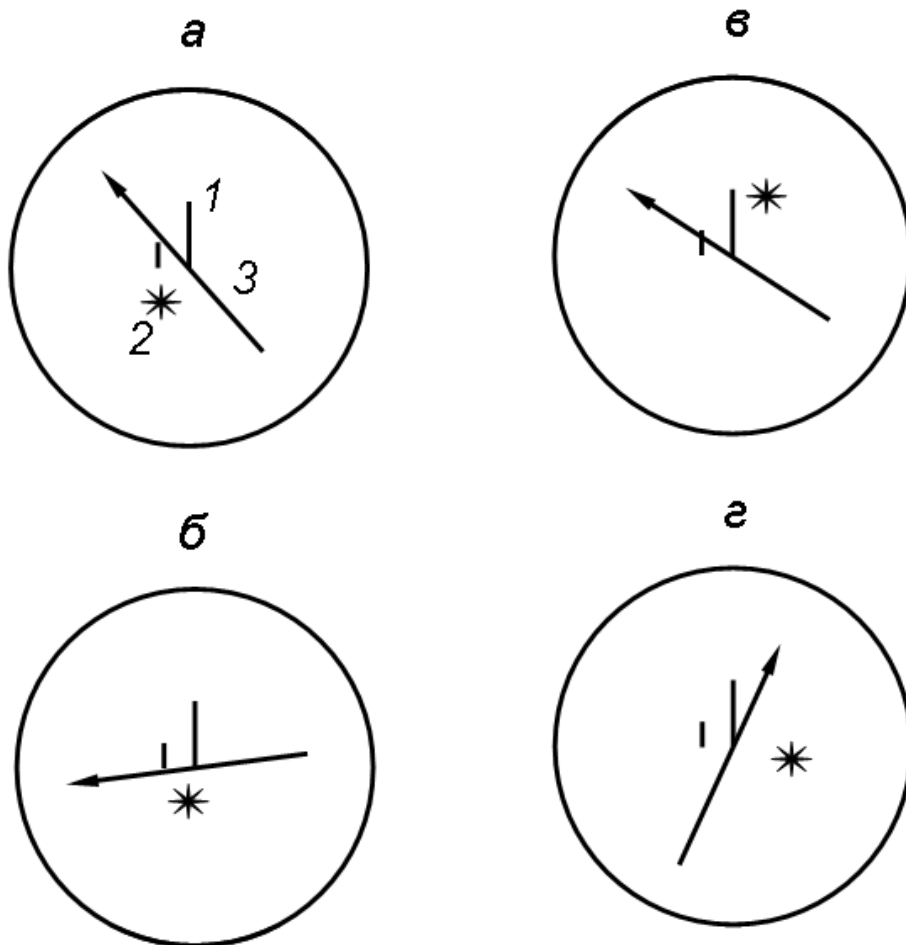


Рис. 1: Схематическое изображение мгновенной картины в поле зрения телескопа во время локации спутника: 1- целеуказатель (оптическая ось телескопа) и масштабная метка; 2 – спутник; 3 – направление движения звезд; а – LAGEOS - 1 24.06.01, время 22:59:01; б – LAGEOS - 1 24.06.01, время 23:03:39; в – Ajisai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

В качестве примера на рис. 1 приведены схематические изображения реально наблюдавшейся картины смещения изображения спутника от направления скоростной аберрации. Рисунок отображает кинематику относительного движения на фоне звёзд в плоскости изображения. Точка пересечения стрелки 3 и штриха 1 является точкой пересечения оптической оси телескопа с плоскостью изображения. Результатом наблюдения и анализа данного явления стала следующая постановка задачи:

- исследовать кинематику наблюдаемого явления

и, если удастся, то

- выяснить причины данного явления.

Наблюдать и измерять величины аберрационного смещения изображения спутника в процессе локации оказалось возможным благодаря соответствующей конструкции лазерно-локационной установки и системы оптического согласования.

## 2 Лазерно-локационная установка и методика измерений

В состав установки [3, 4] входит телескоп ТПЛ-1 с диаметром главного зеркала 1 м, альтимутальной монтировкой. В качестве источника излучения использовался импульсный

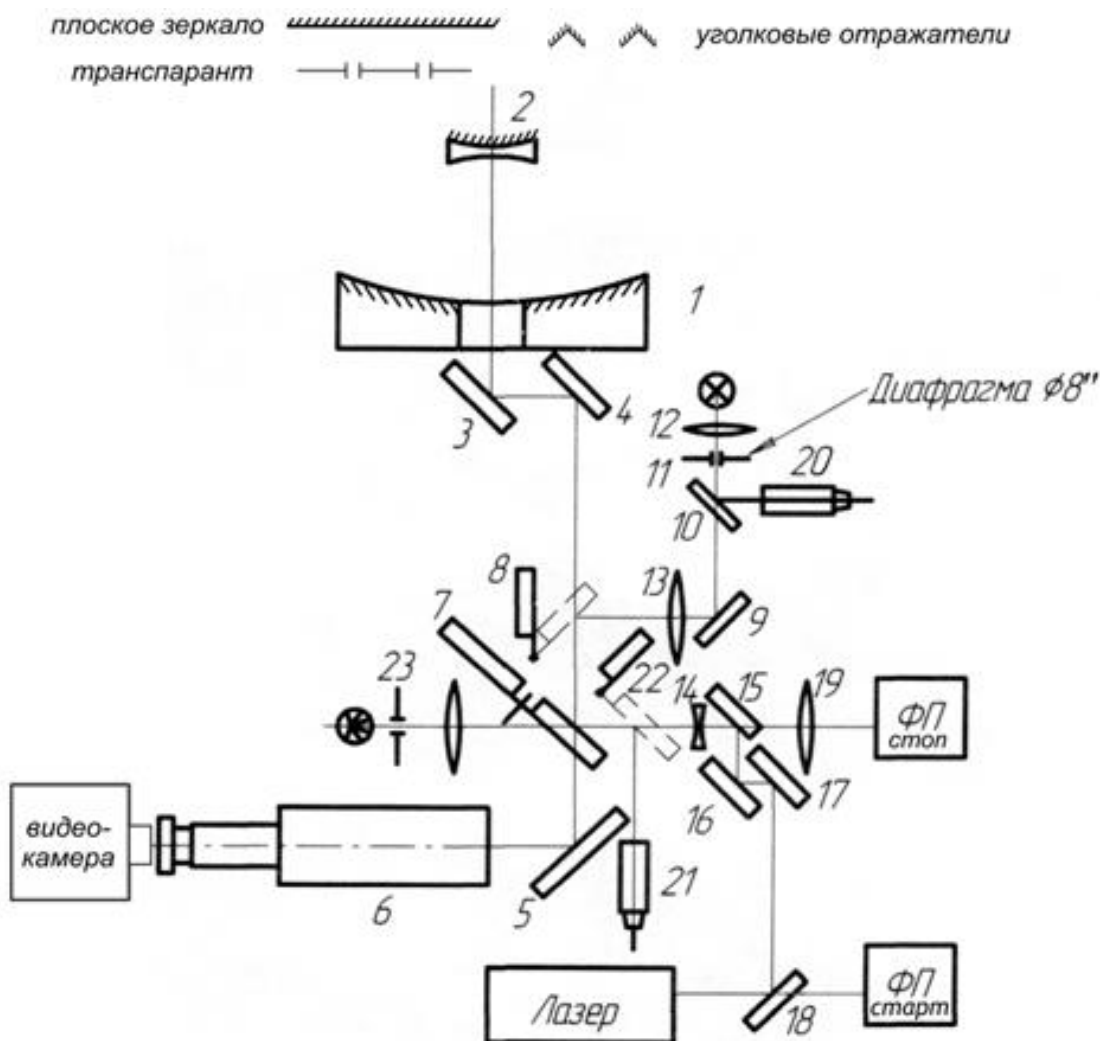


Рис. 2: Оптическая схема лазерно-локационной установки. Телескоп ТПЛ-1. 1- главное зеркало; 2 – вторичное зеркало; 3, 4, 5 - диагональные зеркала; 6 – гидирующее устройство. Система оптического согласования лазер – телескоп. 7 – коммутирующее устройство; 8, 22 – перекидные настроечные зеркала; 13, 14, 19 – согласующие линзы; 9, 15, 16, 17, 18 - зеркала; 10, 11, 12, 20 – устройство типа “кошачий глаз”; 23 – визир перекрестия, согласованный с фотоприемником ФП, и направлением излучения лазера с помощью диафрагмы 11; 20, 21 – окуляры.

лазер с удвоением частоты и длиной волны на выходе  $\lambda = 0,5320$  мкм, длительностью импульса  $\tau = 250$  пс, частотой следования импульсов около 3 Гц, системы регистрации и обработки сигнала, устройства автоматического сопровождения и визуального наблюдения с возможностью ручной коррекции ведения. Система визуального наблюдения 6 (гидирующее устройство) сопряжена с главной оптической осью телескопа. На выходе устройства установлен электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который, улучшает видимость слабо светящихся объектов и запирает канал на время вспышки лазера, защищая глаза оператора и сам ЭОП от засветки рассеянным лазерным излучением. Конструкция устройства предусматривает возможность установки окуляра для непосредственного визуального наблюдения, а также установку телекамеры для передачи изображения на монитор компьютера.

**Оптическая схема телескопа и системы оптического согласования.** Зеркала 1, 2, 3, 4, 5 - составные элементы телескопа, 6 – устройство визуального наблюдения. Юстировочные зеркала 15, 16, 17, 18 системы согласования служат для ввода лазерного

пучка в телескоп. Рассеивающая линза 14 служит для совмещения мнимого фокуса лазера с фокусом телескопа в направлении оптической оси. Для этой цели линза 14 снабжена устройством перемещения вдоль оптической оси. Такой способ согласования мнимого фокуса лазера с реальным фокусом телескопа позволяет избежать фокусировки лазерного излучения и возникновения лазерной искры, которая поглощает энергию лазерного излучения. Правильность согласования контролируется с помощью устройства типа “кошачий глаз”, состоящего из элементов 10, 11, 12 и окуляра 20. Диафрагма 11 диаметром 8” находится в сопряжённом фокусе телескопа. При настройке системы сфокусированное линзой 13, ослабленное на зеркале 8, лазерное излучение с помощью юстировочных зеркал 16 и 17 при одновременном наблюдении через окуляр 20 совмещается с центром диафрагмы 11, что автоматически обеспечивает направление излучения лазера вдоль оптической оси телескопа. По величине изображения сфокусированного лазерного излучения в плоскости диафрагмы 11 с помощью измерительной шкалы окуляра 20 можно определить величину расходимости лазерного луча на выходе телескопа. Для визуального наблюдения сфокусированного лазерного излучения перед диафрагмой 11 помещалось тонкое матовое стекло или бумага калька. В качестве перекидного зеркала 8, направляющего часть лазерного излучения на диафрагму 11, используется стеклянная пластина оптического качества без отражающего покрытия (Рис. 2). Дополнительно для уменьшения интенсивности сфокусированного на диафрагме 11 лазерного излучения во время юстировочных работ перед окуляром 20 устанавливается ослабляющий светофильтр.

### 3 Измерение расходимости лазерного излучения

Необходимость измерения расходимости становится очевидной, если принять во внимание, что величина расходимости лазерного луча определяет разрешающую способность угловых измерений.

Точность измерения расходимости стандартным методом фокального пятна для наших условий подверглась проверке специально разработанным нами методом, который состоит в следующем. Луч лазерного излучения на выходе телескопа пропускаться через транспарант с двумя калиброванными отверстиями, расположенными на расстоянии 0,15 м и направлялся на экран, установленный на расстоянии 2,7 км 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 десятка вспышек лазера. Фотометрическая обработка [5] большого числа фотоснимков позволила оценить величину расходимости, вызванную неточностью согласования мнимого фокуса лазера с фокусом телескопа. Эта величина не превысила одной угловой секунды. Длительная экспозиция большого числа вспышек лазера на одном кадре позволила исключить влияние турбулентности атмосферы [6] на результаты измерений за счёт осреднения изображения отверстий и расстояния между ними и, как следствие, увеличение точности при измерении угловой расходимости лазерного луча.

Принято считать, что механические и температурные деформации монтажки телескопа могут повлиять на угловые параметры лазерно-локационных измерений. Для астрофизических наблюдений такая возможность скорей всего оправдана. Что же касается лазерной локации, то тут дело обстоит несколько иначе. Свет внешнего источника от входного зрачка проходит по оптической системе телескопа до плоскости изображения, затем обратно – от лазера до выхода из телескопа за время  $t \leq 1 \cdot 10^{-7}$  с по одному и тому же пути. Понятно, что за такой короткий промежуток времени сколько-нибудь заметные деформации монтажки маловероятны. И, тем не менее, чтобы окончательно снять какое бы то ни было сомнение, нами была проведена специальная экспериментальная проверка изложенного соображения. Для этой цели было использовано свойство уголкового отража-

телей, направлять отражённый луч точно в сторону излучателя. Для этого на внутренней поверхности купола телескопа на расстоянии 0,15 м были установлены два уголкового отражателя. На отражатели направлялся лазерный луч, сформированный телескопом, а отражённые лучи наблюдались в окуляре гидирующего устройства на перекрестии, совмещённом с фокусом телескопа и лазера. Этот же результат воспроизводился при перемещении пары отражателей в разные точки внутренней поверхности купола, имитируя, таким образом, различные угловые координаты. Во всех положениях уголкового отражателей отражённые пучки сходились в осевой точке фокальной плоскости в круге размером не превышающем 7". Описанный эксперимент позволил сделать вывод о том, что неизбежные деформации монтировки телескопа не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на угловые параметры при лазерной локации. Стабильность угловых настроек в системе оптического согласования обеспечивалась ещё и тем, что все детали этой системы конструктивно связаны только со статическими (неподвижными) элементами телескопа [7].

#### 4 Методика проведения эксперимента

Способ измерения абберационного смещения непосредственно следует из его определения. Положение спутника относительно визира, совмещённого с оптической осью телескопа в плоскости изображения, фиксировалось в момент регистрации отраженного лазерного излучения, сопровождаемого звуковым сигналом. Из результатов эксперимента с уголковыми отражателями (описанными выше) следует, что регистрация отражённого сигнала в процессе измерения абберации является лишь "индикатором" попадания лазерного излучения в отражатели спутника и никак не влияют на результаты измерений, поскольку мы (отметим это) измеряем угол между видимым направлением на спутник и сформированным направлением лазерного излучения. Этот угол в плоскости изображения отображается как расстояние между оптической осью телескопа (перекрестием) и видимым изображением спутника. Во время наблюдений фиксировались как величина абберационного смещения, так и направление этого смещения (рис. 1). Калибровка измерительной шкалы производилась по нескольким парам звёзд с известным угловым расстоянием.

Регулярные наблюдения абберационного смещения света были проведены с мая 2001 по декабрь 2002 г. [1,2]. И возобновлены в апреле 2004 г. Проводилась локация высокоорбитальных спутников, таких как Эталон, ГЛОНАСС (20000 км). Среднеорбитальных - Лагеос-1, Лагеос-2 (6000 км). А также серии низкоорбитальных спутников с высотами орбит от 450 до 1500 км. Для всех без исключения наблюдаемых спутников имело место смещение изображения спутника относительно осевой точки (рис. 1). На рис. 3 и 4 приведены графики по результатам наблюдений, проведённых в июне 2001 и в июне 2002 гг. спутника Лагеос-1. Точкам разной формы на графиках соответствуют измерения, проведённые в разные дни. Эти результаты приведены как наиболее регулярные для практически одинаковых интервалов времени в разные годы. На графиках по оси ординат отложены величины угла абберационной поправки, выраженной в угловых секундах в зависимости от координаты вдоль орбиты спутника, вычисленные во второй экваториальной системе координат. Такое представление наиболее удобно потому, что в течение сравнительно небольшого промежутка времени 2-х...3-х недель положение плоскости орбиты спутника мало изменяется. Это обстоятельство позволяет размещать на одном графике результаты наблюдений, проведённых в разные дни, как пространственно совместимые. Дело в том, что законы небесной механики [20] приводят к вращению плоскости орбиты ИСЗ в данной системе координат из-за того, что не соизмеримы период суточного вращения Земли (солнечные сутки) и период оборота ИСЗ вокруг Земли. Тем не менее, эта система координат достаточно удобна для представления особенно конечных результатов наблюдений.

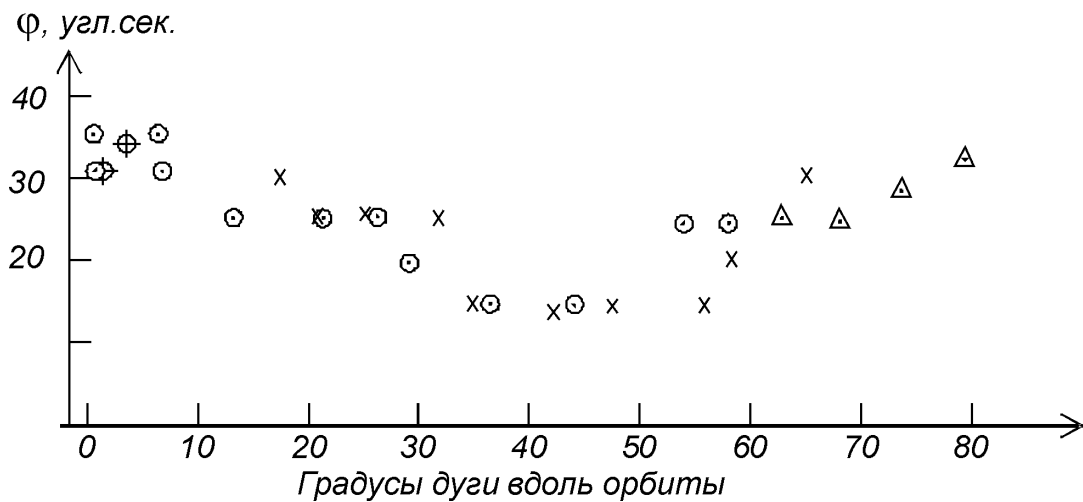


Рис. 3: Абберационная поправка. Июнь 2001 г. Лагеос-1

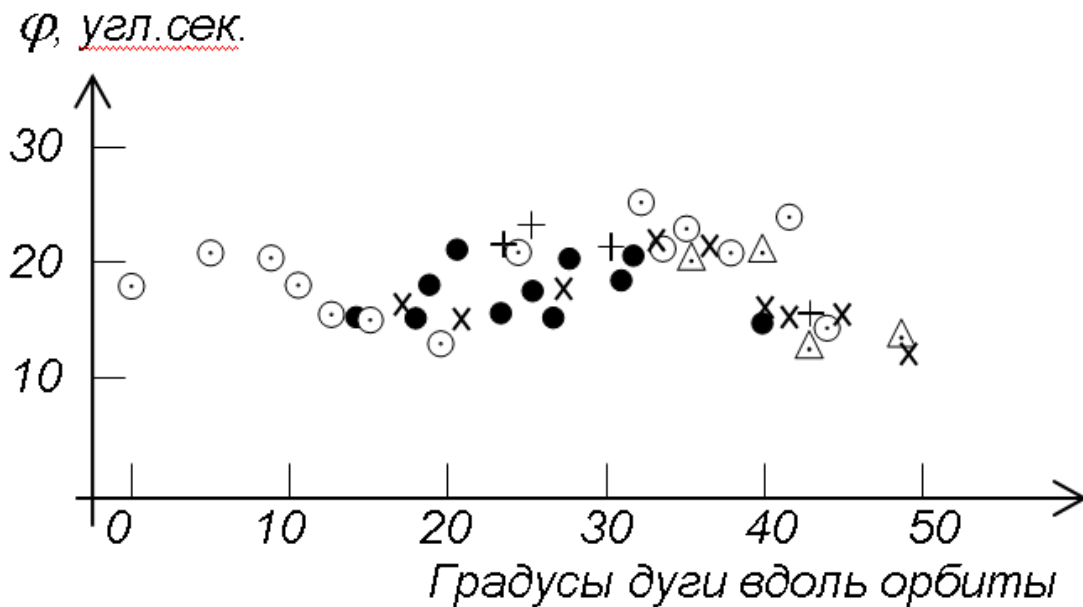


Рис. 4: Абберационная поправка. Июнь 2002 г. Лагеос-1.

Анализируя результаты, проведённых (по существу пробных) наблюдений, можно констатировать что, измеряемые величины абберационной поправки являются результатом тщательно проведённых наблюдений. Такой вывод следует, прежде всего, из реализованной схемы самой установки вместе с системой согласования и методики измерений. Применение именно такой системы оптического согласования и позволило наблюдать это интересное явление. Практически во всех случаях направление поправки не совпадает с направлением движения спутника. Обратим внимание на этот важный результат. Измеренные величины угла отклонения луча, как правило, превосходит величину абберационного смещения (скоростной абберации) этого луча, зависящую от относительной скорости спутника и станции наблюдения. В качестве примера отметим, что максимально возможная проекция скорости на плоскость изображения для спутника Лагеос-1 в момент кульминации составляет 5,704 км/с, а угол скоростной абберации, соответствующий ей и вычисленный по формуле (1) равен 7,84". Как видно из графиков, величина абберационной поправки имеет значение заметно большее, чем указанное для скоростной абберации. Как было отмечено, в процессе работы наблюдалось большое количество и других спутников как

низких, так и высоких. Однако, спутники Лагос-1 и Лагос-2 считаются в некотором смысле “эталонными”, с устойчивыми орбитами. И ещё важным обстоятельством является то, что в силу небольших размеров и невысокой яркости, размер изображения этих спутников минимально возможный. Что в свою очередь улучшает точность измерения угла отклонения света. Прежде чем продолжать следующие эксперименты со спутниками, было решено проверить, насколько измерительная система и методика эксперимента правильны. И, чтобы исключить какие бы то ни было сомнения, что с помощью лазерно-локационной системы и соответствующей методики измеряется именно отклонение света, а ни что-то другое, было принято решение провести подобные эксперименты на поверхности Земли. С помощью телескопа это сделать достаточно сложно и не очень удобно, поэтому была разработана и изготовлена простая установка, для проведения экспериментов на поверхности Земли. Эта установка представляла собой упрощённый аналог лазерно-локационной системы, где и излучатель и отражатель доступны наблюдателю [8].

## 5 Измерение отклонения света вблизи поверхности Земли

Главным оптическим элементом установки для наземных измерений использован стандартный автоколлиматор ОСК-2 с объективом диаметром 0,15 м. и с фокусным расстоянием 1,6 м. В качестве излучателя использовался непрерывный гелий-неоновый лазер. Луч лазера вводился через согласующую рассеивающую линзу с помощью делительного кубика и направлялся вдоль оптической оси объектива. Наличие делительного кубика в оптической схеме установки позволяло одновременно направлять на отражатель и наблюдать отражённое лазерное излучение, измерять отклонение от первоначального направления с помощью окулярного микрометра.

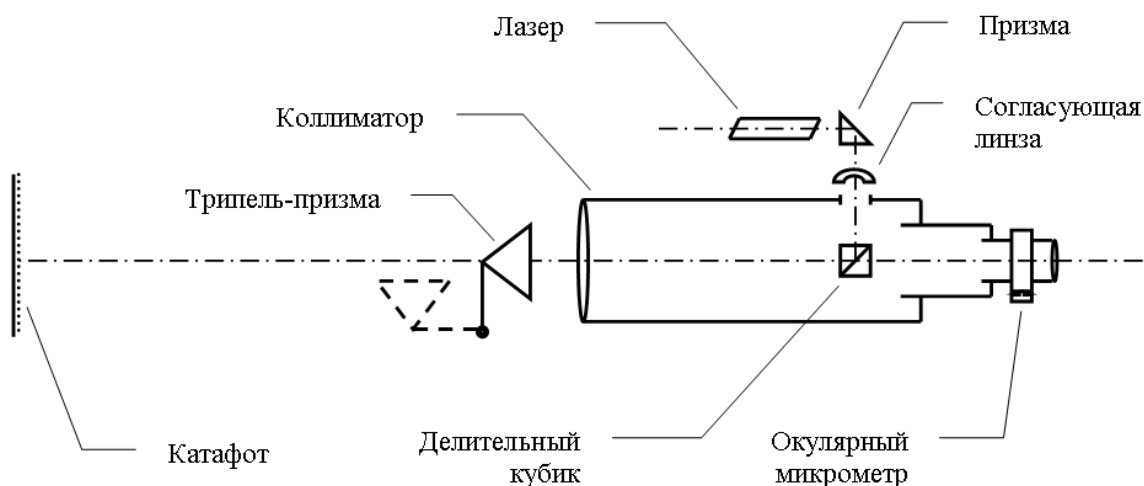


Рис. 5: Оптическая схема установки

Направление излучения, сформированного коллиматором, определялось с помощью высокоточного уголкового отражателя. Пучок лазерного излучения диаметром 8 мм, выходящий из объектива коллиматора через специальную фигурную диафрагму, направлялся в центр уголкового отражателя таким образом, чтобы отражённый пучок полностью “проваливался” обратно в диафрагму. Затем, диафрагма убиралась из поля зрения, и перекрестие окулярного микрометра совмещалось с центром изображения отраженного пучка с помощью двухкоординатного юстировочного устройства. Уголкового отражателя, закреплённый на фиксируемом поворотном устройстве, отводился, и луч лазера попадал на мишень-отражатель, удалённую от установки на расстояние 92 м (91995 мм). В качестве отражателя был использован геодезический катафот, обладающий высоким коэффициентом

отражения и широкой (несколько градусов) диаграммой направленности. Диаметр изображения лазерного пучка на мишени был равен 18 мм. Отражатель с такими свойствами наилучшим образом обеспечивал аналогию наземных измерений и лазерной локации ИСЗ. Отражатель был установлен на жёсткой металлической колонне с бетонным основанием.

Для измерения угла  $\varphi$  отклонения от первоначального (нулевого) направления перекрестие окулярного микрометра с помощью микрометрического винта совмещалось с центром изображения лазерного пучка на отражателе. Это не трудно было сделать, поскольку изображение пучка на отражателе имело форму круга. Кроме того, изображение круга лазерного излучения концентрично совмещалось с изображением окружности на отражателе с перекрестием в центре. Отсчёты снимались со шкалы окулярного микрометра с точностью до 1 мкм. При известном опыте оператора такая точность отсчётов вполне доступна.

Измерения производились по двум направлениям: горизонтальному ( $x$ ), и вертикальному ( $y$ ), что позволило определить истинную величину и направление вектора смещения. Угол смещения луча определялся по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta l}{b}, \quad (2)$$

где  $\Delta l$  – отсчёт по микрометру, величина  $b$  находилась по формуле

$$b = F \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \beta, \quad (3)$$

где  $F$  – фокусное расстояние объектива установки,  $\alpha$  – размер калибра, установленного в плоскости отражателя,  $\beta$  – размер изображения калибра  $\alpha$ , измеренного с помощью окулярного микрометра. Учитывая то, что угол  $\varphi$  мал, формулу (2) можно записать в виде

$$\varphi = \frac{\Delta l}{b}. \quad (4)$$

Проведённые таким образом калибровочные измерения показали, что 1 мкм ставится в соответствие 0,127".

Измерения проводились и в дневное и в ночное время. Часть измерений проводилась непрерывно в течение суток с интервалом между отсчётами в один час. Так как измерения проводились отдельно по  $x$  и  $y$ , то по каждой из координат делалось по 5 – 8 единичных отсчётов по каждой из координат. Поэтому одной точке на графике соответствовало 10 – 16 отсчётов. На рис. 6 приведён график угла отклонения света от заданного направления. Величина угла рассчитана по формуле (4). В этой формуле измеряемой величиной является  $\Delta l$ , которая отсчитывалась окулярным микрометром от нулевого положения до центра изображения лазерного пучка. Графики рис. 7 и 8 принципиально мало чем отличаются от графика на рис. 6, несмотря на то, что в этот день 29.03.2006 г. произошло солнечное затмение, которое продолжалось с 9:30 (по Гринвичу).

Как видно из графика, особых, заметных аномалий в этот период времени не наблюдалось [9]. Обращает на себя внимание флуктуирующий характер угла отклонения лазерного луча. На характер отклонения луча могли влиять, по-видимому, различные факторы, включая, например, рельеф местности, на которой проводились измерения. Дело в том, что здесь горная местность и район тектонического разлома. Могут ли эти факторы влиять на результаты измерений, нам неизвестно. Измерительная трасса проходила с запада на восток практически горизонтально вдоль морского берега на высоте около 50 метров над уровнем моря. Объяснить полученный результат турбулентными флуктуациями показателя преломления атмосферы, нет оснований. Атмосферная турбулентность характерна



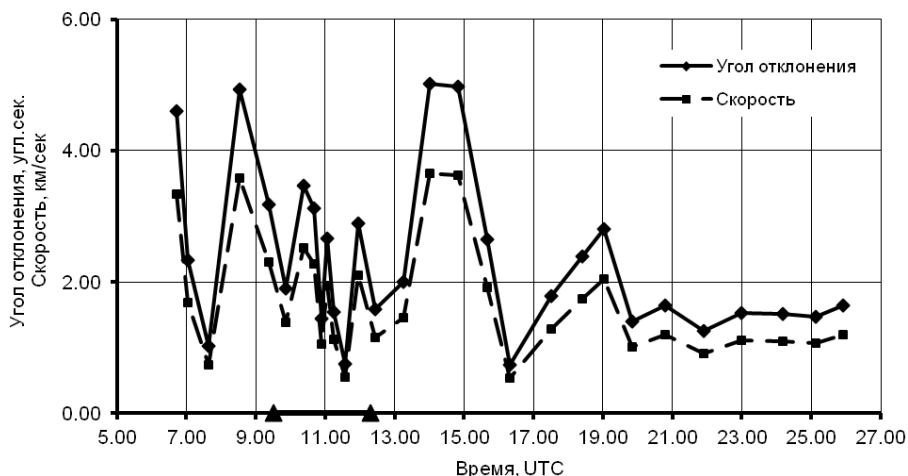


Рис. 6: Результаты измерений 29 марта 2006 года

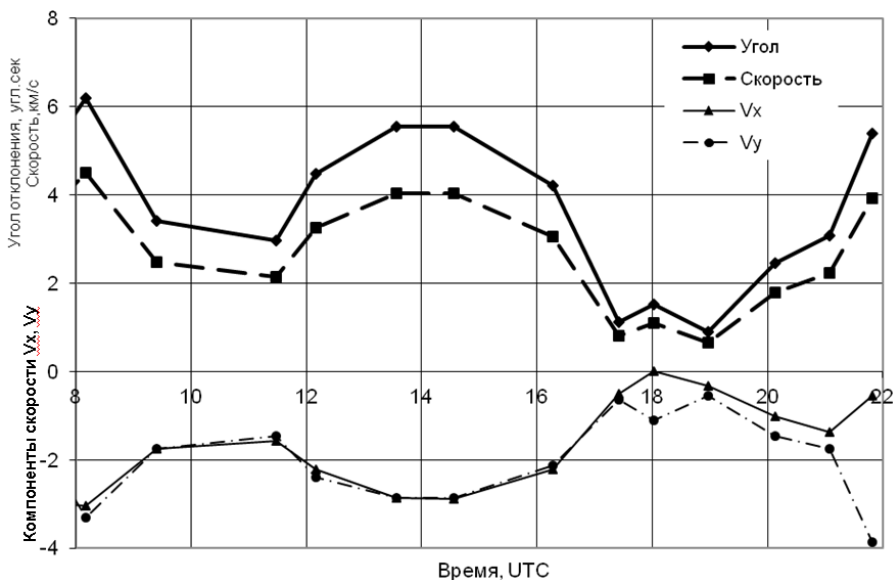


Рис. 7: Результаты измерений 5 июля 2006 года

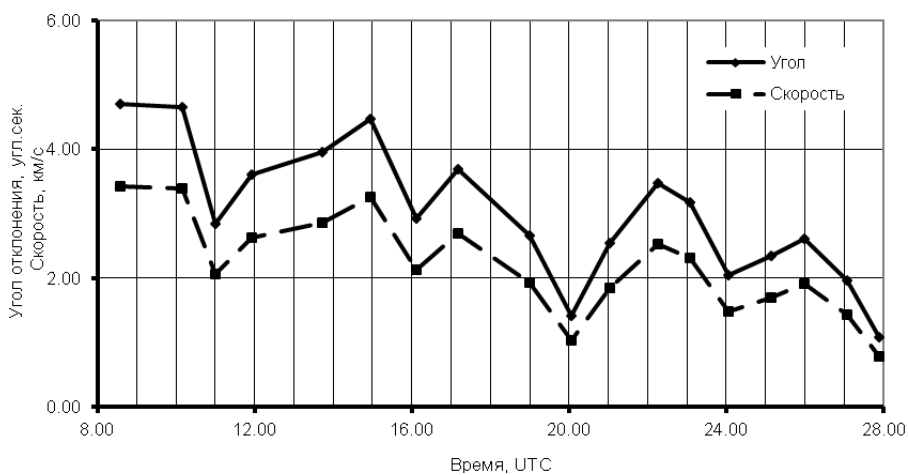


Рис. 8: Результаты измерений 27 января 2006 года

тем, что флуктуации скорости, плотности и температуры воздуха имеют более высокие характерные частоты [10] и поэтому приводят к незначительному изотропному размытию границы изображения лазерного пучка на поверхности отражателя, поскольку в приземном слое доминирует мелкомасштабная турбулентность [11]. Кроме того, измерения проводились в таких погодных условиях, когда изображение и относительное положение отклонённого лазерного пучка как целого на поверхности отражателя не изменялось в течение нескольких секунд. Отметим, что доминирующим направлением отклонения луча было направление снизу вверх. Учитывая сказанное, характер полученных результатов объяснить влиянием атмосферы, неправомерно. Таким образом, задача проверки, возможны ли измерения угла отклонения

света методом лазерной локации, была успешно решена. Кроме того, полученные результаты (хоть и немногочисленные) подтверждают наличие явления отклонения света в непосредственной близости от поверхности Земли. Для более глубоких выводов о характере и свойствах отклонения света в этих условиях необходимо проводить специальные исследования регулярно хотя бы в течение года, в автоматическом режиме, с соответствующей технологией обработки большого объёма измерений.

## 6 Автоматическая регистрация изображения спутника

Лазерно-локационная установка (рис. 2) в 2007г. была усовершенствована. Вместо окуляра была установлена видеокамера, изображение с которой передавалось на монитор компьютера, соединённого с регистрирующей частью лазерно-локационной системы. Специальная программа позволила автоматически регистрировать только тот кадр, который в момент приёма отражённого от спутника сигнала был на экране монитора. Такое усовершенствование системы регистрации дало возможность “запоминать” до нескольких сот циклов локации за один наблюдаемый пролёт спутника. Изменение положения спутника за время распространения ответного лазерного импульса до момента регистрации (20...25 мс) составляло менее 0,1 угловой секунды. Это при том, что величина углового смещения спутника 10...20 и более угловых секунд (рис. 9А, 10А). Все зарегистрированные кадры подвергались дальнейшей обработке.

## 7 Обработка зарегистрированных кадров

Начальная обработка массива первичных данных [12] заключалась в определении разности координат между центром изображения ИСЗ (точки 1) и центром окружности на рис. 9А и 10А. по двум прямоугольным координатам  $x$  и  $y$ . Затем проводилась предварительная медианная фильтрация отклонений по каждой из координат для очистки от выбросов и сглаживание методом скользящего среднего. Величина интервала осреднения выбиралась в зависимости от длительности пролёта и плотности массива точек. Из пар отклонений по осям абсцисс и ординат получалась последовательность векторов. Далее, для момента времени, когда был зафиксирован вектор наблюдаемого отклонения 1, вычитается вектор смещения 2, обусловленный скоростной аберрацией ИСЗ, по формуле (1). Для того чтобы операцию вычитания векторов свести к сложению, вектору 2 при его вычислении задано противоположное направление. Направление вектора скоростной аберрации 2 дополнительно проверялось по последовательности кадров с одной и той же звездой, “пробегающей” чрез поле зрения телескопа. Искомый вектор аномального отклонения вычислялся как сумма вектора 1 и вектора 2. В заключение этого раздела отметим, что векторы соответственно 1, 2, 3, изображенные на круговых диаграммах рис. 9(А) и 10(А) являются результатом наблюдений, проведённых в разные моменты времени.

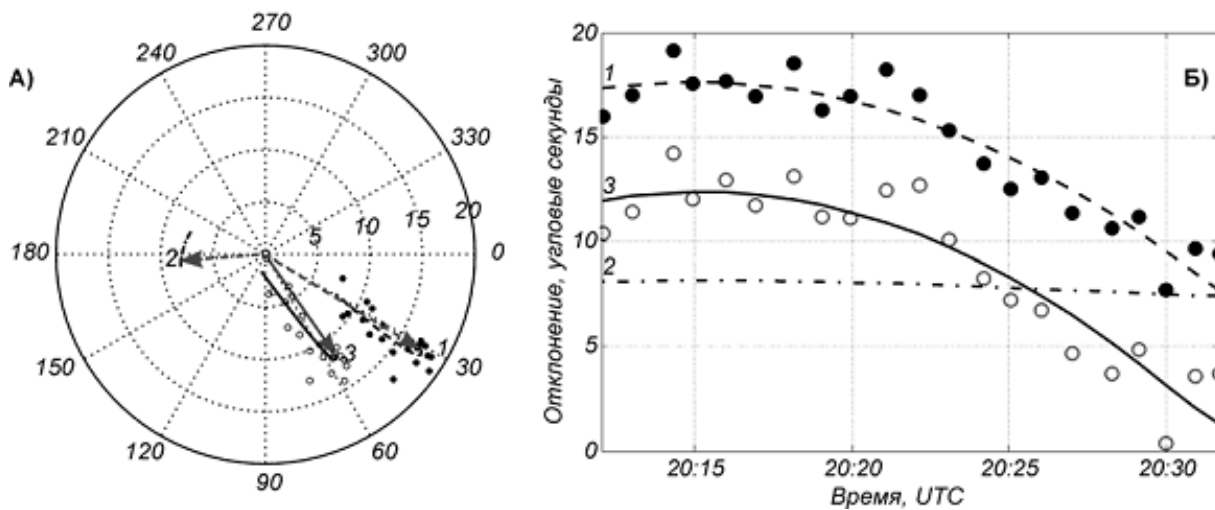


Рис. 9: Спутник Лагеос-1 20 марта 2007 г.

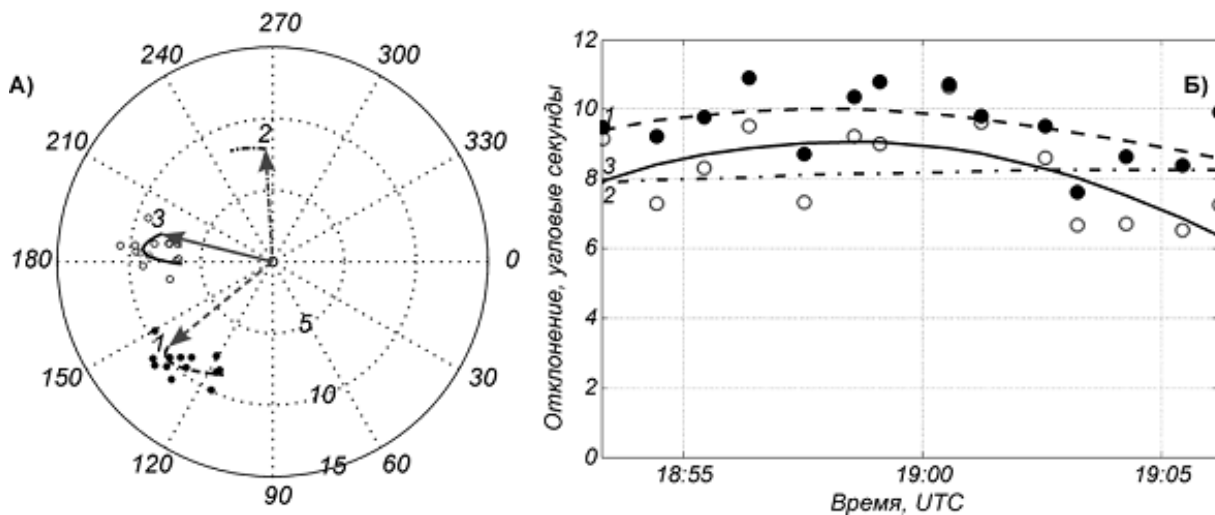


Рис. 10: Спутник Лагеос-1 28 июля 2007 г.

## 8 Результаты измерений с автоматической регистрацией

С марта по ноябрь 2007 г. по изложенной методике было зарегистрировано и обработано несколько десятков лазерно-локационных наблюдений различных спутников.

Полной обработке подвергались лишь те результаты, в которых количество зарегистрированных циклов локации составляло несколько сот, а размер изображения спутника не превосходил  $7'' \div 8''$ , что сводило до минимума ошибку измерений. Кроме того, обрабатывались результаты локации, когда спутник наблюдался, практически, на всей видимой части орбиты и состояние атмосферы позволяло зарегистрировать достаточно равномерный ряд наблюдений. Локация низких спутников начиналась на высоте около  $20^\circ$  над горизонтом, высоких спутников (Лагеос и более высоких) – около  $30^\circ$ . Время локации одного спутника составляло от  $5 \div 12$  минут для низких ИСЗ, около  $20 \div 25$  минут спутников Лагеос и до  $30^\circ 60$  минут для высоких спутников типа ГЛОНАСС, Эталон.

На рис. 9 и 10 в качестве иллюстрации приведены результаты наблюдений двух пролётов спутника Лагеос-1. На рис. 9А и 10А представлены векторные диаграммы, которые отображают картину в плоскости изображения телескопа. Угловые размеры по

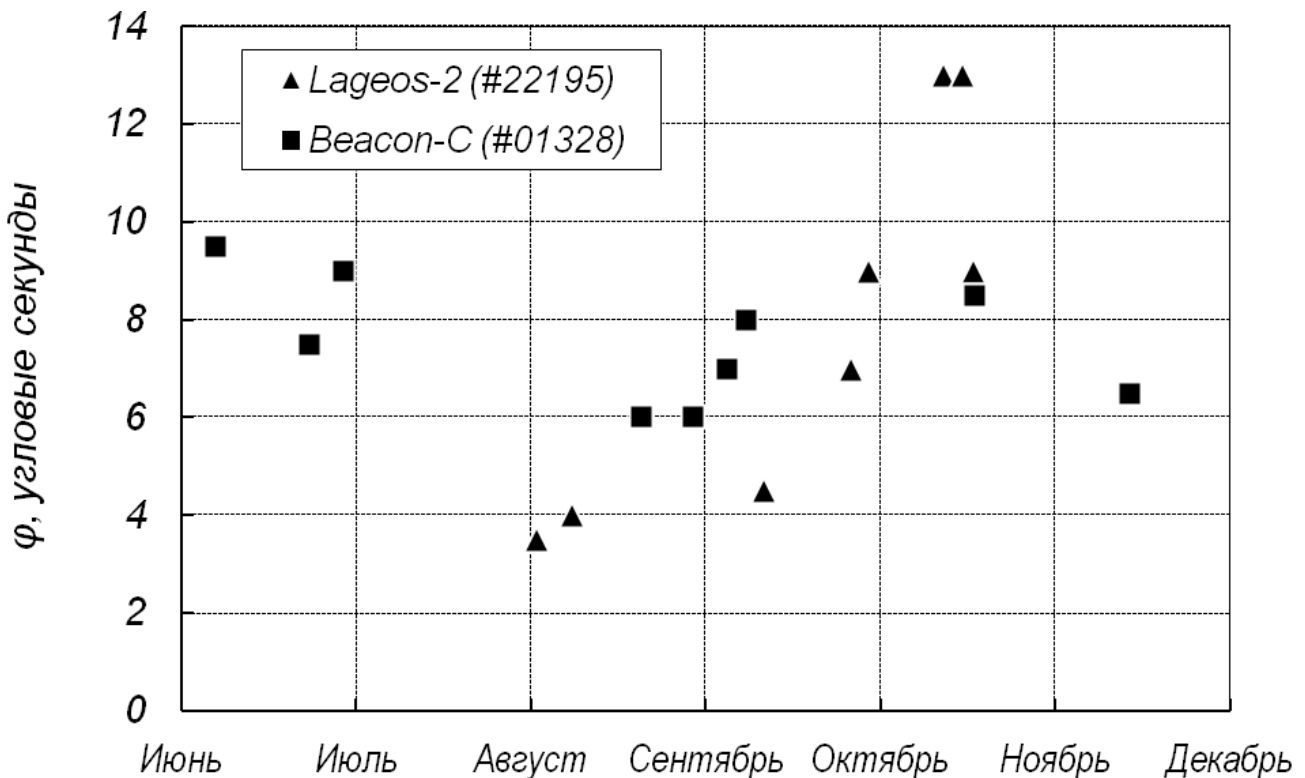


Рис. 11: Максимальные значения аномального угла отклонения лазерного импульса при локации ИСЗ в зависимости от сезона при телевизионной регистрации результатов.

окружности указаны в градусах, а радиальные размеры – в угловых секундах. Цифрой 1 обозначены точки отмеченного положения спутника в момент регистрации отраженного сигнала. Цифрой 2 отмечены величина и обратное направление скоростной аберрации, зависящей только от разности скоростей ИСЗ и станции наблюдения. Цифрой 3 обозначен вектор аномального отклонения луча, который находился как сумма векторов, отмеченных цифрами 1 и 2. На рис. 9Б и 10Б по оси ординат представлены модули отклонений, изображенных на диаграммах серии А (обозначения точек совпадают); по оси абсцисс отложено текущее время в часах и минутах по шкале UTC. Здесь следует обратить внимание на то, что рис. 9 и 10 отличаются тем, что результаты, представленные на них, соответствуют моментам времени, отстоящим друг от друга на несколько месяцев. Как видно из диаграмм, направления векторов аномального отклонения 3 заметно отличаются для разных эпох. Направления этих векторов различны и угол между ними может быть более  $120^\circ$ , что свидетельствует об очевидной сезонной зависимости [13].

Сезонная зависимость проявляется не только в направлении вектора смещения, но так же и в величине этого вектора, что видно из рис. 11. На графике максимальных значений величины угла аномального отклонения луча в зависимости от календарных дат, взятых с графиков серии Б (рис. 9, 10). Вычислив векторы аномального отклонения луча 3 по результатам наблюдений, мы предприняли попытку построения трёхмерного вектора по его проекциям.

## 9 Построение вектора аномального смещения

Автоматическая регистрация отдельных телекадров наряду с повышением точности позволила решить еще одну задачу: вычислить величину и направление вектора аномального смещения по двум его проекциям, разнесенным во времени. В качестве исходных проекций, использовались векторы, обозначенные цифрой 3.

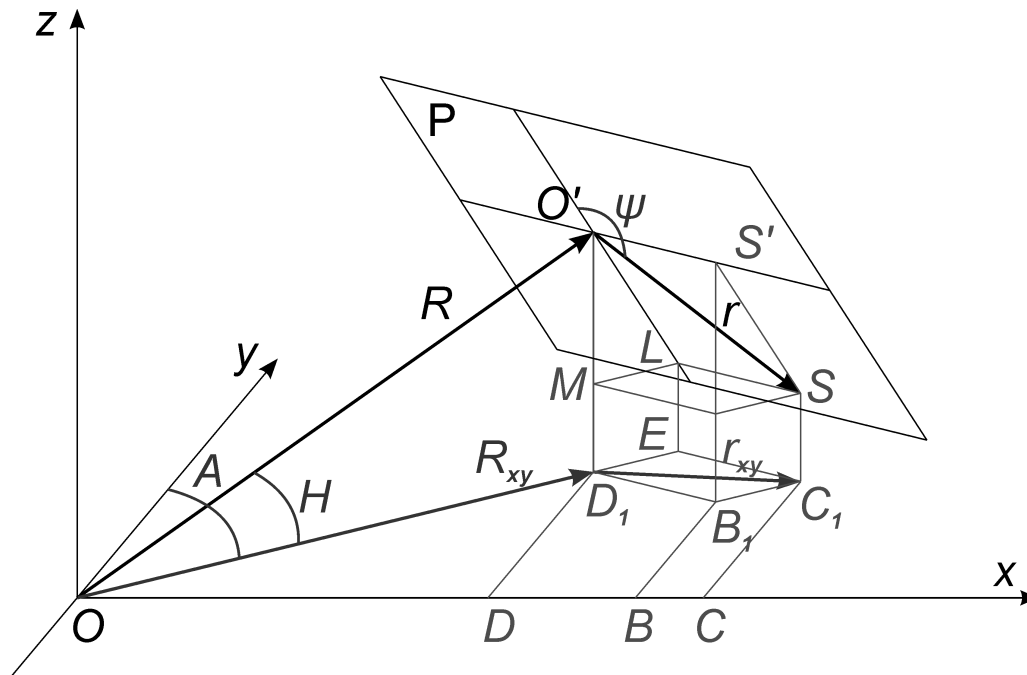


Рис. 12: Схематический чертёж плоскости изображения для вывода уравнения трёхмерного вектора смещения луча.

$P$  – плоскость изображения,  $R$  – радиус-вектор точки прицеливания,  $r$  – вектор смещения луча,  $A$  – азимут,  $H$  – высота.

Схема построения этого вектора по двум его проекциям, используя известные формулы [14], выглядит так. Для момента времени  $t_1$  строилась плоскость, проходящая через проекцию вектора смещения перпендикулярно к плоскости изображения. Точно такое же построение проводилось для момента времени  $t_2$ . Построенные плоскости находятся под углом друг к другу, соответствующем дуге орбиты ИСЗ между моментами времени  $t_1$  и  $t_2$ . Искомый вектор лежит на линии пересечения этих двух плоскостей. Для составления уравнений указанных плоскостей берутся три точки, лежащие в этих плоскостях.

Для каждого из двух моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  – это координаты начала и конца радиуса-вектора  $R$  (координаты точек  $O$  и  $O'$ ) и координаты точки  $S$  (рис. 12). По абсолютной величине вектора смещения  $r$  и углу  $\psi$  в системе координат плоскости изображения, а также топоцентрическим координатам ИСЗ, дальности  $R$  и вычисленным азимуту  $A$  и высоте  $H$ , вычислялись координаты двух точек: точки прицеливания  $O'$  и точки  $S$ , откуда приходит отражённый лазерный импульс. Точкой прицеливания мы называем направление, по которому направляется изначально лазерный импульс, а точка  $S$  – это изображение самого спутника в момент регистрации отраженного лазерного импульса. В соответствии с рис. 12 записываем координаты точки прицеливания  $O'(x, y, z)$ :

$$\begin{cases} x = R \cos H \sin A \\ y = R \cos H \cos A \\ z = R \sin H \end{cases} \quad (5)$$

Для координат точки отражения  $S(x', y', z')$ , соответственно получаются следующие соотношения:

$$\begin{cases} x' = R \cos H \sin A + r(\cos A \sin \psi - \sin A \cos H \cos \psi) \\ y' = R \cos H \cos A - r(\sin A \sin \psi + \cos A \sin H \cos \psi) \\ z' = R \sin H + r \cos H \cos \psi, \end{cases} \quad (6)$$

где  $R$  – радиус-вектор точки прицеливания,  $r$  – смещение лазерного луча от заданного направления, или угловое расстояние между точкой прицеливания и сигнальной точкой.

Смещению  $r$  приписываем смысл вектора (как и ранее). Координаты этих точек и станции наблюдения (локатора) переводятся в инерциальную систему JD2000, а затем приводятся к центру масс Солнечной системы. По результатам наблюдения одного спутника берутся два набора таких точек, соответствующих двум разным моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ . Координаты  $(x_1, y_1, z_1)$  соответствуют моменту времени  $t_1$ , а координаты  $(x_2, y_2, z_2)$  соответствуют моменту времени  $t_2$ . Для каждого набора из трёх точек составляется уравнение плоскости, в которой они находятся:  $Ax + By + Cz + D = 0$ . Коэффициенты  $A, B, C, D$  вычисляются по известной формуле уравнения плоскости по трём точкам, принадлежащим этой плоскости [15]. Для двух наборов из трёх точек имеем систему:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Данная система задаёт уравнение прямой, являющейся линией пересечения этих двух плоскостей:

$$\frac{x - x_1}{x - x_2} = \frac{y - y_1}{y - y_2} = \frac{z - z_1}{z - z_2} \quad (8)$$

Координаты  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  задают две точки, принадлежащие данной прямой.

По заданному значению  $x_1$  из системы (6), можно определить значения  $y_1$  и  $z_1$ . Аналогично, по заданному значению  $x_2$  можно определить  $y_2$  и  $z_2$ . Значения  $x_1$  и  $x_2$  берутся достаточно далеко от Солнечной системы, так чтобы годовой параллакс соответствующих им точек был менее  $1''$ . По координатам точек  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ , переведённым из инерциальной системы координат с началом в центре масс Солнечной системы во вторую экваториальную систему, получаем координаты точек (в этой системе)  $(\alpha_1, \delta_1)$  и  $(\alpha_2, \delta_2)$ . Эта система координат, наиболее наглядна. Она также используется для изображения карты звёздного неба [20].

На рис. 13 во второй экваториальной системе координат изображены точки, соответствующие направлениям вектора смещения, рассчитанные по результатам наблюдений (лазерной локации) спутников Лагеос-1 и Лагеос-2 в течение 2007 и 2008 годов по изложенной схеме. Эти точки на рисунке указывают, на какую точку небесной сферы направлен каждый вектор. Отметим, что для расчёта вектора смещения использовались векторы, обозначенные цифрой 3 на рис. 9 и 10 [13]. В этих векторах исключено влияние относительной скорости движения спутника.

Из представленных результатов следует, что описанное явление носит общий характер. Явление отклонения света проявляется не только в околоземном космическом пространстве при локации ИСЗ, но и в непосредственной близости от поверхности Земли. Результаты наших измерений качественно согласуются и с результатами известных работ [16, 17, 18]. Учитывая это, можно пойти дальше и рассмотреть картину явления, исключив, по возможности, известные факторы, способные влиять на величину и направление отклонения света.

Чтобы представить это явление в чистом виде (как если бы мы рассматривали его “со стороны”) необходимо исключить из результатов вычисления пространственных векторов (рис. 13) влияние орбитальной скорости Земли. Для этого трёхмерные векторы смещения луча, рассчитанные по приведенной схеме, сложить с орбитальной скоростью Земли. Именно сложить следует потому, что влияние орбитальной скорости Земли направлено в сторону противоположную вектору орбитальной скорости, который необходимо вычесть из векторов рис. 13. Такая операция позволит рассматривать явление, как если бы Земля была неподвижной на своей орбите. Орбитальная скорость Земли, равная 30 км/с, пересчитанная по формуле (1) в угловые величины, эквивалентна  $41''$ . Сложение указанных векторов выполнялось графически. По угловым координатам трёхмерного вектора

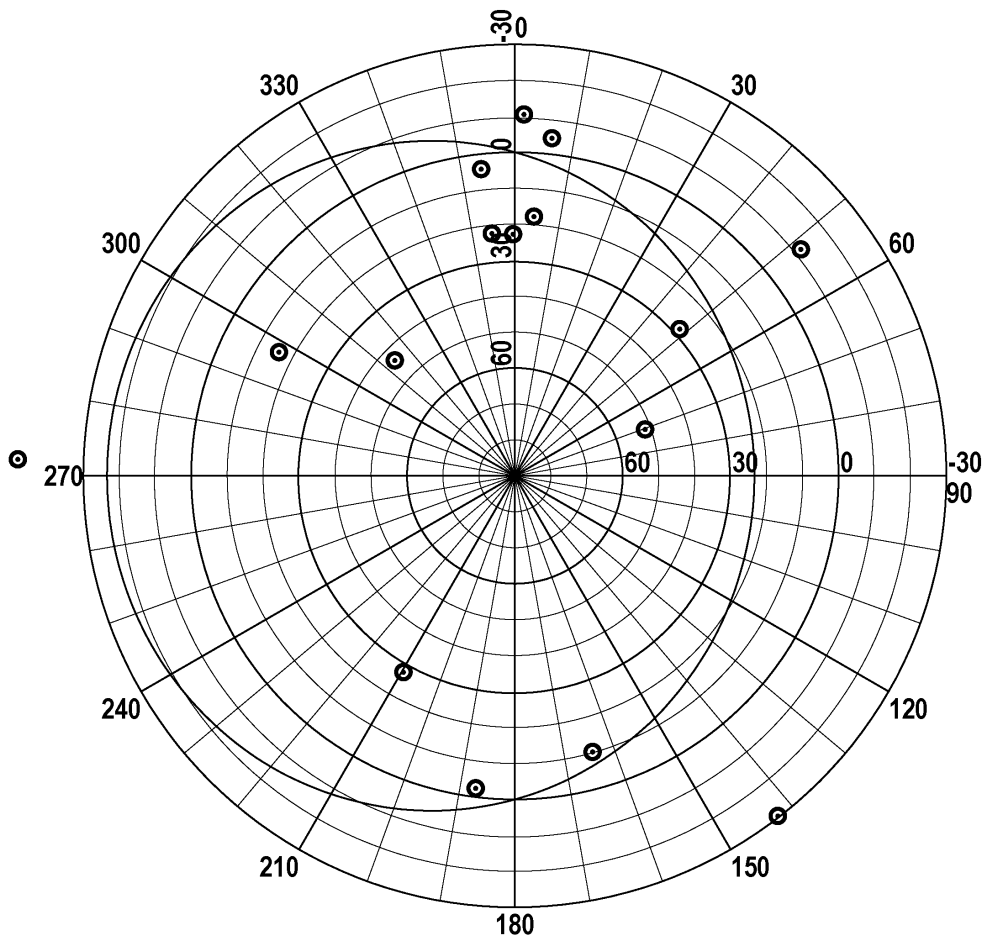


Рис. 13: Распределение направлений вектора смещения света с учётом скоростной абберации, зависящей от скорости спутника.

смещения луча света (рис. 13) и угловым координатам вектора орбитальной скорости, соответствующим этой дате, вычисляли угол между векторами в плоскости ортодромии по известной формуле,

$$\cos AB = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos (\alpha_2 - \alpha_1), \quad (9)$$

где  $AB$  – дуга большого круга в угловых единицах,  $(\alpha_1, \delta_1)$  – координаты точки  $A$  (направление вычисленного вектора рис. 13),  $(\alpha_2, \delta_2)$  – координаты точки  $B$  (направление орбитальной скорости Земли в момент наблюдения). Координаты вектора орбитальной скорости Земли для конкретной даты находились как точка пересечения линии эклиптики с лучом, проведённым из центра второй экваториальной системы координат в направлении орбитальной скорости, поскольку вектор орбитальной скорости лежит в плоскости эклиптики. Используя величины векторов и угла между ними, строилась величина и направление суммарного вектора смещения света, с исключённой орбитальной скоростью Земли. Координаты построенного суммарного вектора лежат на линии вычисленной ортодромии.

На рис. 14 приведён итоговый результат указанных вычислений [14]. Треугольными точками отмечены направления смещения света в отсутствии влияния орбитального движения Земли. Такое направление пространственного вектора смещения обусловлено положением Земли на орбите в данный момент времени при условии, что как если бы отсутствовало орбитальное движение в этот момент. Такая картина явления может быть объяснена с позиций концепции о наличии светонесущей среды в окружающем простран-

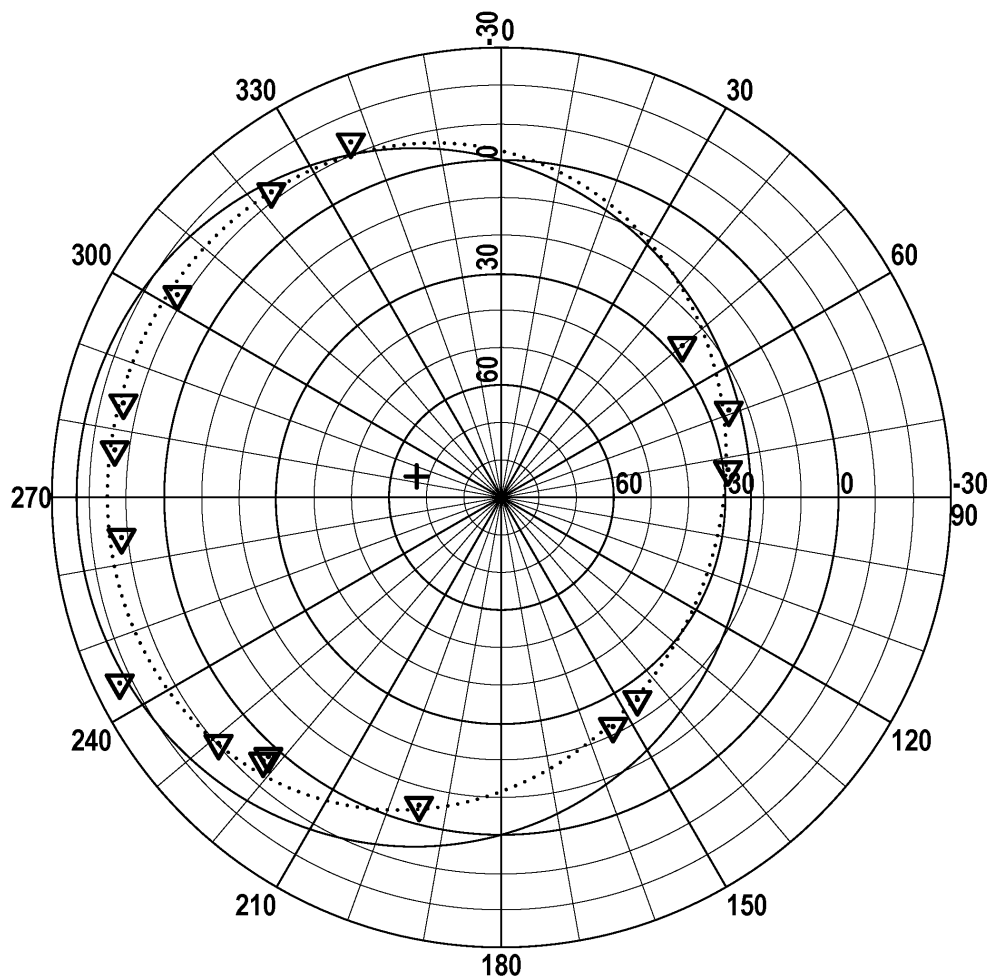


Рис. 14: Распределение направлений вектора смещения света с учётом скорости спутника и орбитальной скорости Земли. (Направления движения светонесущей среды в Солнечной системе в окрестности земной орбиты.)

стве. Заметим, что Земля вместе с Солнечной системой движется относительно центра галактики со скоростью около 250 км/с близкой к скорости светонесущей среды. Такое движение в аэродинамике называют движением в спутном потоке среды. Пунктирная замкнутая линия регрессии проведена по экспериментальным точкам. Двойная точка на графике с координатами  $\alpha = 223^\circ$ ,  $\delta = -3^\circ$ ,  $-4^\circ$  представляет собой измерения, проведенные в течение одной ночи 28.07.2007 г. для спутников Лагеос-1 и Лагеос-2 с интервалом в один час. Орбиты этих спутников лежат в разных плоскостях. Плоский угол между ними равен  $42^\circ$ . Такое совпадение подтверждает правильность методики наблюдений и обработки полученных результатов. На рис. 14 хорошо видна эксцентricность регрессионной линии относительно линии эклиптики, т. е. линия эклиптики и линия регрессии не эквидистантны. Это обстоятельство свидетельствует в очередной раз о сезонной зависимости результатов измерения.

Указанную эксцентricность можно объяснить тем, что плоскость орбиты Земли в Солнечной системе (плоскость эклиптики) составляет с плоскостью галактики Млечный путь угол  $\approx 60^\circ$ . Причём, радиус-вектор, направленный от Солнца в центр галактики почти совпадает с плоскостью орбиты Земли. Эти два обстоятельства объясняют асимметрию экспериментальной кривой относительно линии эклиптики. Поясним подробнее.

Объяснить аномалии отклонения света можно достаточно наглядно, если принять во внимание, что пространство заполнено светонесущей средой, причём, средой газоподобной.



Далее, мы воспользуемся идеей вихревого движения светонесущей среды в рукавах спиральной галактики [19], каковой является и наша галактика Млечный путь. Далее по давней традиции светонесущую среду будем называть эфиром. Ось вращения эфира находится в плоскости Галактики, или, по крайней мере, параллельна ей. Плоскость орбиты Земли и плоскость вихревого движения эфира составляют угол  $30^\circ$ . (В силу неперпендикулярности плоскости орбиты Земли и плоскости Галактики). Направления движения Земли по орбите и вихревого движения эфира в значительной степени совпадают (в пределах углов от нуля до  $30^\circ$ ). При направлении осей вращения под углом в  $30^\circ$  на орбите имеются две точки (зоны), в которых направления векторов скорости Земли и скорости вихревого движения среды совпадают. Результат суперпозиции векторов этих скоростей отображён в зонах соответственно  $90^\circ \div 120^\circ$  и  $270^\circ \div 300^\circ$  на рис. 14. В перпендикулярном направлении результирующий вектор скоростей направлен “выше” плоскости эклиптики (низ диаграммы рис. 14), а с противоположной стороны – “ниже” плоскости эклиптики. Причиной этому является то, что вектор скорости потока светонесущей среды и вектор орбитальной скорости Земли в этом секторе орбиты направлены под углом  $\approx 150^\circ$  друг к другу. Но в одном случае “сумма” векторов направлена “вверх” (низ диаграммы рис. 14), а в другом – “вниз” (верх диаграммы рис. 14). Полученные результаты дают основание полагать, что светонесущий эфир, представляет собой газоподобную среду, находящуюся в сложном движении. Этот вывод следует непосредственно из полученных результатов при длительных наблюдениях, как в случае лазерной локации ИСЗ, так и при измерениях, проведённых в непосредственной близости от поверхности Земли. Направление движения светонесущего эфира в околоземном пространстве определялось непосредственно из результатов наблюдений с использованием соответствующей методики обработки первичного материала, учитывающей направления отклонения света при лазерной локации. Не исключено, что в реальности возможно наличие неучтённых факторов описанного явления. Поэтому работу мы не считаем законченной. Её следует считать лишь начальным этапом более детального изучения описанного явления с увеличением точности измерений, прежде всего, за счёт более высокого разрешения в плоскости изображения оптической системы лазерно-локационной установки. Нам также представляется вполне возможным проводить подобные исследования, например, в СВЧ диапазоне электромагнитных волн. По результатам экспериментов можно судить о том, что явление непростое и его следует изучать с применением различных методов, а так же методов, позволяющих измерять продольную (вдоль луча) составляющую скорости среды.

Из приведенных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Всё окружающее пространство заполнено газоподобной светонесущей средой, традиционно называемой светонесущим эфиром.
2. В силу этого свойства среда находится в состоянии непрерывного, постоянного движения относительно небесных тел.
3. Движение светонесущей среды носит структурированный, вихревой характер.

На основании свойств 1–3 светонесущая среда эфир не может быть принята в качестве среды, относительно которой можно было бы рассматривать движение тел.

## Литература

- [1] Игнатенко Ю.В., Тряпицын В.Н., Игнатенко И.Ю. Измерение скоростной абберации при лазерной локации искусственных спутников Земли // Сборник тезисов "3-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям", 2003, с. 132.
- [2] Игнатенко Ю.В., Тряпицын В.П., Игнатенко И.Ю. Измерение скоростной абберации

- при лазерной локации искусственных спутников Земли // *Проблемы управления и информатики*, №2, 2004, с. 193–195.
- [3] Ignatenko Yu., Abalkin V.K., Abele M.K., Artyukh Yu.N. AderLaser network for the Moon and artificial satellite ranging // *Proc. Of the international conference on Earth rotation and the terrestrial reference frame*, 1985, v. 1, с. 242–246.
- [4] Ignatenko Yu., Kokurin Yu.L., Kurbasov V.V., Lobanov V.F., Sukhanovsky A.N., Triapitsin V.N. Upgrading the SLR station Katziveli // *X International Workshop on Laser ranging instrumentation*, Shanghai, 1996, p. 193–195.
- [5] Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М., Физматгиз, 1961, 824 с.
- [6] Кузнецов И.Л., Игнатенко Ю.В. Фотометрический анализ и расчёт плоского турбулентного пламени // *Физика горения и взрыва*, 1967 г. №1, с. 157–161.
- [7] Игнатенко Ю.В. Методика оценки качества согласования лазера с телескопом и расходимости лазерного пучка на КЛЮ ГАО НАНУ // *Сборник тезисов. "3-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям"*, 2003, с. 128.
- [8] Игнатенко Ю.В., Игнатенко И.Ю., Тряпицын В.Н. Аномальное отклонение лазерного луча при лазерно-локационных измерениях // *Сборник тезисов. VI Украинская конференция по космическим исследованиям*, 3–10 сентября 2006 г. НЦИУКС, Евпатория, с. 136.
- [9] Игнатенко Ю.В., Игнатенко И.Ю., Тряпицын В.Н. Измерение отклонения лазерного луча вблизи поверхности Земли // *Исследовано в России*, 34, 344–353, 2009, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/034.pdf>.
- [10] Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику, часть II, Случайные поля. М. "Наука", 1978, 463 с.
- [11] Хинце И.О. Турбулентность. М. "Физматгиз", 1963, 680 с.
- [12] Игнатенко Ю.В., Тряпицын В.Н., Игнатенко И.Ю. Отклонение света от заданного направления в околоземном космическом пространстве // *Исследовано в России*, 034, 344–353, 2009. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/034.pdf>
- [13] Ignatenko I.Yu., Ignatenko Y.V., Tryapitsyn V.M., Makeyev A.A. Measurement of Anomalous Angle of Deviation of Light During Satellite Laser Ranging // *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. October 2008, Poznań, Poland, Volume 1, p. 92–96.
- [14] Ignatenko Yu.V., Ignatenko I.Yu., Makeev A.A., Tryapitsyn V.N. Direction of the light displacement vector in laser ranging of the artificial Earth satellites // *Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodaesie*, vol. 48, 423 pages, Frankfurt, 2012, с. 155–159.
- [15] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. "Наука", 1968, 831 с.
- [16] Майкельсон А.А. Относительное движение Земли и светоносный эфир. Эфирный ветер. Сб. статей под ред. д.т.н. В.А. Ацюковского. М., Энергоатомиздат, 1993, с. 6–16.
- [17] Майкельсон А.А., Морли Э.В. Об относительном движении Земли и светоносном эфире. Там же, с. 17–31.
- [18] Miller D. The Ether-Drift Experiment and the Determination of the Absolute Motion of the Earth // *Reviews of Modern Physics*, Vol. 5(2), p. 203–242, July 1933. Имеется русский перевод: Д.К. Миллер Эксперимент по эфирному ветру и определение абсолютного движения Земли. 1933 г. Сб. Эфирный ветер. Под ред. В. А. Ацюковского. М. Энергоатомиздат. 1993, с. 195.
- [19] Ацюковский В.А. Общая эфиродинамика. Энергоатомиздат. М. 2003, 584 с.

- [20] Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. Под ред. Г.Н. Дубошина. Наука, М. 1976, 863 с.

## DISPLACEMENT OF LIGHT DURING SATELLITE LASER RANGING

Yu.V. Ignatenko<sup>1</sup>, I.Yu. Ignatenko<sup>2</sup>, V.N. Tryapitsyn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Crimean Laser Observatory of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Yalta, Republic of Crimea*

<sup>2</sup> *Federal State Unitary Enterprise "Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering" (VNIIFTRI), Mendeleevo, Russia*

igig@vniiftri.ru

This article describes the results of a study of the anomalous deviation of light detected during laser ranging of the Earth artificial satellites. A special technique developed for construction of a three-dimensional vector of the laser beam deviation based on processing of its projections onto a focal plane of a telescope is stated. Appropriate equations are derived. A method and results of test measurements of the displacement of light near the surface of the Earth, confirming the universal nature of this phenomenon, are described. From these results, the conclusion of the motion of light medium, traditionally called the luminiferous ether, at a rate in magnitude and direction close to but not equal to the velocity of the Earth is derived. Measured the deflection of light from a given direction is the result of adding the relative velocity of the satellite, velocity of the Earth, and finally light medium speed. This last fact explains the seasonal dependence of the measurements.

**Key Words:** satellite laser ranging, SLR, light displacement, light deviation, luminiferous medium, luminiferous aether.